

การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/
คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

นางสาวฐิติมา รุพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 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.

PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/ETHYLENE OCTENE
COPOLYMER/CARBON NANOTUBES NANOCOMPOSITES

Miss Thitima Rupunt

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและสมบัติของพอลิไพโรฟิลีน/เอทิลีนออกทีน
โคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

โดย

นางสาวฐิติมา รุพันธ์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร)

ฐิติมา รุพันธ์ : การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต. (PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/ETHYLENE OCTENE COPOLYMER/ CARBON NANOTUBES NANOCOMPOSITES)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร, 87 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และ/หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกใช้ในการดัดแปรพอลิโพรพิลีน ด้วยเหตุนี้ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (อัตราส่วน 80/20 และ 70/30) ที่เติมด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์ (0.5-2.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อพอลิเมอร์ผสม 100 ส่วน) ถูกเตรียมโดยการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดแบบ จากนั้นทำการตรวจสอบผลของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อความทนแรงกระแทก สมบัติด้านความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด อุณหภูมิการเกิดผลึก และเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนแรงดึง ยังสัมผัลดูลัส ความทนแรงดัดโค้ง มอดุลัสสะสม อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว และด็กีรชของความเป็นผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ ความทนแรงดึง ยังสัมผัลดูลัส การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงดัดโค้ง อุณหภูมิการเกิดผลึก และเสถียรภาพทางความร้อนได้รับการปรับปรุงเมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณที่เหมาะสมในพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีความแข็งดึง อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง และเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงมาก จึงอาจกล่าวได้ว่าเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์แสดงผลที่เสริมกันในการเพิ่มความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต

ภาควิชาวัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554.....

#5372428523:MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS:POLYPROPYLENE / ETHYLENE OCTENE COPOLYMER / CARBON

NANOTUBE / NANOCOMPOSITE

THITIMA RUPUNT: PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/
ETHYLENE OCTENE COPOLYMER/CARBON NANOTUBES

NANOCOMPOSITES. ADVISOR : ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT,

87 pp.

In this research, ethylene octene copolymer (EOC) and/or carbon nanotube (CNT) were employed to modify polypropylene (PP). With regard to this, PP/EOC blends (80/20 and 70/30) containing different loadings of CNT (0.5-2.0 phr) were prepared by means of melt blending on a twin screw extruder and then injection molded into specimens. The effects of EOC and CNT on the impact strength, tensile properties, flexural strength, dynamic mechanical properties, thermal properties and morphology of the resulting nanocomposites were investigated. The results showed that the impact strength, elongation at break, crystallization temperature and thermal stability increased, whilst the tensile strength, Young's modulus, flexural strength, storage modulus, glass transition temperature and degree of crystallinity decreased with increasing EOC loadings in the PP/EOC blends because of the high flexibility of EOC. Moreover, the improvement of the impact strength, Young's modulus, elongation at break, flexural strength, crystallization temperature and thermal stability was obtained by the appropriate amount of CNT in the PP/EOC/CNT nanocomposites. This is due to the great stiffness, aspect ratio and thermal stability of the CNT. It can be concluded that EOC and CNT exhibit synergistic effects with impact strength, elongation at break and thermal stability of the nanocomposites.

Department : Materials Science.....

Student's Signature.....

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology

Advisor's Signature.....

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเชื่อเพื่อเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำงานวิจัย อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายชื่อดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหามา และการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษมา แสงวัฒนาโรจน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี ให้คำแนะนำด้านวิชาการและการวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. บริษัท เอช เอ็ม ซี โปลิเมอร์ จำกัด ที่เชื่อเพื่อวัสดุดิบสำหรับใช้ในงานวิจัย

5. บริษัท เคมีคัล อินโนเวชัน ที่เชื่อเพื่อวัสดุดิบ สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย และเชื่อเพื่อเครื่องมือในการทำงานวิจัย

6. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เชื่อเพื่อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 วัสดุคอมพอสิต.....	4
2.2 พอลิโพรพิลีน.....	6
2.3 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์.....	9
2.4 สารตัวเติมและสารเสริมแรง.....	12
2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์.....	13
2.6 การฉีดแบบ.....	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 วัตถุประสงค์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.1.1 วัตถุประสงค์.....	23
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ.....	23
3.1.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	23
3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	24
3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	24
3.2.2 การผสมพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	25
3.2.3 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	26

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	26
3.3.1 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก.....	26
3.3.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง.....	27
3.3.3 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง.....	29
3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	30
3.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	30
3.4.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	31
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	32
3.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	32
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	34
4.1 ลักษณะชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต.....	34
4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต.....	34
4.2.1 ความทนแรงกระแทก.....	34
4.2.2 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ายังส์มอดุลัส.....	36
4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง.....	41
4.3 ผลทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	43
4.3.1 ผลทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	43
4.3.2 ผลทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน	44
4.4 ผลทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต.....	46
4.5 สัณฐานวิทยา.....	48
5 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
รายการอ้างอิง.....	53

ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	60
ภาคผนวก ง.....	63
ภาคผนวก จ.....	64
ภาคผนวก ฉ.....	70
ภาคผนวก ช.....	76
ภาคผนวก ซ.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	18
2.2	เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุต่างๆ.....	19
3.1	ส่วนผสมที่ใช้เตรียมนาโนคอมพอสิต.....	25
3.2	ขนาดชั้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I.....	29
4.1	ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต.....	35
4.2	สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต.....	39
4.3	สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต.....	42
4.4	สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	43
4.5	สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนัก ภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	45
4.6	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิ- ลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต.....	47

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ประเภทของวัสดุคอมพอสิตและลักษณะของวัสดุคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงลักษณะต่างๆ.....	5
2.2	วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ที่ถูกใช้ในเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 777	6
2.3	โครงสร้างทางเคมีของไอโซเทกติกพอลิไพโรฟิไลน.....	7
2.4	การนำพอลิไพโรฟิไลนไปใช้งานในด้านต่างๆ.....	8
2.5	โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์.....	9
2.6	เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์.....	10
2.7	รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม	12
2.8	รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนในวัสดุชนิดต่างๆ.....	13
2.9	คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว.....	14
2.10	คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น.....	14
2.11	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ(arcs discharge).....	15
2.12	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการระเหยด้วยแสงเลเซอร์.....	16
2.13	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ.....	16
2.14	เครื่องฉีดแบบ.....	19
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	23
3.2	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (LabTech type LE25-30C).....	24
3.3	เครื่องฉีดแบบ (Toshiba machine EC 130S).....	25
3.4	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Charpy (Dynisco SIMATIC-OP7)...	26
3.5	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K).....	27
3.6	ขั้นทดสอบความทนแรงดึง.....	27
3.7	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD 500).....	28
3.8	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Mettler Toledo, DMA 861°).....	29
3.9	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Perkin-Elmer, DSC 7).....	30
3.10	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน(ทีจีเอ) (Mettler Toledo, TGA/SDTA 851°).....	31

3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV).....	32
4.1	พอลิโพรพิลีนคอมพอสิต (a) พอลิโพรพิลีน เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์คอมพอสิต (b) พอลิโพรพิลีนเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต	32
4.2	ความทนแรงกระทำของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต.....	35
4.3	ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน /เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต.....	36
4.4	ยังสัมผัสของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	37
4.5	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	38
4.6	ความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม พอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต.....	40
4.7	มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	43
4.8	แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/ คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	44

4.9	มาตรฐานวิทยาบรเวณพื้นผิวยรอยแตกหักของพอลิไพร์ฟีนบริสุทท์และพอลิเมอ์ ผสมพอลิไพร์ฟีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอ์ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	45
4.10	มาตรฐานวิทยาบรเวณพื้นผิวยรอยแตกหักของพอลิไพร์ฟีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอ์/คาร์บอนนาโนทิวบ์คอมพอสิต ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	46

บทที่ 1

บทนำ

การปรับปรุงสมบัติการใช้งานของพอลิเมอร์สามารถกระทำโดยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์คอมพอสิต ซึ่งการเตรียมพอลิเมอร์ผสมอาจทำให้สมบัติบางอย่างได้รับการปรับปรุง แต่สมบัติบางอย่างอาจเสียไปหรือลดลง เช่น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีนและยางเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene propylene rubber, EPR) หรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene propylene diene rubber, EPDM) เพื่อปรับปรุงความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน มีผลทำให้ความแข็งตึงของชิ้นงานลดลง หรือการเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีนด้วยสารอนินทรีย์ เช่น ทัลค์ (talc) โวลลาสโทไนต์ (wollastonite) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์สำคัญ คือ ลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เพิ่มความแข็งตึง ลดการหดตัว และเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เป็นต้น แต่อาจทำให้ความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกของชิ้นงานลดลง ทั้งนี้ขึ้นกับชนิด ปริมาณ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของสารที่ใช้ ดังนั้นการเตรียมคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมอาจช่วยปรับสมดุลของสมบัติต่างๆ ที่ต้องการหรือเสียไป รวมทั้งลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

การผสมพอลิโพรพิลีนกับอิลาสโตเมอร์หรือยางเป็นเทคนิคที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนเพื่อให้สามารถใช้งานเชิงวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์และเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งได้มีการใช้ยางโอเลฟินส์ เช่น ยางเอทิลีนโพรพิลีน และยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเข้ารวมตัวกับพอลิโพรพิลีนได้ง่าย มีความอึดตัวสูงและราคาถูก

ปัจจุบันความพยายามที่จะเพิ่มความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนเพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมรถยนต์ได้มุ่งไปที่การใช้เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene octene copolymer, EOC) ซึ่งเป็นยางโอเลฟินส์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดัดแปรความทนแรงกระแทกชนิดใหม่ ที่ได้จากการพัฒนาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเมทาโลซีน (metallocene catalyst) โดยบริษัทดาวเคมิคัล (Dow Chemical Company) ซึ่งมีผลทำให้สามารถควบคุมระดับของสายโซ่กิ่งตามความยาวของสายโซ่โมเลกุลหลักของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ได้ โดยมีการกระจายออกทีนในสายโซ่หลักอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบที่แคบ จึงทำให้

สามารถปรับปรุงสมบัติด้านการไหล (rheology) และความสามารถในการขึ้นรูปรูปแบบหลอมเหลว (melt processability) โดยจะสามารถกระจายตัวได้ดีกว่า และผสมเข้ากับพอลิโพรพิลีนได้เร็วกว่าการใช้ยางเอทิลีนโพรพิลีนหรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน ซึ่งมีผลทำให้ยางเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม และถูกนำไปใช้งานแทนยางเอทิลีนโพรพิลีนและยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ยางเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำกว่ายางเอทิลีนโพรพิลีนและยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน ดังนั้น จึงสามารถรักษาสภาพความเป็นยางไว้ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติด้านความทนแรงดึงสูงกว่าเมื่อใช้ยางในปริมาณเท่ากันซึ่งความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนจะได้รับการปรับปรุงถ้ายางเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กระจายตัวสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน

จากการศึกษาเกี่ยวกับยางเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ พบว่าปริมาณของออกทีนในโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงดึงระหว่างผิว (interfacial tension) ในพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ต่ำลง ซึ่งโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณออกทีนมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติเป็นยางได้ดี เนื่องจากหมู่เฮกเซนที่ห้อยอยู่ด้านข้างจะลดความสามารถในการเกิดผลึกและเพิ่มความยืดหยุ่นของโคพอลิเมอร์ และจากการมีความคล้ายกันทางเคมีและขึ้นรูปได้ง่าย จึงทำให้เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้งานเพิ่มมากขึ้นในการเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีนชนิดต่างๆ เช่น พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น ซึ่งยางเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท ดาวเคมีคอล ที่มีชื่อทางการค้าว่า “Engage 8200” มีดัชนีหลอมไหล (melt flow index) เท่ากับ 5.0 กรัม/10 นาที มีปริมาณออกทีนร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 0.87 กรัม/ลบ.ซม.

อย่างไรก็ตาม การใส่ยางเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนจะมีผลทำให้ความแข็งตึง (stiffness) โมดูลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) และความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งการใส่สารตัวเติมอนินทรีย์ เช่น ทัลค์ ไมก้า แอสเบสทอส และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น จะช่วยเพิ่มความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ที่เสียไป หากแต่การใส่สารเหล่านี้ในปริมาณมาก เพื่อให้มีประสิทธิภาพ ในการปรับปรุงสมบัติจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจไม่เหมาะกับการใช้งานในหลายๆ ด้าน ดังนั้น การใส่สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผูกผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นจำนวนมากอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากสารเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific

surface area) สูงมาก จึงทำให้สารเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงถึงแม้จะใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube) เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้หลากหลาย สมบัติที่มีความโดดเด่นคือมีความยืดหยุ่นสูง มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) มากกว่า 1000 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าพบว่ามีน้ำหนักเพียง 1 ใน 6 แต่กลับมีความทนแรงดึงที่มากกว่า โดยทั่วไปมียังสมบัติสูงอยู่ในช่วง 4.7 TPa ถึง 270 GPa และมีการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) สูงถึง 1000-2000 S/cm ถ้าหากนำไปใช้ร่วมกับพอลิเมอร์จะสามารถทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงต่อกันเป็นรูปท่อทรงกระบอกปลายปิดที่มีความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ขณะที่ความยาวของคาร์บอนนาโนทิวบ์สูงถึงระดับไมโครเมตรหรือมากกว่า ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์จึงมี aspect ratio สูงกว่าวัสดุอื่นๆ ค่อนข้างมาก คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube, MWNT) และคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (single-walled carbon nanotube, SWNT) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นเนื่องจากสามารถผลิตได้ง่าย และยังมีราคาถูกกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 วัสดุคอมพอสิต [1,2]

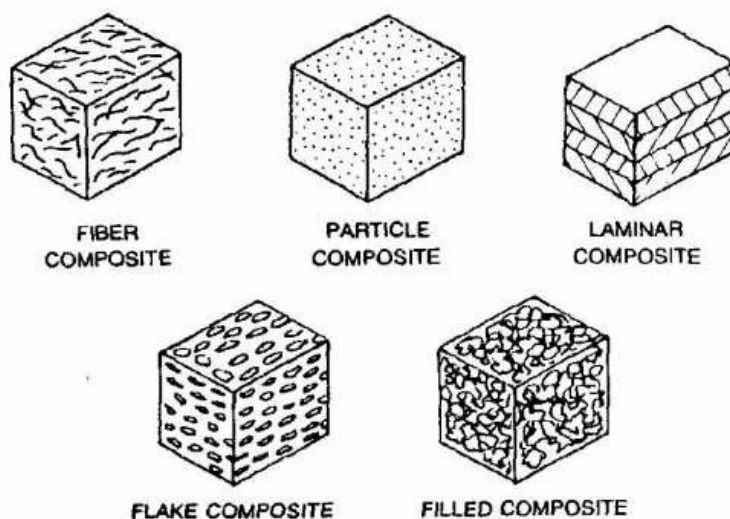
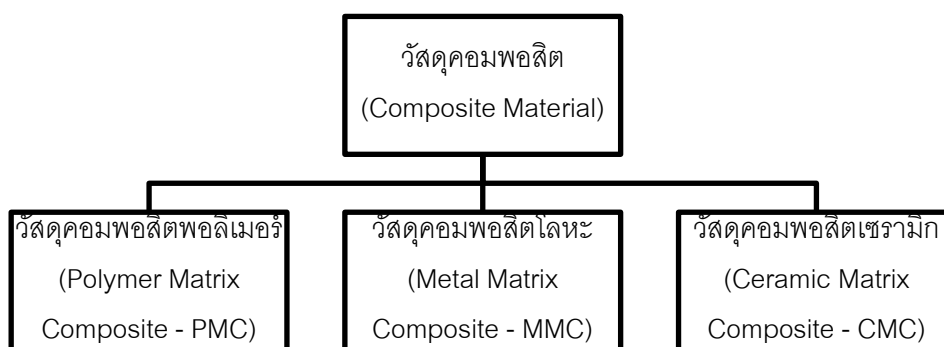
โดยภาพรวมแล้วอาจตีความได้ว่าวัสดุคอมพอสิต คือวัสดุที่มีการรวมตัวกันมากกว่าสองชนิดขึ้นไป ซึ่งการรวมตัวนั้นย่อมต้องให้สมบัติในด้านต่างๆที่ดีมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งในยุคแรกเริ่มของการทำวัสดุคอมพอสิตนั้นมีการใช้วัสดุจากธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น การทำอิฐเพื่อใช้ในการก่อสร้าง โดยมีการผสมฟางข้าวเข้ากับดินเหนียว ซึ่งตัวของฟางข้าวจะช่วยทำให้ดินเหนียวมีความแข็งแรง สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างได้ ส่วนวัสดุคอมพอสิตในยุคปัจจุบันได้เริ่มขึ้นในราวศตวรรษที่ 20 จุดเริ่มต้นมาจากการที่มีสารสังเคราะห์ เรซินฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol formaldehyde resin) หรือ เรซินฟีนอลิก (phenolic resin) และเส้นใยแก้ว (glass fiber) ออกมาวางจำหน่ายได้ จึงมีการนำเอาวัสดุทั้งสองชนิดมาประกอบกันกลายเป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว และมีการพัฒนาต่อเนื่องมาเรื่อยๆ ประกอบกับเมื่อสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติลง จึงมีการนำเอาวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์มาใช้งานเพิ่มมากขึ้น เพราะความต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

การพัฒนาวัสดุคอมพอสิตมีขึ้นอย่างต่อเนื่องมีวัสดุหลายชนิดที่ได้ผลิตขึ้นมาในภายหลัง เช่น เส้นใยอะรามิด (aramid fiber) หรือเป็นที่รู้จักในชื่อทางการค้าว่า เคฟลาร์ (Kevlar) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงมาก ซึ่งวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ที่ถูกผลิตขึ้นมาจะนิยมนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง ชิ้นส่วนของยานอวกาศ รวมไปถึงในอุตสาหกรรมยานยนต์ นอกจากนี้ ในปัจจุบันยังมีการผลิตวัสดุนาโนคอมพอสิต (nanocomposite) เพื่อตอบสนองความต้องการในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความคงทน และความแข็งแรงที่ดี

ข้อดีของการใช้วัสดุคอมพอสิตมีอยู่หลายประการ แต่การเตรียมเป็นวัสดุคอมพอสิตอาจทำให้สมบัติบางอย่างได้รับการปรับปรุง แต่สมบัติบางอย่างอาจเสียไปหรือลดลง เช่น ความเหนียว ความสามารถในการขึ้นรูป สมบัติเชิงกล รวมไปถึงสมบัติทางด้านฟิสิกส์ สิ่งสำคัญคือการเลือกใช้วัสดุคอมพอสิตให้เหมาะสมกับงานหรือพัฒนาต่อเนื่องโดยการเติมสารเสริมแรงชนิดอื่นๆลงไป เพื่อพัฒนาสมบัติในแต่ละด้านให้มีความสมดุลต่อกันมากขึ้น

2.1.1 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต

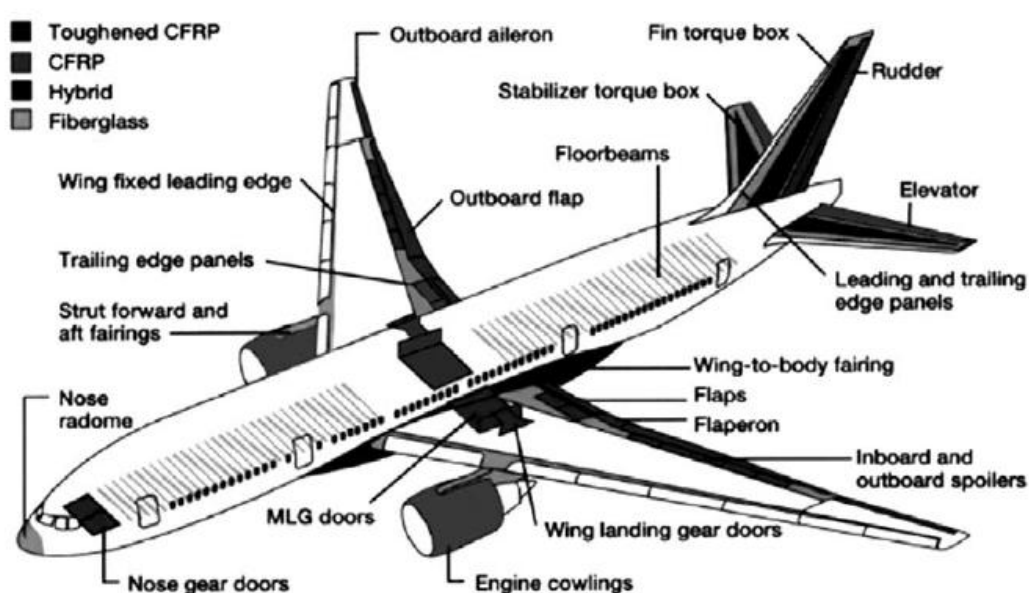
วัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งประเภทตามเมทริกซ์ที่เป็นส่วนผสมหลักได้ 3 ชนิดคือ วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ (polymer matrix material - PMC) วัสดุคอมพอสิตโลหะ (metal matrix material - MMC) และวัสดุคอมพอสิตเซรามิก (ceramic matrix material - CMC) หรือสามารถแบ่งตามลักษณะของสารเสริมแรงที่นำมาใช้ไม่ว่าจะเป็นสารตัวเติมเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibrous composites) สารตัวเติมเสริมแรงแบบอนุภาค (particulate composites) สารตัวเติมเสริมแรงเป็นชิ้นเล็กๆ (flake composites) หรือ สารตัวเติมเสริมแรงเป็นชั้นหรือแผ่น (laminar or layered composites) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ประเภทของวัสดุคอมพอสิตและลักษณะของวัสดุคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงลักษณะต่างๆ [1]

2.1.2 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต

อย่างแรก คือ งานด้านอวกาศ เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตมีความจำเพาะสูง คือ มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับความหนาแน่น ตัวอย่างเช่น เมื่อถูกนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องบินพาณิชย์ทำให้น้ำหนักรวมมีค่าลดลง แต่ค่าความแข็งแรงเท่าเดิม ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ลดลง ในปัจจุบันเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 777 และโบอิง 787 มีส่วนประกอบที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยแก้ว ดังภาพที่ 2.2



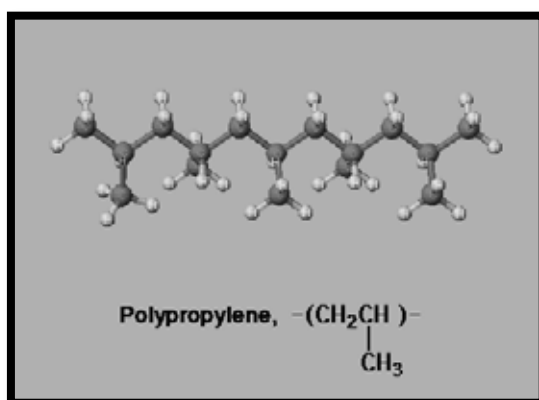
ภาพที่ 2.2 วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ที่ถูกใช้ในเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 777 [1]

ส่วนงานด้านเครื่องยนต์ เรือ ยานยนต์ เนื่องจากความได้เปรียบในด้านของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีความซับซ้อนที่เป็นส่วนประกอบในเครื่องยนต์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี หรือสมบัติทางด้านความคงทนแข็งแรงและมีน้ำหนักเบาจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมต่อเรือ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

2.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) [3-4]

หลังจากที่พอลิเอทิลีนได้ออกสู่ตลาดราว 15 ปี ได้มีการพัฒนาสังเคราะห์พลาสติกชนิดใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างจากพอลิเอทิลีนขึ้นมาได้สำเร็จ นั่นก็คือการผลิตพอลิโพรพิลีนจากแก๊ส

โพรพิลีน ซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยโดย Natta แห่งประเทศอิตาลี ความสำเร็จที่ได้เป็นผลเนื่องมาจากการได้ศึกษางานของ Ziegler แห่งประเทศเยอรมนี และจนที่สุดใน ค.ศ. 1954 Natta จึงประสบความสำเร็จในการเตรียมพอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.3 และมีโครงสร้างเป็นแบบไอโซแทกติก (isotactic) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta Catalyst) ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นในการผลิตพอลิโพรพิลีนในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1957 เป็นต้นมา



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนเริ่มต้นจากการใส่แก๊สโพรพิลีนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ (reactor) ภายใต้ความดันต่ำ (2-4 บาร์) อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส ในตัวกลางเฉื่อย เช่น น้ำมันดีเซล เฮปเทน หรือโทลูอีน ภายใต้บรรยากาศเฉื่อย เช่น บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตาที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ไททานเนียมเตตระคลอไรด์-อะลูมิเนียมอัลคิล (TiCl₄-RAI) เนื่องจากพอลิโพรพิลีนไม่ละลายในตัวกลางเฉื่อย ดังนั้น เมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้วจะตกตะกอนออกมาหลังจากที่ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสิ้นสุดลง ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตาจะถูกทำลายโดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เอทานอล หรือโพรพานอล โดยสารทั้งหมดที่เกิดขึ้น ยกเว้นพอลิเมอร์ จะถูกสกัดออกไปได้ด้วยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์ แล้วจึงนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (เซนตริฟิวจ์) และทำให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส

พอลิโพรพิลีนที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตาจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 60,000 ถึง 200,000 มีความเป็นผลึกสูง มีความหนาแน่น 0.905 กรัม/ลบ.ซม. เนื่องจากการมีความเป็นผลึกสูงจึงส่งผลให้พอลิโพรพิลีนที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีมาก เช่น เหนียว แข็งแกร่ง และมี

ความทนแรงดึงสูง พอลิโพรพิลีนมีจุดหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีน จึงทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน นอกจากนี้ ความเป็นผลึกยังช่วยสกัดการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี ไอน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำสามารถทนกรดและเบสได้ดี สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก หากแต่พอลิโพรพิลีนยังมีข้อจำกัดในการใช้งานบางอย่าง เช่น เปราะ และแตกง่ายที่อุณหภูมิต่ำๆ เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ชอบน้ำ ติดสียาก มีเสถียรภาพต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรเจนอะตอมที่เกิดพันธะกับคาร์บอนองศาที่ 3 (tertiary carbon atom) ดังนั้น ก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนต์

สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน คือ เป็นพอลิเมอร์ที่มีผิวแข็ง สามารถทนทานต่อการขีดข่วน คงตัวไม่เสียรูปร่าง เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อสารเคมีส่วนใหญ่ได้เป็นอย่างดี มีความเหนียวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 105 -15 องศาฟาเรนไฮต์ สามารถทนอุณหภูมิสูงที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียสที่ใช้สำหรับฆ่าเชื้อได้ อีกทั้งสามารถทำให้เกิดสีได้ง่ายโดยการนำมาผสมกับแม่สีทั้งในลักษณะโปร่งแสงและทึบแสง

นอกจากนี้การใช้งานของพอลิโพรพิลีนยังสามารถแบ่งตามประเภทของการขึ้นรูป ดังนี้

1. งานฉีดขึ้นรูป เช่น ถัง กะละมัง ตะกร้า ของเด็กเล่น เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ทางการแพทย์ และภาชนะบรรจุทั่วไป เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4
2. แผ่นฟิล์ม ใช้ทำฟิล์มใส ถูกร้อน ถูงเย็น ซองใส่เนื้อสัตว์ ฟิล์มห่อหุ้มบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน
3. งานเป่า ทำผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้งานเช่นเดียวกับ HDPE แต่จะมีความทนทานสูงกว่า เช่น ขวด ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีมากกว่า HDPE
4. งานสิ่งทอ ทำเส้นใย กระสอบสาน เชือก แห และอวน เป็นต้น



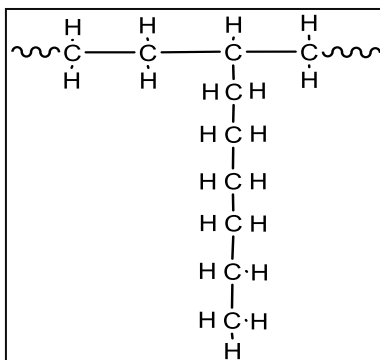
ภาพที่ 2.4 การนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานในด้านต่างๆ

2.3 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Ethylene octane copolymer, EOC) [5-11]

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene octane copolymer, EOC) ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท ดาวเคมีคอล (Dow Chemical Company) โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมทาโลซีน (metallocene catalyst) เพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติให้กับพอลิเมอร์ที่มีความทนแรงกระแทกต่ำ ซึ่งในปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการกระจายของออกทีนในสายโซ่หลักอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้สามารถควบคุมระดับของสายโซ่กิ่งตามความยาวของสายโซ่โมเลกุลหลักได้ อีกทั้งสามารถปรับปรุงสมบัติด้านการไหล (rheology) เช่น พฤติกรรมแรงเฉือนลด (shear thinning) และความสามารถในการขึ้นรูปแบบหลอมเหลว (melt processability) เพราะมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบที่แคบ โดยจะมีกระจายตัวได้ดีกว่า และยังสามารถผสมเข้ากับพอลิโพรพิลีนได้เร็วกว่าการใช้ยางเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene propylene rubber, EPR) หรือยาง EPDM [5] ถ้าหากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน จะส่งผลให้สามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ และสมบัติด้านความเหนียวของพอลิโพรพิลีนให้ดีขึ้นได้

จากการศึกษาของ Carriere และ Silvis [6] พบว่า ปริมาณออกทีนในโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นในระบบของพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีนและมีผลทำให้แรงตึงระหว่างผิว (interfacial tension) ต่ำลง และเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณออกทีนมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติ

เป็นอิลาสโตเมอร์ได้ดี เป็นเพราะว่าหมู่เฮกเซนที่ห้อยอยู่ด้านข้างจะลดความสามารถในการเกิดผลึก และเพิ่มความยืดหยุ่นของโคพอลิเมอร์ [7] ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้งานเพิ่มมากขึ้นในการเพิ่มสมบัติทางด้านความเหนียวให้กับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น เพราะการมีความคล้ายกันทางเคมี สามารถผสมเข้าด้วยกันได้ดี [8] อีกทั้งเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังอยู่ในลักษณะเป็นเม็ดซึ่งสะดวกในการขนส่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.6 และยังสามารถผสมได้ง่าย



ภาพที่ 2.6 เม็ดเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

สมบัติของเอทิลีนออกทีนออกทีนโคพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของโอเลฟินส์ที่ใส่เข้าไป เมื่อปริมาณโอเลฟินส์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้โคพอลิเมอร์เปลี่ยนจากของแข็งที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึกที่แข็งตึงไปเป็นอิลาสโตเมอร์แบบอสัณฐานที่มีความนิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ สมบัติของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับขนาด และความยาวของส่วนที่เป็นโซ่กิ่งอีกด้วย นอกจากนี้

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังสามารถรับสารเติมแต่งได้ในปริมาณสูง มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และเมื่อเกิดการเชื่อมขวางแล้วจะสามารถทนต่อความร้อน แรงกด หรือสภาพอากาศได้ดีเยี่ยม สามารถนำมาใช้ในการหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิลได้

Adhikari และคณะ [9] ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค atomic force microscopy (AFM) พบว่า เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์สามารถกระจายตัวในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้ดี

Silva และคณะ [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหล สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian flow) เมื่ออัตราเฉือน (shear rate) อยู่ในช่วง $27-2700 \text{ s}^{-1}$ สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่า การผสมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นสารที่มีความสมดุลระหว่างความแข็งตึง และความเหนียว ทำให้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความทนแรงกระแทกสูง การที่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังมีสมบัติการไหลที่ดี ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานบางๆ ได้ดี เป็นการช่วยประหยัดวัตถุดิบ และลดต้นทุนการผลิต

เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีสมบัติการหลอมไหลที่ไม่ค่อยดี ทำให้ไม่สามารถใช้สารดัดแปรที่มีความหนืดสูงได้ เช่น ยาง EPDM แต่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีสมบัติการหลอมไหลที่ดี จึงเหมาะกับการนำมาใช้งานเป็นสารดัดแปรความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีน เนื่องจากจะทำให้ของผสมที่ได้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย [8]

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัทดาวเคมีคอล ที่มีชื่อทางการค้าว่า “Engage 8200” มีดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 5.0 กรัม/10 นาที มีปริมาณออกทีนร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 0.87 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งถูกผลิตด้วยเทคนิค INSITE™ [11]

2.4 สารตัวเติม (Fillers) [12-13]

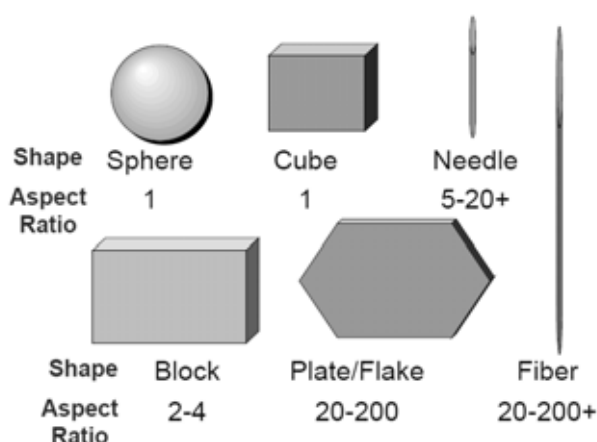
ในอุตสาหกรรมปัจจุบันมีการใช้สารตัวเติมทั้งชนิดที่เป็นสารตัวเติมแบบอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. สารตัวเติมชนิดไม่ทำปฏิกิริยา (inert filler) หรือสารเพิ่มเนื้อ (extender) ใช้สำหรับลดต้นทุนการผลิต โดยสมบัติที่เปลี่ยนแปลงในเทอร์โมพลาสติกเมื่อมีการเติมสารชนิดนี้เข้าไปคือ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มอดุลัสการยืดตัว ความต้านการกดทับ ความต้านแรงบิดโค้งเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว ความแข็งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัว (heat deflection temperature) เพิ่มขึ้น และที่สำคัญคือการผลิต

2. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing filler) วัตถุประสงค์สำคัญในการใช้สารตัวเติมชนิดนี้คือ เพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติของพลาสติกผสมให้ดีขึ้น ทั้งค่าความทนแรงดึง ความต้านทานแรงดัดโค้ง มอดุลัส และการยืดตัวเพิ่มขึ้น รวมไปถึงอุณหภูมิการบิดตัวเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว เป็นต้น

2.4.1 หลักในการพิจารณาการนำสารตัวเติมไปใช้งานในอุตสาหกรรม

1. ลักษณะอนุภาค (particle shape) อนุภาคของสารตัวเติมมีรูปร่างต่างๆ กัน ได้แก่ ทรงกลม (sphere) ทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ (cube) บล็อก (block) แผ่นหรือเกล็ด (plate or flake) เส้นใย (fiber) แบบเข็มหรือแท่ง (needle or acicular) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 โดยมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของอนุภาค (aspect ratio) แตกต่างกันไปซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่เตรียมได้



ภาพที่ 2.7 รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม

2. การกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution) มีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติก สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยใช้ตะแกรงร่อน ถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยวิธีการตกตะกอน

3. พื้นที่ผิว (surface areas) เนื่องจากการยึดเกาะระหว่าง 2 ภูมิภาคคือพอลิเมอร์ และสารตัวเติมจะเกิดขึ้นที่ผิว ดังนั้น หากพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตสูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถวัดพื้นที่ผิวได้โดยใช้หลักการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ตามวิธีบลูว์ร์-เอ็มเม็ทเทลเลอร์ (BET)

4. การจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle packing) เป็นความสามารถในการจัดเรียงของอนุภาคในวัสดุคอมพอสิต โดยจะพิจารณาในรูปของสัดส่วนการรวมตัว (packing fraction) ซึ่งได้แก่ ปริมาตรทั้งหมดที่สารตัวเติมใช้ในการจัดเรียงตัวในภูมิภาคของพอลิเมอร์เมื่อปริมาณสารตัวเติมที่ใช้สูงสุด ดังนั้น สารตัวเติมที่มีค่าสัดส่วนการรวมตัวสูงแสดงว่ามีพอลิเมอร์แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมมาก การสัมผัสกันของอนุภาคต่ำ ซึ่งทำให้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลดี

5. ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) เป็นสมบัติที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่ทำการขึ้นรูป

2.5 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube) [14-17]

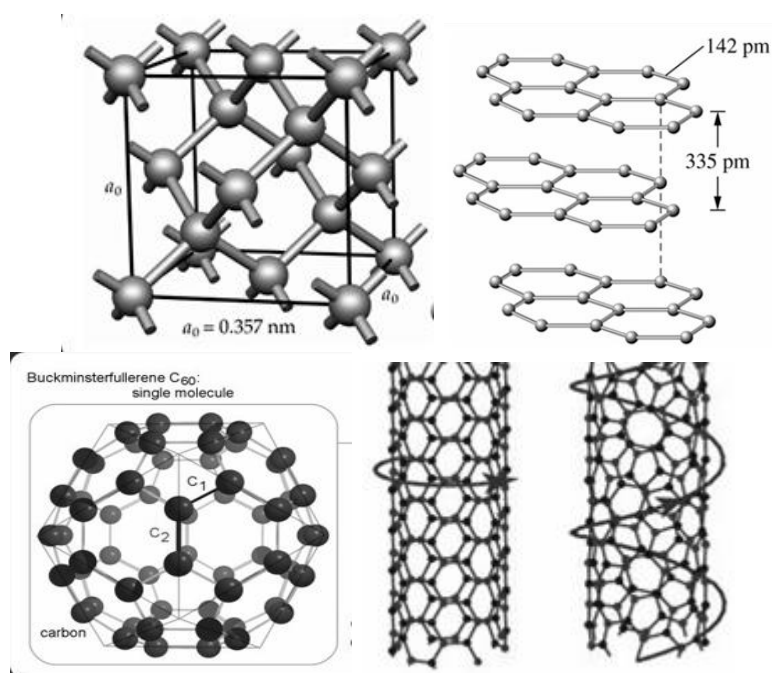
คาร์บอนนาโนทิวบ์(carbon nanotubes) จัดเป็นอีกโครงสร้างอีกชนิดหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเพิ่งค้นพบในปี พ.ศ. 2534 โดยดร.ซูมิโอะ อิชิจิม่า (Dr. Sumioliijima) นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่น ซึ่งปกติแล้วคาร์บอนมีอัญรูปในธรรมชาติ 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. เพชร (diamond) มีโครงสร้างแบบสามมิติ อะตอมของคาร์บอนทุกตัวยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ sp^3 ส่งผลให้เพชรมีโครงสร้างที่แข็งแรงที่สุด

2. แกรไฟต์ (graphite) มีโครงสร้างแบบสองมิติ คือ มีระนาบของคาร์บอนที่ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ซ้อนทับกันไปเป็นชั้นๆ และแต่ละระนาบยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์

3. บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (buckminsterfullerene) หรือบัคกี้บอล (bucky ball) ประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอมที่ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์จนมีลักษณะคล้ายกับลูกบอล

4. คาร์บอนนาโนทิวป์ (carbon nanotube) มีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ คือ มีคาร์บอนอะตอมที่ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ แตกต่างตรงที่คาร์บอนนาโนทิวป์ คือ การม้วนแผ่นแกรไฟต์ให้มีลักษณะคล้ายท่อกลวง

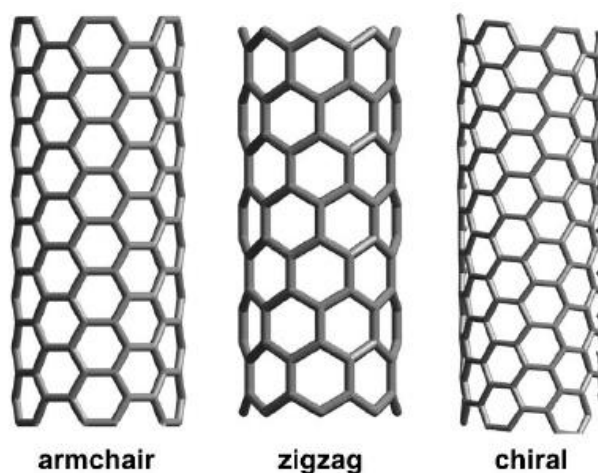


ภาพที่ 2.8 รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนในวัสดุชนิดต่างๆ [15]

2.5.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวป์

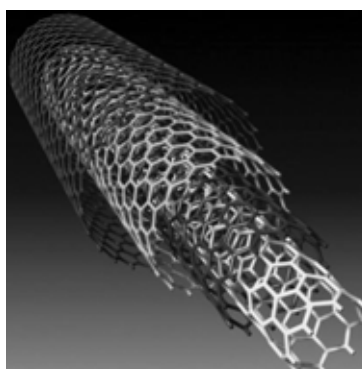
คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะโครงสร้าง คือ

1. คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว (SWCNT) โครงสร้างเกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์เพียงแผ่นเดียวให้เป็นทรงกระบอก ซึ่งการม้วนแผ่นแกรไฟต์สามารถม้วนออกมาได้ 3 ลักษณะ คือ แบบซิกแซก (zigzag) แบบเก้าอี้ (armchair) และแบบไครอล (chiral) ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว [16]

2. คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้น (MWCNT) เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์หลายๆ แผ่นเข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งแผ่นแกรไฟต์แต่ละชั้นจะมีระยะห่างกันประมาณ 0.34-0.36 นาโนเมตร



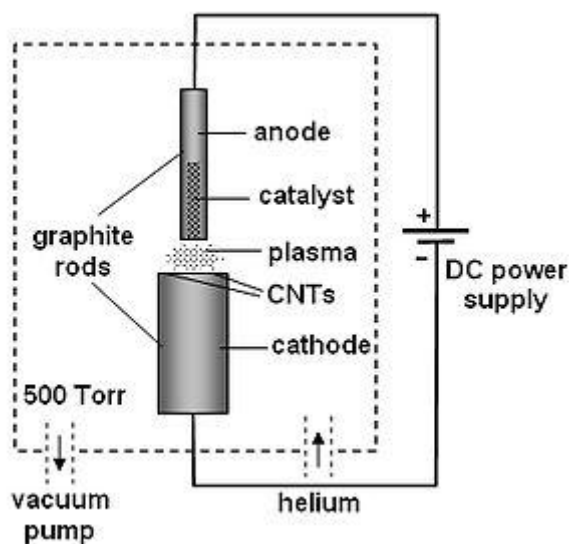
ภาพที่ 2.10 คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้น [17]

2.5.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

การสังเคราะห์และเทคนิคการผลิตในปัจจุบันสามารถจำแนกได้ดังนี้

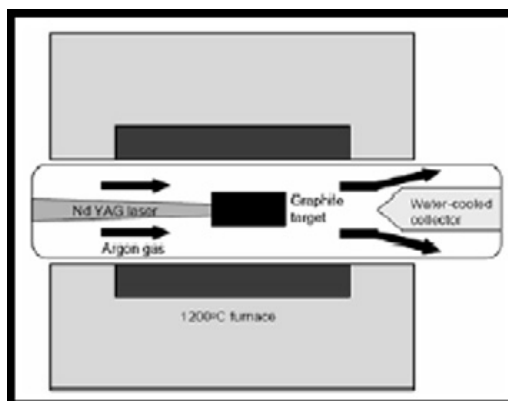
1. วิธีอาร์คดิสชาร์จ (arcs discharge) เป็นวิธีเดียวกับที่ใช้สังเคราะห์ฟูลเลอรีน โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์เข้าไประหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางห่างกันประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.11 และต้องอยู่ภายใต้ภาวะความดันต่ำรวมทั้งมีแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียมหรืออาร์กอนอยู่ด้วย จนเกิดเป็น

ความร้อนสูงจนส่งผลให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวเปลี่ยนเป็นสถานะพลาสมา จากนั้นจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ข้อั้วแคโทดหรือที่บริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า



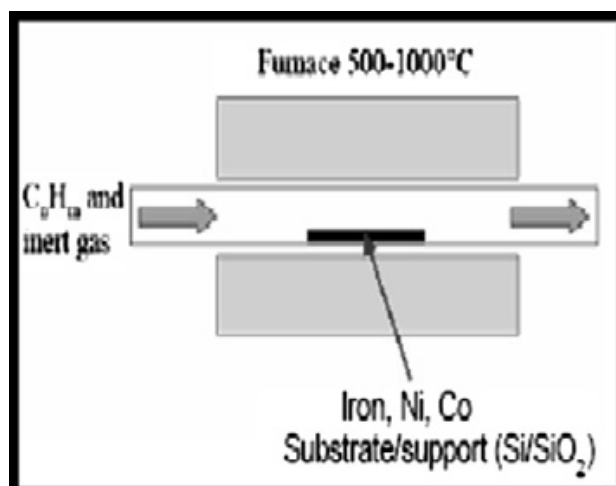
ภาพที่ 2.11 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ [18]

2. วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization) โดยนำแกรไฟต์เข้าไปในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียส จากนั้นใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูง ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ยิงไปที่แกรไฟต์ จะได้คาร์บอนผสมโลหะกลายเป็นไอในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,100 - 1,200 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงใช้ก๊าซ อาร์กอนหรือไนโตรเจนเพื่อทำการส่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ไปหล่อเย็นที่บริเวณเก็บกัก (collector) ที่เป็นส่วนของทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาของวิธีนี้ คือ โคบอลต์และนิกเกิล



ภาพที่ 2.12 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ [14]

3. วิธีการตกสะสมไอสารเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) จัดเป็นเทคนิคที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งหลักการของวิธีนี้ คือ การทำให้สารไอของสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนและตกสะสมบนฐานรองรับ เมื่อไอของสารตั้งต้นไหลผ่านเข้าไปในท่อที่มีความร้อนสูง ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ที่อุณหภูมิหนึ่งจะทำให้ไอของสารตั้งต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์มีเทน และอะเซทิลีน เกิดการแตกตัว และตกสะสมลงบนฐานรองรับ เพื่อสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 500 - 900 องศาเซลเซียสและต้องทำภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก นิกเกิล และ โคบอลต์



ภาพที่ 2.13 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีอาร์คดิซซาร์จ [14]

ซึ่งทั้ง 3 วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถสรุปข้อดี-ข้อเสีย ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

วิธีที่ใช้	ขนาดและลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้		ข้อดี	ข้อเสีย
	SWCNT (nm)	MWCNT(nm)		
อาร์คดิสชาร์จ (Arcs discharge)	- ขนาดสั้น - Ø: 0.6 ~ 1.4 n	- ขนาดสั้น - Ø: (ใน) 1 ~ 3 (นอก) ~ 10	- กระบวนการผลิตทำได้ง่าย - ค่าใช้จ่ายถูก - Defect น้อย	-
ระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser vaporization)	- ขนาดยาว (5 ~ 20) - Ø: 1 ~ 2	-	- ได้ SWNT ที่มี ความบริสุทธิ์สูง - มี Defect น้อย	ค่าใช้จ่ายสูง
ตกสะสมไอสารเคมี (Chemical vapor deposition; CVD)	- ขนาดยาวมาก - Ø: 0.6 ~ 4	- ยาวมาก	- ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWNT ยาวสามารถกำหนดทิศทาง และตำแหน่งได้ - ความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี	-

2.5.3 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

สมบัติทางกายภาพ เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร และมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตร คาร์บอนนาโนทิวบ์จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า มีสมบัติที่แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา และมีค่าความ

หนาแน่นเพียง 1.33-1.40 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ยังเป็นโมเลกุลของคาร์บอน ที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางเซนติเมตร/กรัม มากกว่าคาร์บอนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาถึงสองเท่า ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ดังที่แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุต่างๆ

Material	Young'modulus (GPa)	Tensile Strenght (GPa)	Density (g/cm ³)
Single-walled nanotube	1054	150	1.4
Multi-walled nanotubes	1200	150	2.6
Diamond	600	130	3.5
Kevlar	186	3.6	7.8
Steel	208	1.0	7.8
Wood	16	0.008	0.6

- สมบัติทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic properties) มีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนและต่ำกว่าตัวนำ มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของคาร์บอนนาโนทิวป์สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 A/cm² ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 106 A/cm²

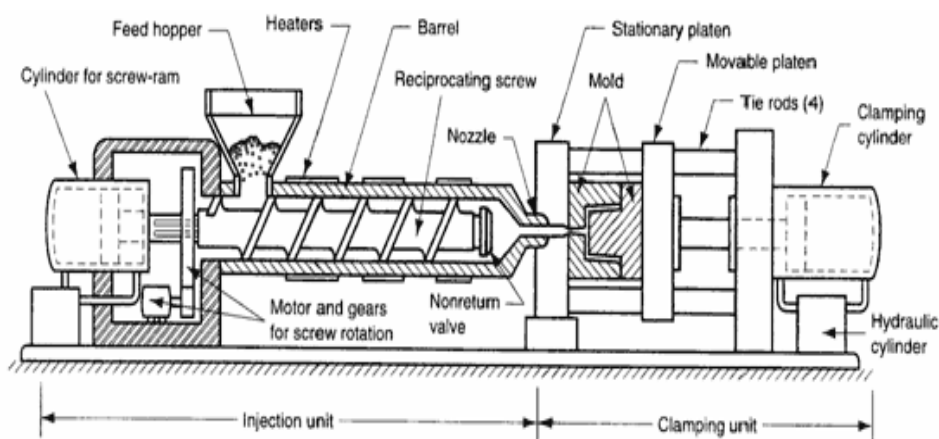
2.6 การฉีดแบบ (Injection) [19-22]

เป็นการฉีดพลาสติกที่ถูกหลอมเข้าไปในแม่แบบ (mold) ที่ประกบกันอยู่ และถูกควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำเพื่อให้พลาสติกหลอมนั้นแข็งตัวได้ ผลิตภัณฑ์จะถูกนำออกมาโดยการเปิดแม่แบบ ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ ส่วนการฉีด (injection unit) และส่วนการยึดแม่แบบ (clamping unit) ดังแสดงในภาพที่ 2.14

โดยส่วนการฉีดจะฉีดหรืออัดพลาสติกหลอมเข้าไปในแม่แบบด้วยความดันสูง เนื่องจากพลาสติกหลอมเหลวมีความหนืดสูง ส่วนที่เป็นส่วนการยึดแม่แบบจะทำการยึดแม่แบบที่ประกบ

กันอยู่ด้วยแรงที่มากพอที่จะไม่ทำให้พลาสติกหลอมดันเปิดแม่แบบหรือเกิดครีบ (flash) ขึ้นที่ผลิตภัณฑ์

การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีดแบบเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีความรวดเร็วในการผลิต ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายลักษณะ อีกทั้งยังมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน ผลิตภัณฑ์ประมาณ 60% ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ผลิตภัณฑ์จะมีน้ำหนักอยู่ในช่วงประมาณ 5 กรัม-90 กิโลกรัม [20]



ภาพที่ 2.14 เครื่องฉีดแบบ [21]

ข้อดีของกระบวนการฉีดแบบ

- เป็นกระบวนการผลิตโดยตรงจากเรซินเป็นผลิตภัณฑ์
- ต้องการการตกแต่งเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย หรือไม่จำเป็น
- สามารถทำระบบการผลิตให้เป็นการทำงานแบบอัตโนมัติได้อย่างสมบูรณ์
- มีความสามารถในการผลิตซ้ำได้ดี
- อัตราการผลิตสูง
- สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีการแทรกวัสดุอื่นร่วมเข้าไปกับพลาสติกได้ [22]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohanty และ Nayak [8] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต พฤติกรรมทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งของ

พอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม และเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 380 เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป พบว่าพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วย 2 เฟส ของหยดเล็กๆ ของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กระจายตัวสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีน และการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตแสดงพีกผ่อนคลาย (relaxation peak) ที่แตกต่างกันของอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และของพอลิโพรพิลีน ตามลำดับ ซึ่งยืนยันถึงการมีโครงสร้าง 2 เฟส

Babu และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาโดย เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน/ ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ พบว่า ผลอันเนื่องมาจากพอลิโพรพิลีนทั้ง 2 ชนิด (ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนและเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์) มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่าง ส่งผลทำให้ทั้งสมบัติเชิงกล พฤติกรรมทางความร้อน และสัณฐานวิทยาแตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์จะมีสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนเหนือกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน สาเหตุเนื่องจากการเกิดผลึกเล็กๆ และการมีอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวที่ตึกกว่าของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กับพอลิโพรพิลีน และนอกจากนี้ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ทางการค้ามีลักษณะเป็นเม็ด (pellets) จึงทำให้ผสมเข้ากับพอลิโพรพิลีนได้ง่ายกว่าอีกด้วย

Zhang และคณะ [23] ได้ศึกษาผลของการใช้ซอร์บิทอลเป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และพอลิโพรพิลีน โดยเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ซึ่งมีสมบัติเป็นยางได้เพิ่มความเหนียวของพอลิโพรพิลีน และทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ความทนแรงดึงและมอดูลัสดัดโค้งลดลง อีกทั้งการใส่สารก่อผลึกประเภทซอร์บิทอลในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ความเหนียวและความแข็งดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นไปพร้อมกัน ซึ่งแสดงถึงสมดุลของสมบัติทั้งสองจากการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และซอร์บิทอล

มินา และคณะ[24] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น ที่เตรียมโดยกระบวนการฉีดแบบ ผลจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความทนแรงดัดโค้ง ยังสัมพันธ์ และความแข็ง มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ แบบผนังหลายชั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการมีแรงยึดเหนี่ยวที่ระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพของการเสริมแรงที่ดีในนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

เฮมมาติ และคณะ[25] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนยางเอทิลีนโพรพีนไดอีน และคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว โดยมีพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารประสาน และใช้กระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดแบบ ผลที่ได้ พบว่า การเติมยางเอทิลีนโพรพีนไดอีน มีผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าลดลง ดังนั้น เมื่อมีการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงไป มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งยังมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถในการเสริมแรงของคาร์บอนนาโนทิวบ์ นอกจากนี้ การเติมสารเชื่อมขวางลงไปยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่ดีขึ้นอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุดิบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.1 วัสดุดิบ

1. พอลิโพรพิลีน (HP500N) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอ็ชเอ็มซี โปลิเมอร์ จำกัด (HMC Polymers Co., Ltd) มีดรรชนีการหลอมไหล 12 g/10min ความหนาแน่น 0.90 g/cm³
2. เติลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Engage™ 8200) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมีคอลอินโนเวชัน จำกัด (Chemical Innovation Co., Ltd.)
3. คาร์บอนนาโนทิวบ์จากบริษัท อี-เอ็ม พาวเวอร์ จำกัด (EM-Power Co., Ltd.)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) รุ่น LabTech type LE25-30C
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Toshiba machine EC 130S (บริษัท เคมีคอล อินโนเวชัน จำกัด)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV
2. เครื่องวิเคราะห์ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Perkin-Elmer รุ่น DSC 7
3. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851°
4. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) ของ Mettler Toledo รุ่น DMA 861°
5. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) ของ LLOYD รุ่น LR100K

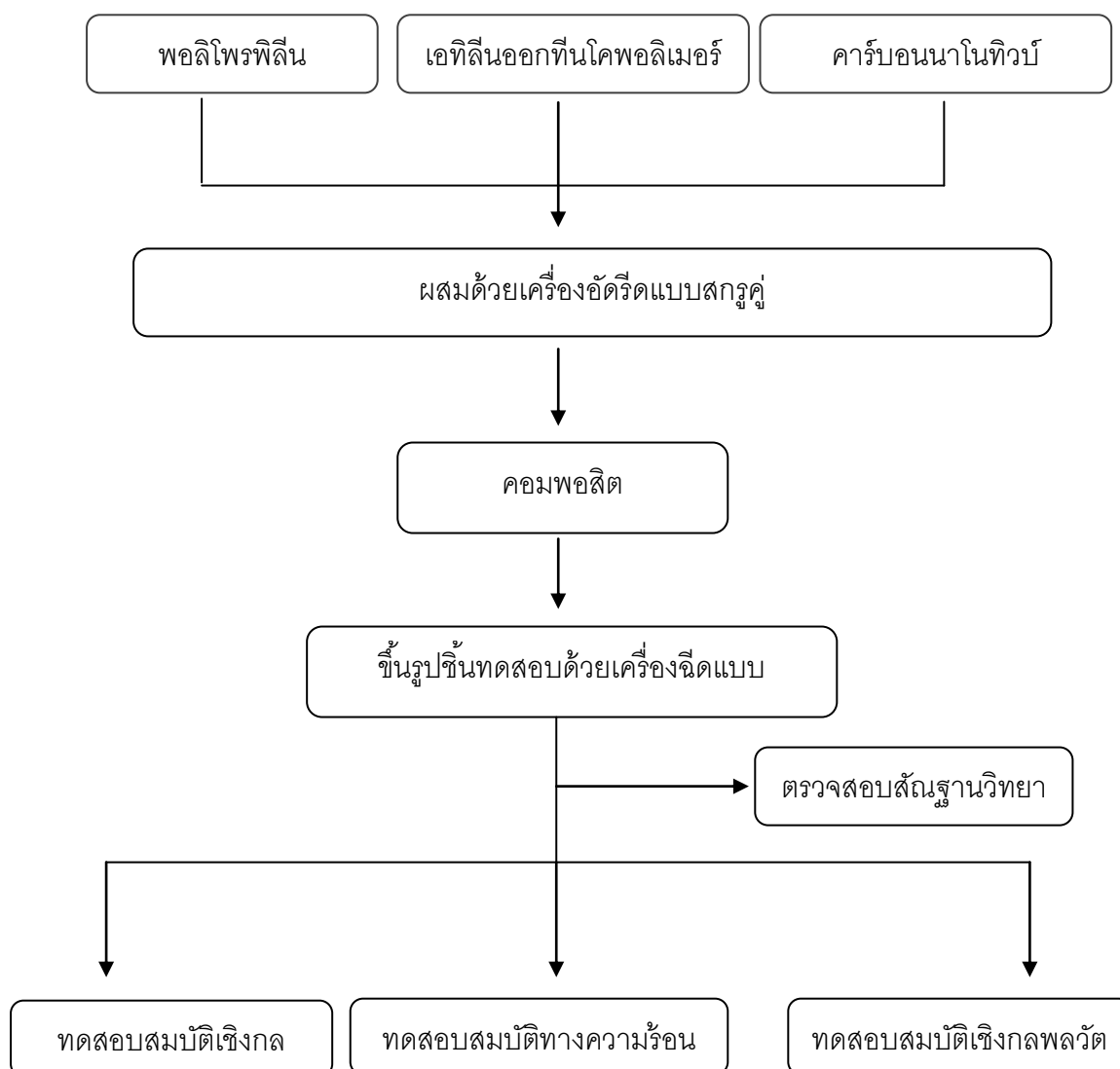
6. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) ของ LLOYD รุ่น 500

7. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact Tester) แบบ Charpy ยี่ห้อ Dynisco รุ่น SIMATIC-OP7

3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแสดงไว้ในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.2 การผสมพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

นำพอลิโพรพิลีน เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และคาร์บอนนาโนทิวบ์มาผสมตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 ทำการเขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผ่านเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (ภาพที่ 3.2) โดยใช้อุณหภูมิในการผสมของโซนต่างๆ ดังนี้ 220, 210, 210, 200 และ 190 องศาเซลเซียส ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 40 รอบต่อนาที แล้วทำการตัดเม็ดเพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นทดสอบต่อไป



ภาพที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (LabTech type LE25-30C)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ใช้เตรียมนานาคอมพอสิต

อัตราส่วนผสม (PP/EOC/CNT)	ปริมาณสารที่ใส่โดยน้ำหนัก (กรัม)		
	PP	EOC	CNT
100/0/0	100	-	-
80/20/0	80	20	-
80/20/0.5	80	20	0.5
80/20/1	80	20	1
80/20/1.5	80	20	1.5
80/20/2	80	20	2
70/30/0	70	30	-
70/30/0.5	70	30	0.5
70/30/1	70	30	1
70/30/1.5	70	30	1.5
70/30/2	70	30	2

3.2.3 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

นำเม็ดพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1 ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (ภาพที่ 3.3) โดยใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และความดัน 50 เมกะปาสคัล



ภาพที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ (Toshiba machine EC 130S)

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

3.3.1 ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod) ยี่ห้อ Dynisco รุ่น SIMATIC-OP7 (ภาพที่ 3.4) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 63x13x3 มิลลิเมตร ที่มีรอยบาก (notch) ภายใต้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักของค้อนเหวี่ยง	1.357	กิโลกรัม
ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุด	100	กิโลกรัม-เซนติเมตร



ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Izod (Dynisco SIMATIC-OP7)

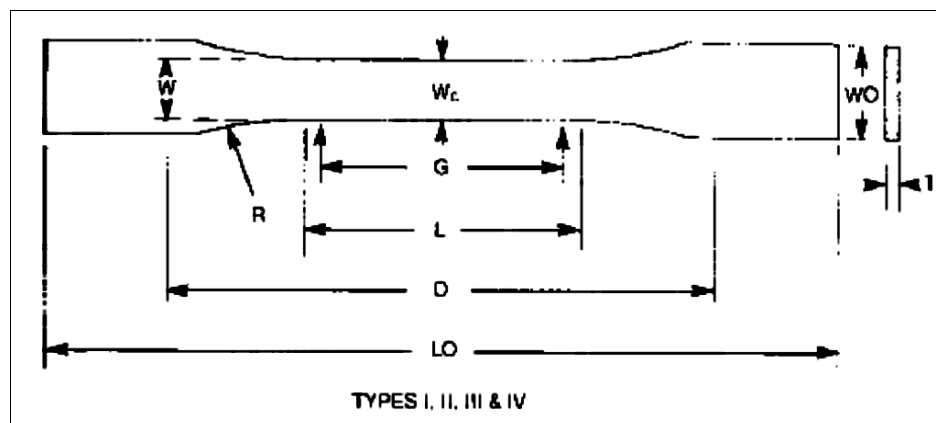
3.3.1 ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K) (ภาพที่ 3.5) โดยใช้ชิ้นทดสอบที่มีรูปร่าง และขนาดดังแสดงในภาพที่ 3.5 และตารางที่ 3.2 ภายใต้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	10	กิโลนิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	50	มิลลิเมตร/นาที



ภาพที่ 3.5 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K)



ภาพที่ 3.6 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง

ตารางที่ 3.2 ขนาดขึ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I

มิติ (มิลลิเมตร)		ความคลาดเคลื่อน
W-Width of narrow section	13	±0.5
L-Length of narrow section	57	±0.5
WO-Width over-all, min	19	+6.4
LO-Length over-all, min	165	no max
G-Gage length	50	±0.25
D-Distance between grips	115	±5
R-radius of fillet	76	±1

3.3.2 ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD 500) (ภาพที่ 3.7) โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	2500	นิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	10	มิลลิเมตร/นาที
ระยะ span	50	มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD 500)

3.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

3.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Perkin-Elmer รุ่น DSC 7 (ภาพที่ 3.8) โดยตัดชิ้นทดสอบพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตเป็นแผ่นวงกลมที่มีน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุใส่ใน DSC Pan ซึ่งน้ำหนักแน่นจนแล้วปิดฉนวน จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยตั้งภาวะการทดสอบดังนี้

1. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที
2. ให้อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. ลดความร้อนจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนถึง 80 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที
4. ให้อุณหภูมิตั้งที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที
5. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที

ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อตรวจสอบหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) โดยวิเคราะห์จากพีการเกิดผลึก และดีกรีของความ เป็นผลึก (degrees of crystallinity, X_c) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนตัวอย่าง

ΔH_f^0 = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนที่มีการเกิดผลึก 100%

โดยในที่นี้ให้ ΔH_f^0 มีค่าเท่ากับ 209 จูลต่อกรัม

ในกรณีที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 80 จะมีเอนทัลปีของพอลิโพรพิลีน

$$\Delta H_f^0 = 209 - \frac{209 \times 20}{100} = 167.2 \text{ จูลต่อกรัม}$$



ภาพที่ 3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Perkin-Elmer, DSC 7)

3.4.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851° (ภาพที่ 3.9) โดยนำชิ้นทดสอบหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครุซีเบิลอะลูมินา โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์จาก 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที และวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลผ่านเท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที



ภาพที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)
(Mettler Toledo, TGA/SDTA 851°)

3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของ Mettler Toledo รุ่น DMA 861° (ภาพที่ 3.10) ในโหมดแรงเฉือน (shear mode) โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด 5x5x2 มิลลิเมตร และใช้ช่วงอุณหภูมิของการวิเคราะห์จาก -80 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 3 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



ภาพที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Mettler Toledo, DMA 861°)

3.6 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV (ภาพที่ 3.12) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ โดยนำชิ้นทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นจึงทำให้เกิดรอยแตก แล้วนำเอาชิ้นงานมายึดติดบนแท่นวางชิ้นงาน ทำการเคลือบผิวด้วยทอง เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้แก่ชิ้นตัวอย่าง และเพื่อป้องกันการเกิดประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2000 และ 5000 เท่า



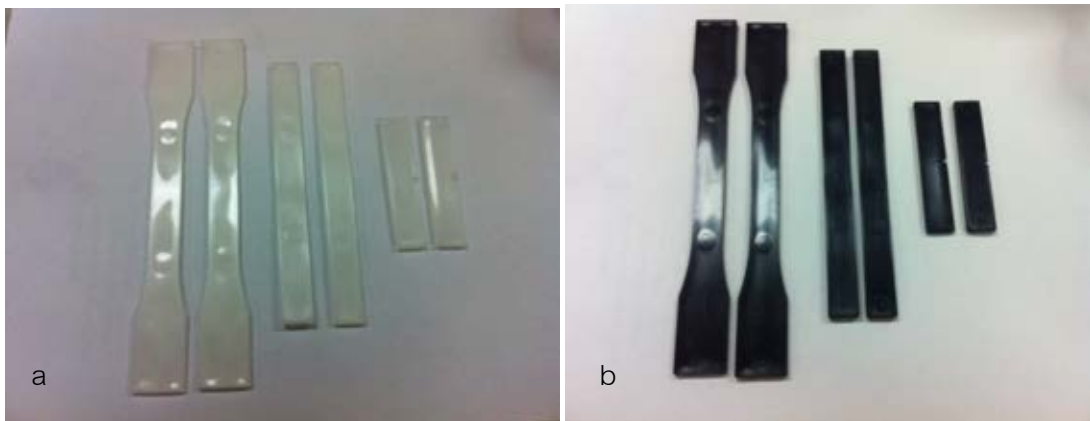
ภาพที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

ชั้นทดสอบที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.1 เตรียมได้จากการนำพอลิโพรพิลีนมาผสมกับเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน แล้วนำไปอัดรีดผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ จากรูปแสดงให้เห็นว่าชั้นทดสอบของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการเติมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ลงไปมีสีความขุ่น และเมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปมีผลทำให้ชั้นทดสอบเป็นสีดำและมีความทึบแสงมากขึ้น

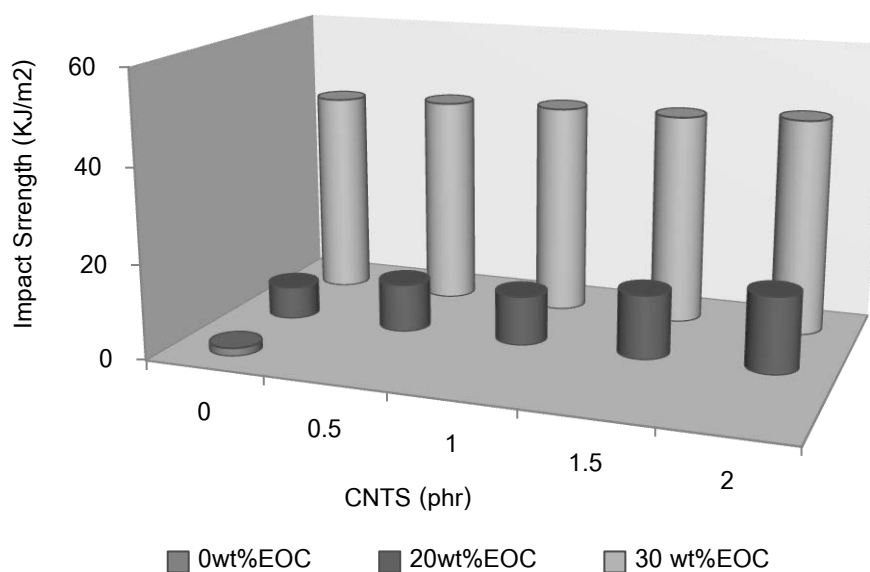


ภาพที่ 4.1 ชั้นทดสอบของ (a) พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และ (b) พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

4.2.1 สมบัติความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงกระแทกแบบไอซอดชนิดที่มีรอยบาก (notched-Izod impact strength) ของ พอลิโพรพิลีน บริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D6110 แสดงไว้ในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

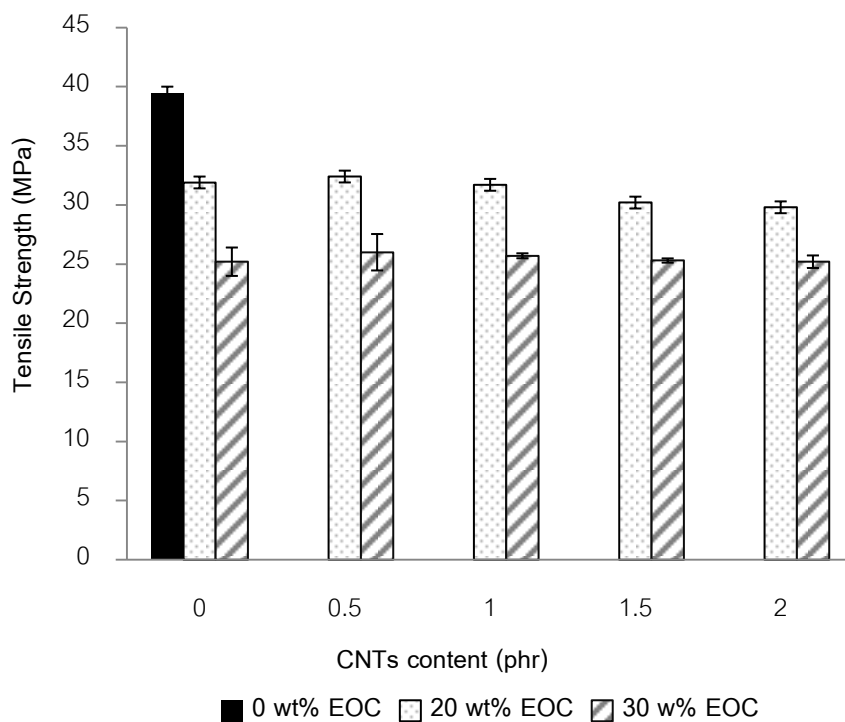
องค์ประกอบ (PP/EOC/CNT)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m ²)
100/0/0	1.7
80/20/0	7
80/20/0.5	10.3
80/20/1.0	10.5
80/20/1.5	13.6
80/20/2.0	16.2
70/30/0	43.7
70/30/0.5	44.5

องค์ประกอบ (PP/EOC/CNT)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m ²)
70/30/1.0	45.0
70/30/1.5	46.1
70/30/2	46.2

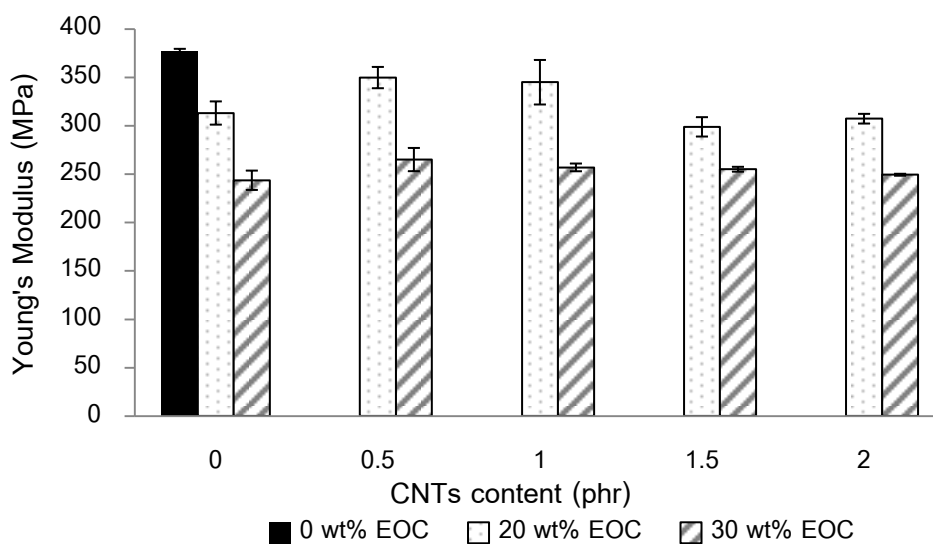
ผลจากการทดสอบในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า การใส่เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เพราะเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเด่น คือ มีความยืดหยุ่นสูง เป็นผลให้สามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้ดี จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสมที่ใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่มีความทนแรงกระแทกมากกว่าพอลิโพรพิลีน บริสุทธิ์ถึง 27 เท่า และเมื่อใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไป พบว่านาโนคอมพอสิตที่ใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความทนแรงกระแทกมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ต่างจากนาโนคอมพอสิตที่ใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะสามารถกระจายตัวอยู่ในเฟสของยางได้ดีกว่า ดังนั้นนาโนคอมพอสิตที่ใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 จะมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่สูงกว่า ส่งผลให้สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกได้ดีกว่า

4.2.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง

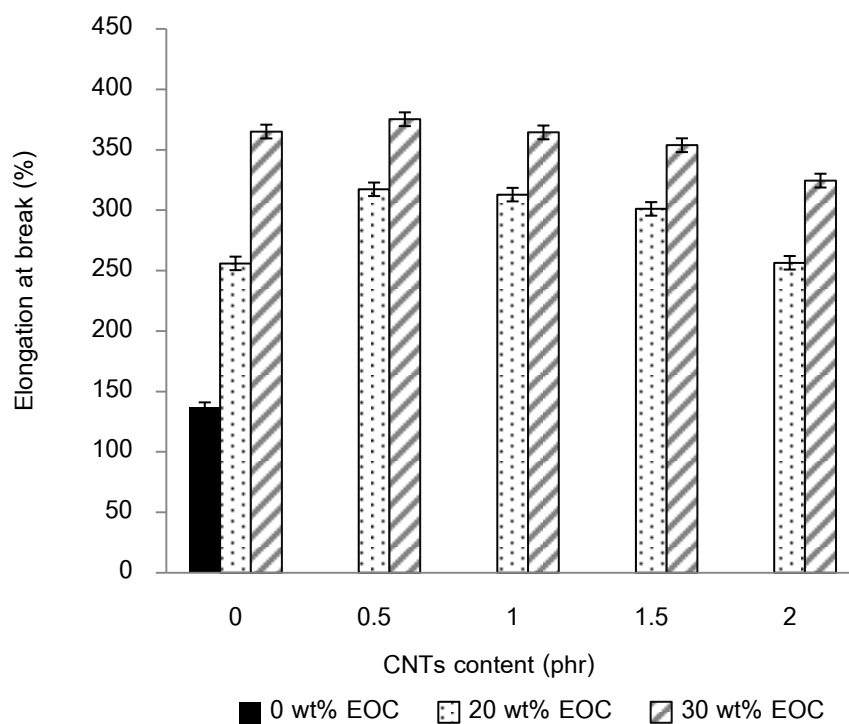
ผลการทดสอบหาความทนแรงดึง ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I แสดงไว้ในภาพที่ 4.3-4.5 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.3 ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทีดีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทีดีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต



ภาพที่ 4.4 ยั่งส์มอดุลัสของของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทีดีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทีดีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต



ภาพที่ 4.5 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.2 สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/
เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอน
นาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/EOC/CNT)	ความทนแรงดึง (MPa)	ย้งส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
100/0/0	39.4	377.2	136.8
80/20/0	31.9	313.0	256.0
80/20/0.5	32.4	349.6	317.3
80/20/1.0	31.7	344.8	312.9
80/20/1.5	30.2	298.7	301.1
80/20/2.0	29.8	307.1	256.5
70/30/0	25.2	243.5	365.1
70/30/0.5	26.0	264.9	375.3
70/30/1.0	25.7	256.8	364.4
70/30/1.5	25.3	254.9	353.8
70/30/2.0	25.2	249.2	324.5

จากภาพที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีความทนแรงดึงเท่ากับ 39.4 MPa การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ความทนแรงดึงมีค่าลดลงเหลือ 31.9 และ 25.2 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและมีความทนแรงดึงต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน ดังนั้น เมื่อผสมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เข้าไปในพอลิโพรพิลีนจึงมีผลทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงมากขึ้นตามปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม 80/20 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่ใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณ 0.5 phr มีค่าสูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และมีค่าต่ำกว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะกลุ่มของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก จึงทำให้การกระจายตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง สำหรับความทนแรงดึง

ของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม 70/30 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีน ออกทีนโคพอลิเมอร์มีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมเล็กน้อย เมื่อใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไป โดย ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่ใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณ 0.5 phr มีค่าสูงที่สุด เช่นเดียวกัน และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการ เกาะกลุ่มของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

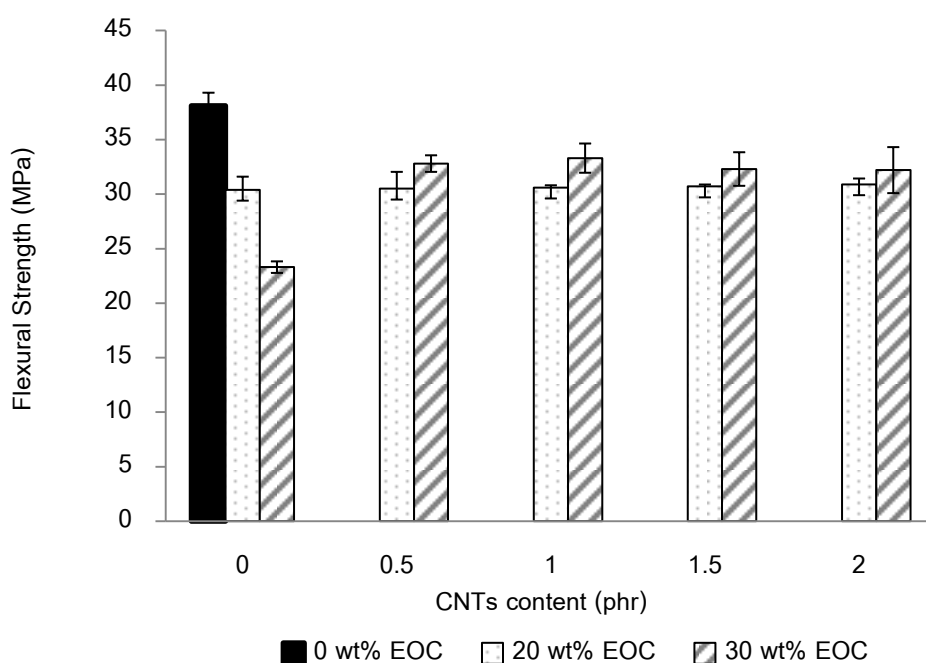
จากภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มียังส์มอดุลัสเท่ากับ 377.2 MPa การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ ยังส์มอดุลัสมีค่าลดลงเหลือ 313.0 และ 243.5 MPa ตามลำดับ เนื่องจากเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งอาจมีผลทำให้ระดับความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลงดังนั้นเมื่อผสมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เข้าไปในพอลิโพรพิลีนจึงมีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีความแข็งตึงและเสถียรภาพเชิงขนาด (dimensional stability) ลดลงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณ 0.5 และ 1 phr เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ มีผลทำให้ ยังส์มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากเกาะกลุ่มของคาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่เมื่อพิจารณา นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม 70/30 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ พบว่า ยังส์มอดุลัสของนาโนคอมพอสิตที่ใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม โดยที่ใส่ ปริมาณ 0.5 phr มีค่าสูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เพิ่มขึ้น หากแต่ยังมีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งอาจเป็นเพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถกระจายตัว ได้ดีในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มากกว่า

จากภาพที่ 4.5 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีการยืดตัว ณ จุดขาด ร้อยละ 136.8 การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 256 และ 356.1 ตามลำดับ เนื่องจากเอทิลีนออก ทีนโคพอลิเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้น เมื่อผสมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เข้าไป ในพอลิโพรพิลีน จึงมีผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ ของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณา นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ ผสม 80/20 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของนาโน คอมพอสิตที่ใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม โดยที่ใส่ปริมาณ 0.5 phr มีค่าสูง ที่สุด และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากเกาะกลุ่มของคาร์บอน

นาโนทิวบ์ อีกทั้งนาโนคอมพอสิตที่ใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก การยืดตัว ณ จุดขาด มีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ต่างจากนาโนคอมพอสิตที่ใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะสามารถกระจายตัวอยู่ในเฟสของยางได้ดีกว่า ดังนั้นนาโนคอมพอสิตที่ใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 จะมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่สูงกว่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง

ผลการทดสอบหาความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตตามมาตรฐานASTMD790 แสดงไว้ในภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.6 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.3 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/
คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/EOC/CNT)	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)
100/0/0	38.1
80/20/0	30.4
80/20/0.5	30.5
80/20/1.0	30.6
80/20/1.5	30.7
80/20/2.0	30.9
70/30/0	23.3
70/30/0.5	32.8
70/30/1.0	33.3
70/30/1.5	32.3
70/30/2.0	32.2

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 38.1 MPa การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงเท่ากับ 30.4 และ 23.3 ตามลำดับ เนื่องจากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้น เมื่อผสมเข้าไปในพอลิโพรพิลีนจึงมีผลทำให้ขึ้นทดสอบมีความต้านทานการโค้งงอเมื่อถูกกดลดลงตามปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณานาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม 70/30 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าของพอลิเมอร์ผสมอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปเพิ่มความแข็งแรงดึงให้วัสดุของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า

4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และ

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

4.3.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรี

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพลีเอทิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรีเพื่อศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีความเป็นผลึก (X_c) แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรี

องค์ประกอบ (PP/EOC/CNT)	อุณหภูมิ หลอมเหลว($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิการเกิด ผลึก ($^{\circ}\text{C}$)	ดีกรีความเป็นผลึก (%)
100/0/0	161	109	58.9
80/20/0	162	110	42
80/20/0.5	164	116	40.4
80/20/1.0	163	117	37.8
80/20/1.5	164	118	35.7
80/20/2.0	162	118	35.3
70/30/0	160	111	36.1
70/30/0.5	162	115	34.1
70/30/1.0	161	116	37.0
70/30/1.5	163	116	36.3
70/30/2.0	162	118	40.0

ตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 161 องศาเซลเซียส การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักใน

พอลิไพร์ฟีน มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีค่าเท่ากับ 162 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน หากแต่เมื่อใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมแต่ละอัตราส่วนพบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์บางส่วนได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก และช่วยให้พอลิไพร์ฟีนเกิดผลึกได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ดีกรีความเป็นผลึกของพอลิไพร์ฟีนทั้งในพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลงจากการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นอสัณฐานเข้าไป ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Babu และคณะ [8]

4.3.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส เพื่อหาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิไพร์ฟีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิไพร์ฟีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิไพร์ฟีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต โดยทำการตรวจสอบอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$) และอุณหภูมิการสลายตัวร้อยละ 50 ($T_{50\%}$) ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

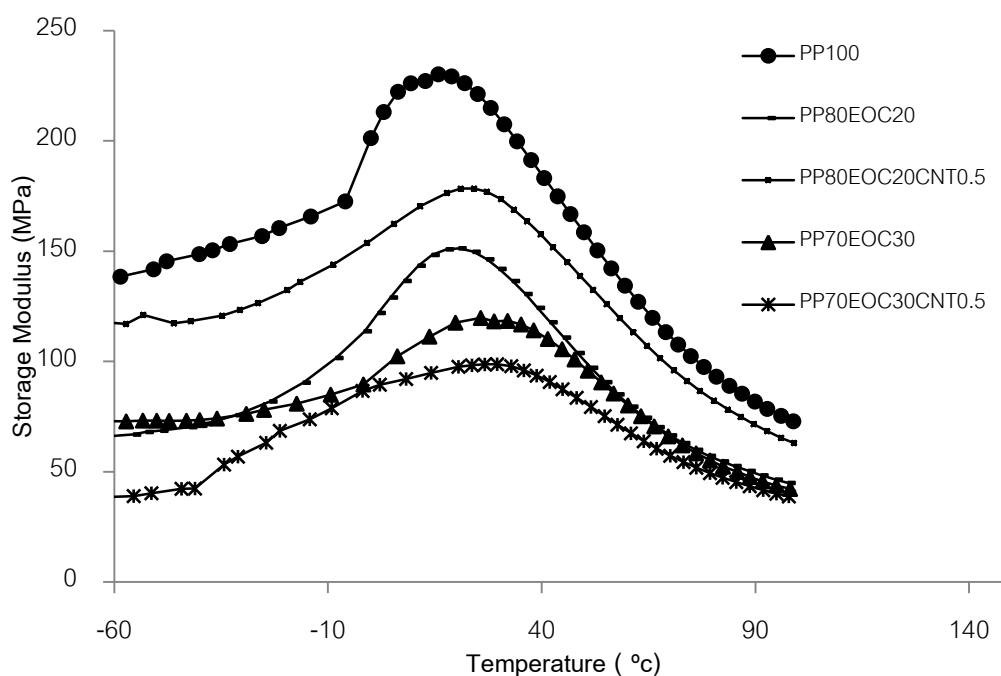
ตารางที่ 4.5 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

องค์ประกอบ (PP/EOC/CNT)	T _{onset} (°C)	T _{end set} (°C)	T _{50%} (°C)
100/0/0	446.9	480.2	460.7
80/20/0	447.4	481.7	460.4
80/20/0.5	452.0	482.6	463.6
80/20/1.0	452.5	482.7	463.7
80/20/1.5	452.6	482.9	463.8
80/20/2.0	452.7	483.1	463.9
70/30/0	449.4	482.5	462.2
70/30/0.5	451.5	483.6	464.2
70/30/1.0	452.3	483.8	464.4
70/30/1.5	454.1	483.9	464.5
70/30/2.0	454.8	483.9	464.9

ตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนเล็กน้อย หากแต่เมื่อใส่คาร์บอนนาโน-ทิวบ์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากการที่อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว มีค่าสูงขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีประสิทธิภาพในการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ ถึงแม้ว่าจะใส่ในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม

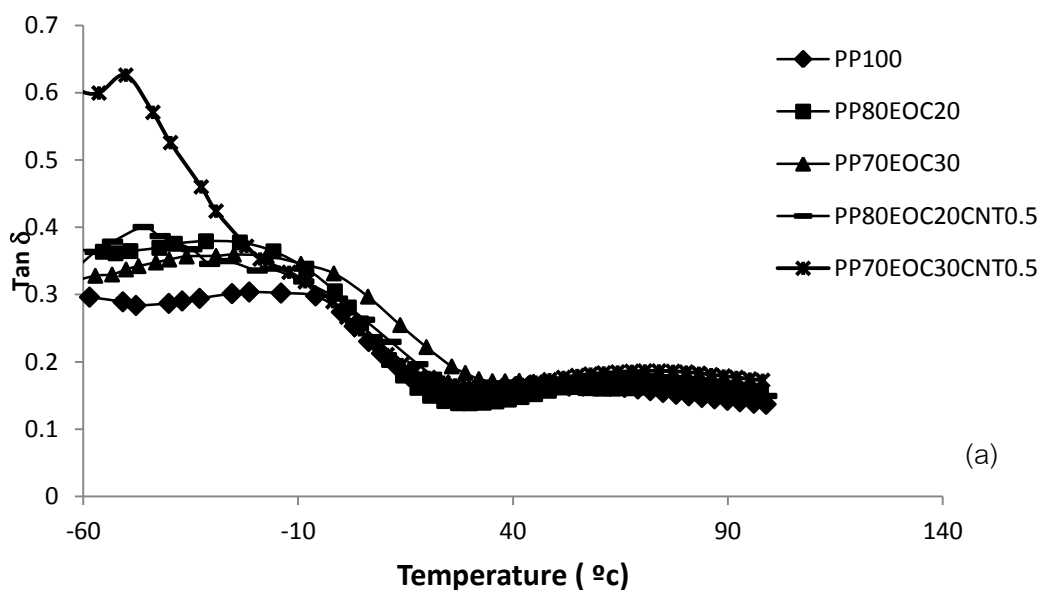
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิต ภายใต้โหมดแรงเฉือนในช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 100 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus, E') และแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$) แสดงไว้ในภาพที่ 4.7 และภาพที่ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพที่ได้จากภาพที่ 4.8 แสดงไว้ในตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.7 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

จากภาพที่ 4.7 พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ขึ้นทดสอบมีมอดุลัสสะสมลดลงตามปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น และการใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลทำให้มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นอีกด้วย



ภาพที่ 4.8 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

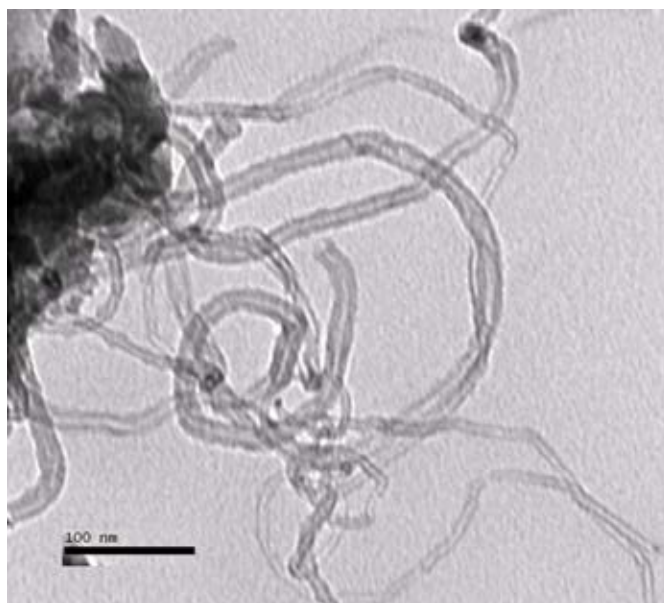
องค์ประกอบ (PP/EOC/CNT)	T_{γ} (°C)	T_{β} (°C)	T_{α} (°C)
100/0/0	-33	6.1	58
80/20/0	-	-31	64
80/20/0.5	-	-40	83
70/30/0	-	-35	79
70/30/0.5	-	-42	85

จากภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.6 พบว่า พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์แสดงพีคแทนเจนต์สูญเสีย 3 แห่ง คือที่ -33 (T_{γ}), 6.1 (T_{β}) และ 58 (T_{α}) องศาเซลเซียส โดย T_{β} คือ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของส่วนที่เป็นออสซิลฐานในเมทริกซ์ ขณะที่ T_{α} สัมพันธ์กับกลไกการเลื่อนโมเลกุลในเฟสที่เป็นผลึก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิหลอมเหลว ส่วน T_{γ} นั้นเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวของหมู่สายโซ่เล็กๆ เช่น เมทิล (methyl) และเมทิลีน (methylene) [8] ซึ่งการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงเข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีน ลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (-53 องศา

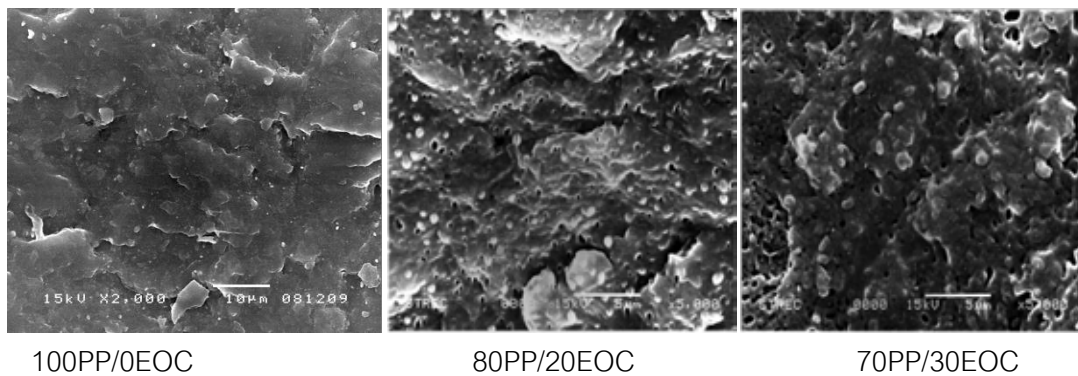
เซลเซียส) และมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นตามปริมาณเอทิลีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลง ในทำนองเดียวกัน การใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนลดลง แต่ทำให้ T_g มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เพิ่มขึ้น เพราะอนุภาคของคาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปขัดขวางกลไกการเลื่อนโมเลกุลในเฟสที่เป็นผลึกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

4.5 สัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

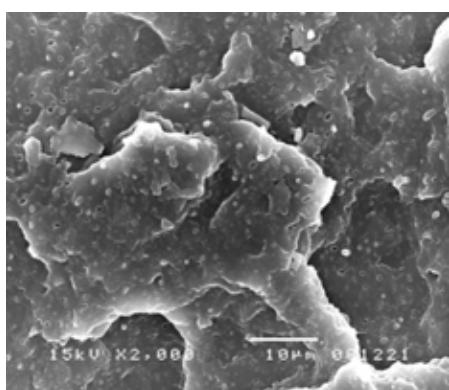
ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงไว้ในภาพที่ 4.8 และภาพสัณฐานวิทยาของบริเวณรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงไว้ในภาพที่ 4.9 และ 4.10



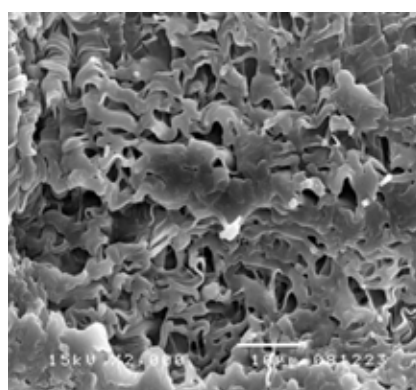
ภาพที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



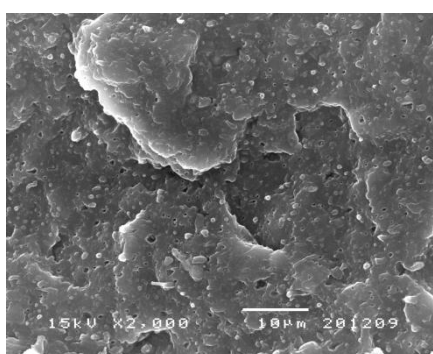
ภาพที่ 4.10 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกไซด์ในโคพอลิเมอร์ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



80PP/20EOC/0.5CNT



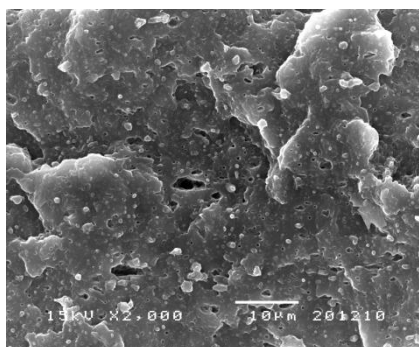
70PP/30EOC/0.5CNT



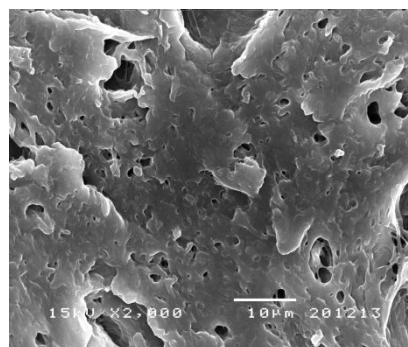
80PP/20EOC/1CNT



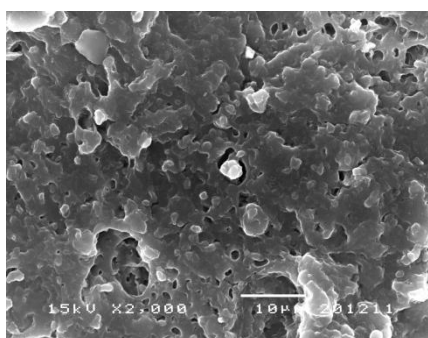
70PP/30EOC/1CNT



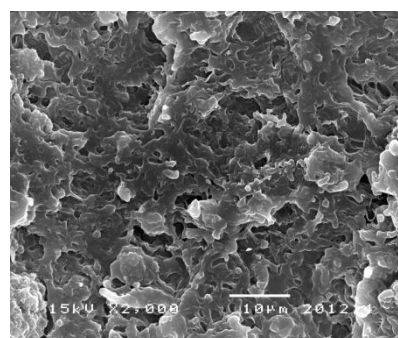
80PP/20EOC/1.5CNT



70PP/30EOC/1.5CNT



80PP/20EOC/2CNT



70PP/30EOC/2CNT

ภาพที่ 4.11 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์คอมพอสิต ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

ภาพที่ 4.10 และ ภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่เปราะ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมแสดงอนุภาคของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ ยังพบเห็นรูขนาดเล็กที่เกิดจากการหลุดออกของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีความหยาบมากกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงถึงรอยแตกหักของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาศมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์นาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ กัน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงดึง และยังมีมอดุลัสมีค่าลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมทำให้พอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่ได้มีมอดุลัสเพิ่มขึ้นโดยไม่ได้ทำให้ความยืดหยุ่นเสียไปมากนัก

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ซึ่งการใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้พอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตมีความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น แต่ยังมีค่าต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

5.1.3 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.4 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสเปกโทรสโกปี พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีนไม่มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนแปลง และอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไป นอกจากนี้ ปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลงเล็กน้อยเมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เข้าไป และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิเมอร์ผสม

5.1.5 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีนมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนเล็กน้อย โดยอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้น

5.1.6 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลงตามปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใส่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิเมอร์ผสมกลับมีผลทำให้มอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และคาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนลดลง

5.1.7 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ แสดงถึงรอยแตกหักของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดอื่น

5.2.2 ทดลองใช้สารประสานเพื่อให้พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่ได้มีความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

5.2.3 ทดลองใช้สารตัวเติมประเภทอื่นร่วมด้วยเพื่อเสริมสมบัติที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง

5.2.4 เปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นวิธีอื่น

รายการอ้างอิง

- [1] หฤทภาค กীরติเสรี ด้ตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสารมก. 70 (พฤศจิกายน 2552- มกราคม 2553) : 1-32.
- [2] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ [Online]. 2010. Available from : http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=169&Itemid=178 [2011, March 7].
- [3] สุชาดา จงประกอบกิจ. การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการแบบสารละลายเพื่อใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมในพอลิโพรพิลีน/พอลิเอไมด์ 6. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548
- [4] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร . สมบัติของพอลิเมอร์ , กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545
- [5] Mohanty S. and Nayak S.K. Dynamic-Mechanical and Thermal Characterization of Polypropylene/Ethylene-Octene Copolymer Blend. Journal of Applied Polymer Science 104 (2007) : 3137-3144.
- [6] Carriere C.J. and Silvis H.C. The Effect of Short-Chain Branching and Comonomer Type on the Interfacial Tension of Polypropylene-Polyolefin Elastomer Blends. Journal of Applied Polymer Science 66-(1997) : 1175-1181
- [7] Guimaraes, M.J.O.C., Coutinho F.M.B., Farah M and Bretas R.E.S. Effect of Molecular Weight and Long Chain Branching of Metallocene Elastomers on the Properties of High Density Polyethylene Blends. Polymer Testing 22 (2003) : 843-847
- [8] Babu R.R., Singha N.K., and Naskar K. Interrelationships of Morphology, Thermal and Mechanical Properties in Uncrosslinked and Dynamically Crosslinked PP/EOC and PP/EPDM Blends. Express Polymer Letter 4(2010) : 197-209

- [9] Adhikari R., Godehardt R., Lebek W. and Michler G.H. Blends of High Density Polyethylene and Ethylene/1-Octene Copolymers: Structure and Properties. Journal of Applied Polymer Science 103(2007) : 1887-1893
- [10] Silva A.L.N.D. Rocha M.C.G., Coutinho F.M.B. and Bretas R., Rheological, Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Polypropylene/Ethylene-Octene Copolymer Blends. Journal of Applied Polymer Science 75 (2000) : 692-704
- [11] Technical Information. ENAGE 8200 Polyolefin Elastomer. Los Angeles : The Dow Chemical Company, 2008.
- [12] พิไลลักษณ์ พิทยอภิพล และภคณมน หงวนไธสง. การเตรียมคอมพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีน/ทัลก์/แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟต.โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [13] R.T. Vanderbilt Company. Mineral Fillers for Rubber and Plastics [Online]. Available from:<http://www.rtvanderbilt.com/FillersIntroWeb.pdf> [2011, March 9]
- [14] Ahmad A., Kholoud M.M., Abou E., Reda A.A. Ammar C., Abdulrahman A. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure,synthesis and characterization. Arabian Journal of Chemistry 5 (2012) : 1-23
- [15] Nano Technology. โครงสร้างที่ต่างกัน [Online]. 2008. Available from : <http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g35/web4.htm> [2012, May 7]
- [16] Polymer and Nanomaterials Characterization Home Page. Carbon Nanotube Composites [Online]. 2008. Available from:<http://coecs.ou.edu/Brian.P.Grady/nanotube.html> [2012, May 7]
- [17] Turbo squid. Multiwall Carbon nanotube [Online]. 2012. Available from : <http://www.turbosquid.com/3d-models/multiwalled-carbon-nanotube-3ds/363229> [2012, May 7]

- [18] Wikipedia. ท่อนาโนคาร์บอน [Online]. 2012. Available from : <http://th.wikipedia.org/wiki/ท่อนาโนคาร์บอน> [2012, May 14]
- [19] มัณฑนา โอภาประกาศิต. Polymer Processing. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาการกระบวนการผลิตพอลิเมอร์. 2550.
- [20] เจริญ นาคะสุวรรณค์. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์นิติธรรม, 2542.
- [21] PlasticTech. Injection Molding Machine and Tolling [Online]. 2012. Available from : <http://www.plasticstech.info/equipment/injection-molding-machine> [2011, March 9]
- [22] รัชณา สิริสุข. Injection Molding. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาการกระบวนการผลิตพอลิเมอร์. 2550
- [23] Zhang X., Xie F., Pen Z., Zhang Y. , Zhou W. Effect of nucleating agent on the structural and properties of polypropylene/poly(ethylene-octene) blends. European Polymer Journal, 38(2002) : 1-6.
- [24] Mina M.F., Haque M.A., Bhuiyan M.K.H., Gafur M.A., Tamba Y., Asano T. Structural, Mechanical and thermal studies of double-molded isotactic polypropylene nanocomposites with multiwalled carbon nanotubes. Journal of Applied Polymer Science. 118 (2010) : 312-319.
- [24] Hemmati M., Narimani A., Shariatpanahi H., Fereidoon A., Ghorbanzadeh Ahangari M. Study on Morphology, Rheology and Mechanical Properties of Thermoplastic Elastomer Polyolefin (TPO)/Carbon Nanotube Nanocomposites with Reference to the Effect of Polypropylene-grafted-Maleic Anhydride (PP-g-MA) as a Compatibilizer. International Journal of Polymeric Materials. 60 (2011) : 384–397

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วัตถุดิบและลักษณะชิ้นงานนาโนคอมพอสิต

1. วัตถุดิบที่ใช้



ภาพ ก-1 โพลีโพรพิลีน (HP500N)

ภาพ ก- 2 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์
(Engage™ 8200)

ภาพ ก-3 คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น

2. ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่



ภาพ ก-4 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์ ที่เตรียมได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่



ภาพ ก-5 พอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่เตรียมได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

3. ลักษณะของชิ้นงานที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดแบบ



ภาพ ก-6 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ ที่ได้จากการขึ้นภาพด้วยเครื่องฉีดแบบ



ภาพ ก-7 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ได้จากการขึ้นภาพด้วยเครื่องฉีดแบบ

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ตาราง ข-1 ค่าความทนแรงกระแทก

(PP/EOC/CNT)	Impact strength (kJ/m ²)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	1.5	1.6	1.8	2	2.1	1.8	0.2
80/20/0	6	6.9	6.6	5.6	6.9	6.4	0.6
80/20/0.5	11	8	9.9	10.9	9.7	9.9	1.4
80/20/1	9.9	8.8	10.9	10.5	13.9	10.8	0.9
80/20/1.5	14.3	13.9	13.7	12.8	13.3	13.6	0.6
80/20/2	14.5	15.1	15.9	16.1	16.4	15.6	0.7
70/30/0	40.9	41.1	42.9	42.5	41.1	41.7	1.0
70/30/0.5	42.3	42.1	42.9	41.7	42.5	42.3	0.5
70/30/1	44.9	43.5	44	45.3	44.8	44.5	0.8
70/30/1.5	45.3	45	45.7	45.5	43.5	45	0.3
70/30/2	46.1	46	45.6	45.9	46	46.2	0.2

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ตาราง ค-1 ค่าความทนแรงดึง

(PP/EOC/CNT)	Tensile strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	38.5	39	38.7	40.2	40.6	39.4	0.9
80/20/0	31.7	31.2	31.6	32.4	32.6	31.9	0.6
80/20/0.5	32.3	32	33.1	31	33.6	32.4	1.0
80/20/1	32	31.5	31.8	30.9	32.3	31.7	0.5
80/20/1.5	29.9	30.5	29.8	30.5	30.3	30.2	0.3
80/20/2	28.9	29.5	30.5	30.2	29.9	29.8	0.6
70/30/0	25.4	25.5	24.9	25.2	25	25.2	0.3
70/30/0.5	25.9	26.5	25.5	25.8	26.3	26	0.4
70/30/1	25.6	25.9	26.2	25.4	25.4	25.7	0.3
70/30/1.5	25	24.9	24.8	25.2	26.6	25.3	0.7
70/30/2	24.9	24.8	25.2	25.5	25.6	25.2	0.4

ตาราง ค-2 ค่ายังส์มอดุลัส

(PP/EOC/CNT)	Tensile modulus (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	375.4	380.2	381.4	378.5	370.5	377.2	0.5
80/20/0	310.9	311.5	314.5	315.6	312.5	313.0	0.9
80/20/0.5	348.5	350.6	351	347.8	350.1	349.6	0.5
80/20/1	342.5	345.2	344.6	346.7	345.0	344.8	0.3
80/20/1.5	295.6	298.6	295.9	299.2	304.2	298.7	0.6
80/20/2	310.5	311.4	305.5	306.6	301.65	307.13	0.2
70/30/0	245.4	244.3	242.0	245.7	240.1	243.5	0.4
70/30/0.5	263.5	266.3	265.8	266.7	262.2	264.9	0.3
70/30/1	254.5	255.5	257.8	252.6	263.6	256.8	0.7
70/30/1.5	252.3	253.3	255.9	256.4	256.6	254.9	0.3
70/30/2	245.9	250.2	249.8	250.8	249.3	249.2	3.9

ตาราง ค-3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด

(PP/EOC/CNT)	Elongation @ Break (%)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	135.9	140.2	139.6	135.4	132.9	136.8	2.5
80/20/0	255.9	253.6	260.8	265.3	244.4	256	5.2
80/20/0.5	320.5	325.3	310.9	315.8	314	317.3	6.2
80/20/1	315.7	310.8	320.9	322	295.1	312.9	5.2
80/20/1.5	296.7	305.2	298	309.1	296.5	301.1	5.9
80/20/2	255.9	250.7	252.9	260.5	262.5	256.5	4.2
70/30/0	370.5	366.7	360.3	365.9	362.1	365.1	4.2
70/30/0.5	377.8	380.5	370.8	380.1	367.3	375.3	4.5
70/30/1	370.5	367.2	365.7	362.5	356.1	364.4	3.3
70/30/1.5	352.9	350.7	360.3	355.9	349.2	353.8	4.2
70/30/2	315.7	320.9	325.6	329.7	330.6	324.5	6.0

ภาคผนวก ง

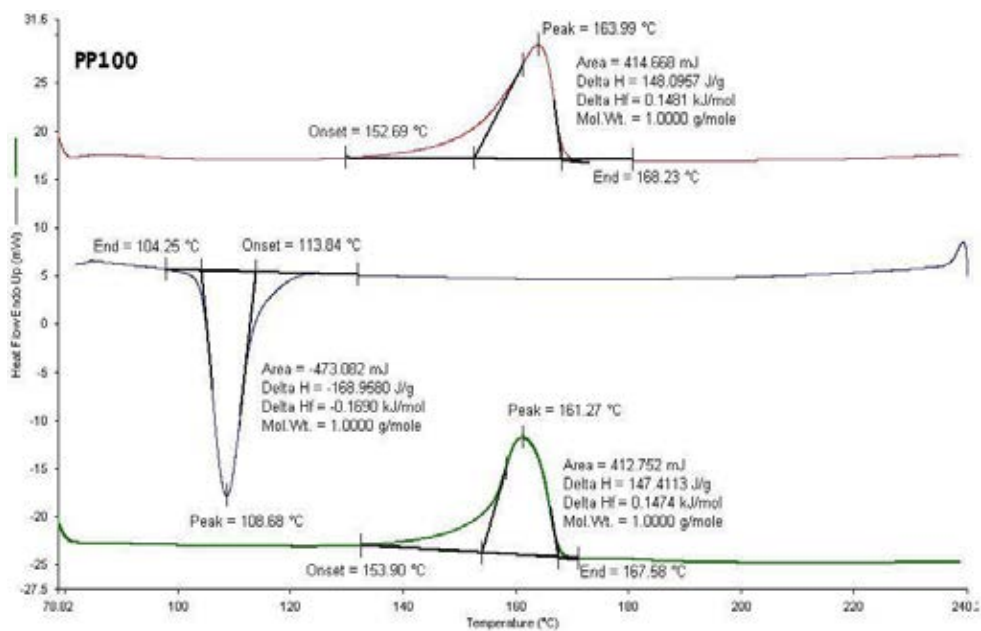
ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ตาราง ง-1 ค่าความทนแรงดัดโค้ง

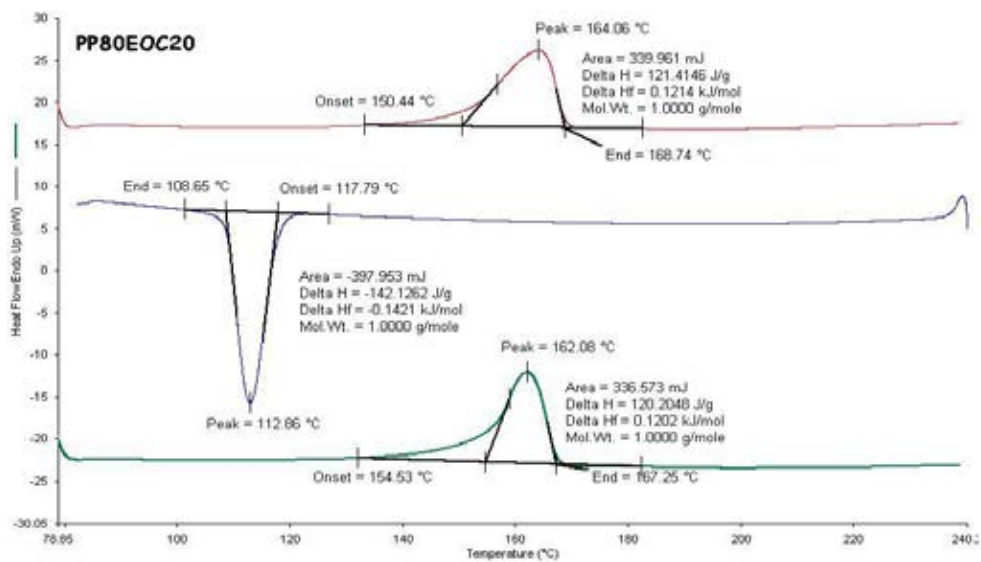
(PP/EOC/CNT)	Flexural strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	39.5	39.9	38.9	39.2	39.5	39.4	39.5
80/20/0	32.7	32	31.5	31.6	31.7	31.9	32.7
80/20/0.5	32.7	31.9	32.6	31.9	32.9	32.4	32.7
80/20/1	31.5	32	31.7	31.8	31.5	31.7	31.5
80/20/1.5	30.5	29.8	30.2	30.5	30	30.2	30.5
80/20/2	29.7	29.5	30.1	29.9	29.8	29.8	29.7
70/30/0	25.4	25.9	24.8	24.9	25	25.2	25.4
70/30/0.5	25.9	26.8	25.7	26.2	25.4	26	25.9
70/30/1	25.6	25.9	25.5	25.7	25.8	25.7	25.6
70/30/1.5	25.2	25.7	25.2	25	25.4	25.3	25.2
70/30/2	24.9	24.8	25.3	25.4	25.6	25.2	24.9

ภาคผนวก จ

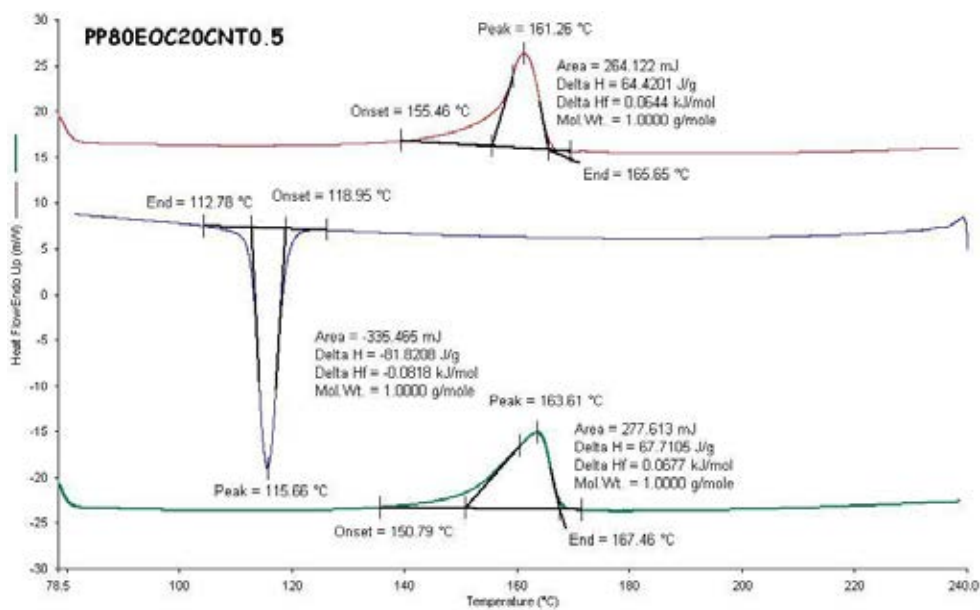
ผลทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



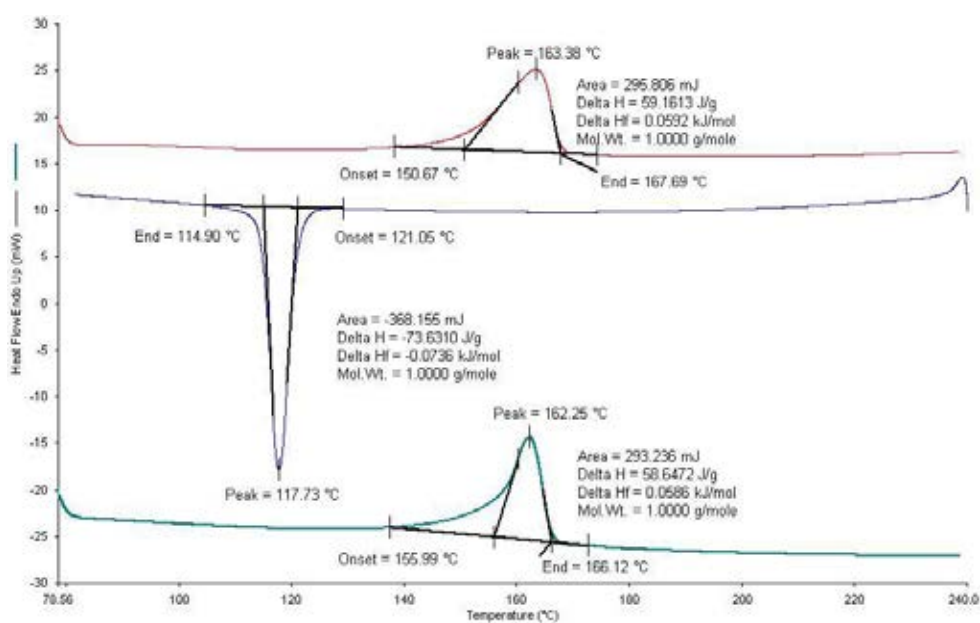
ภาพ จ-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 100/0/0



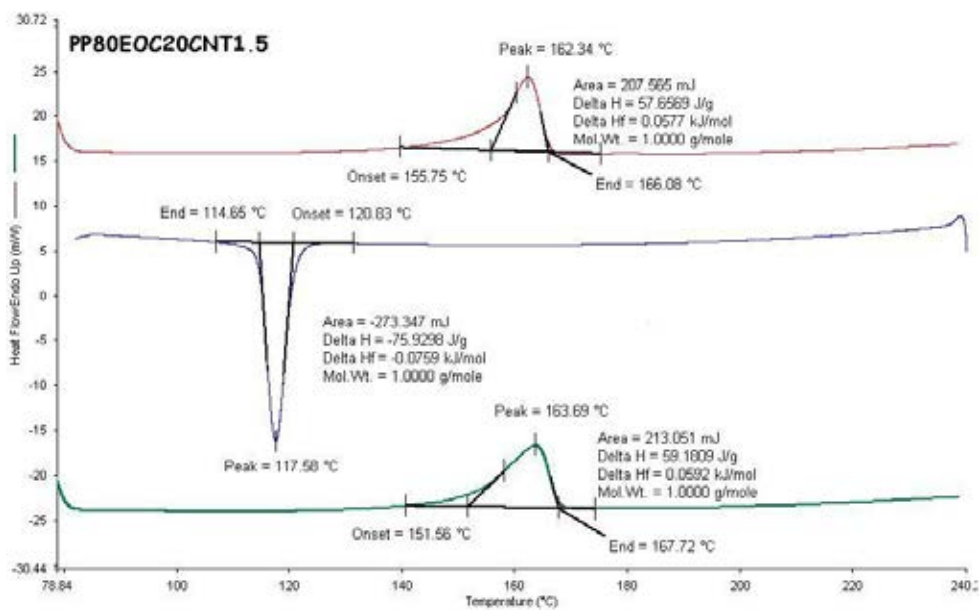
ภาพ จ-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/0



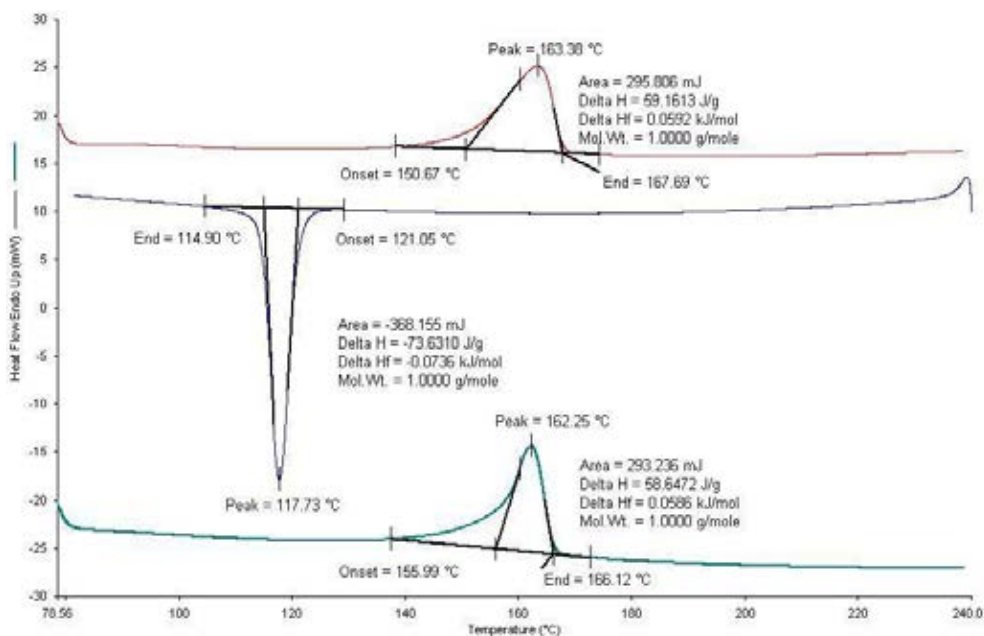
ภาพ จ-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/0.5



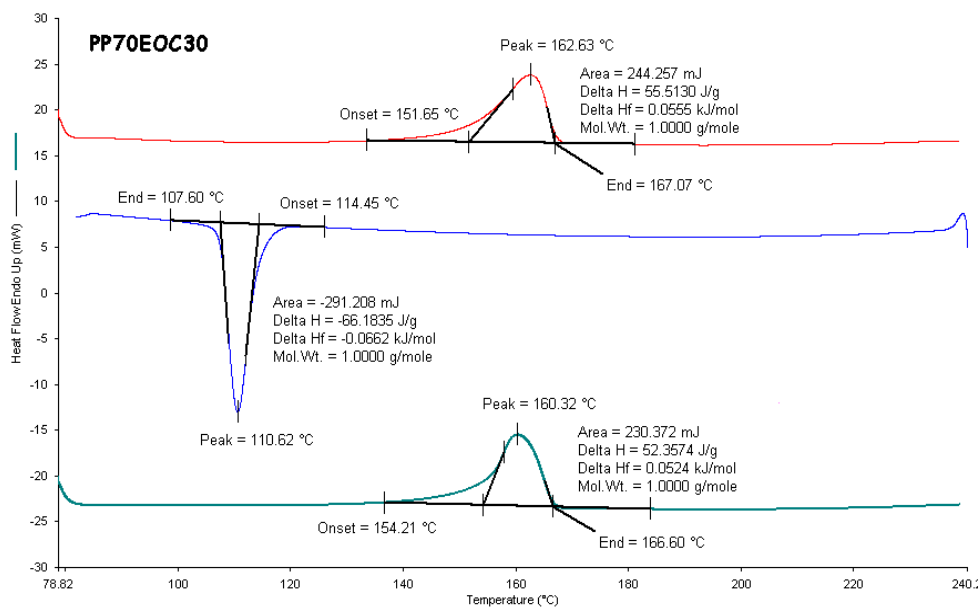
ภาพ จ-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/1



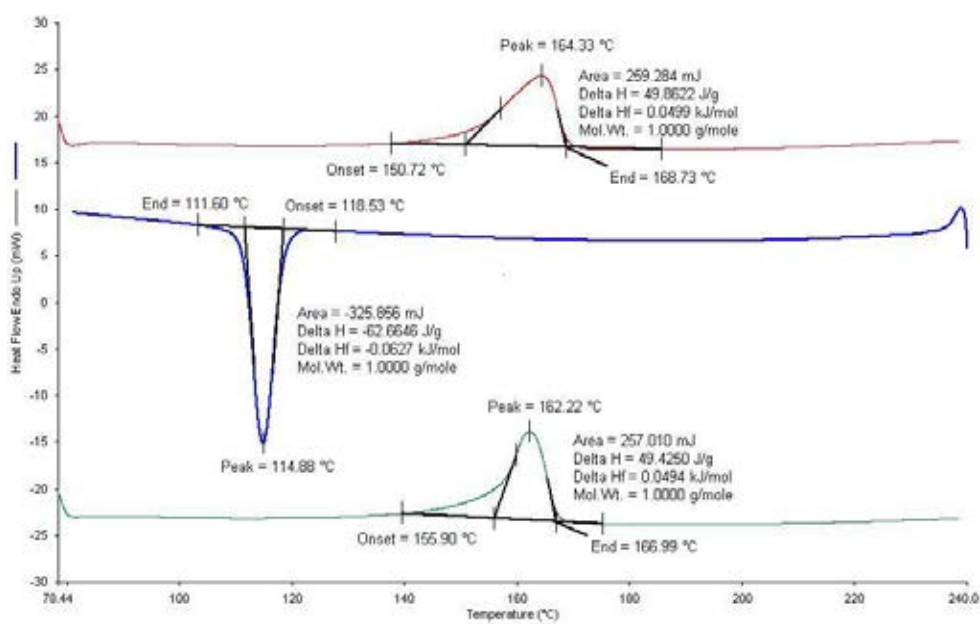
ภาพ จ-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/1.5



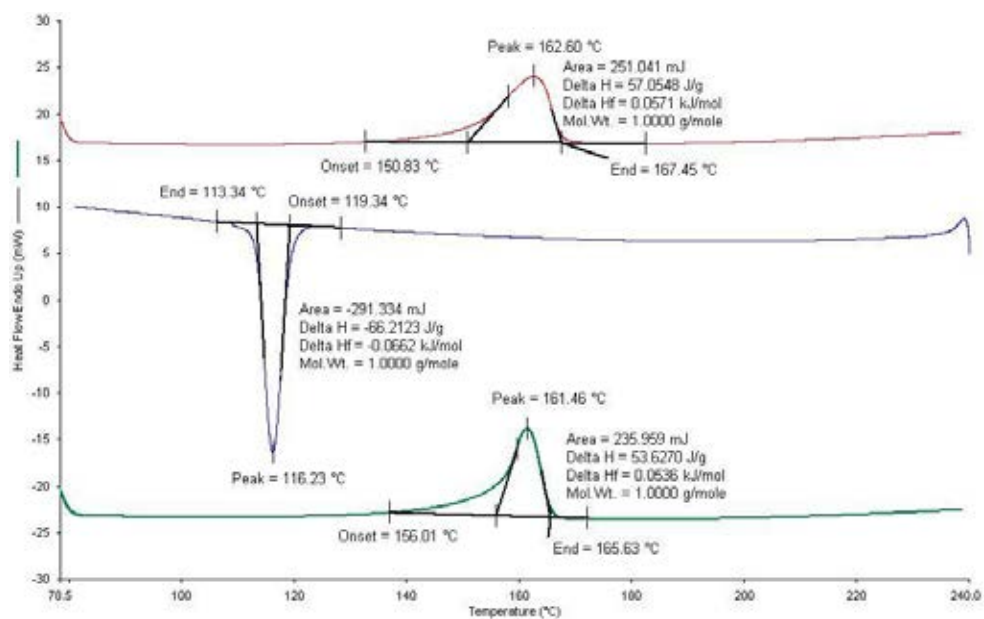
ภาพ จ-6 เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/2



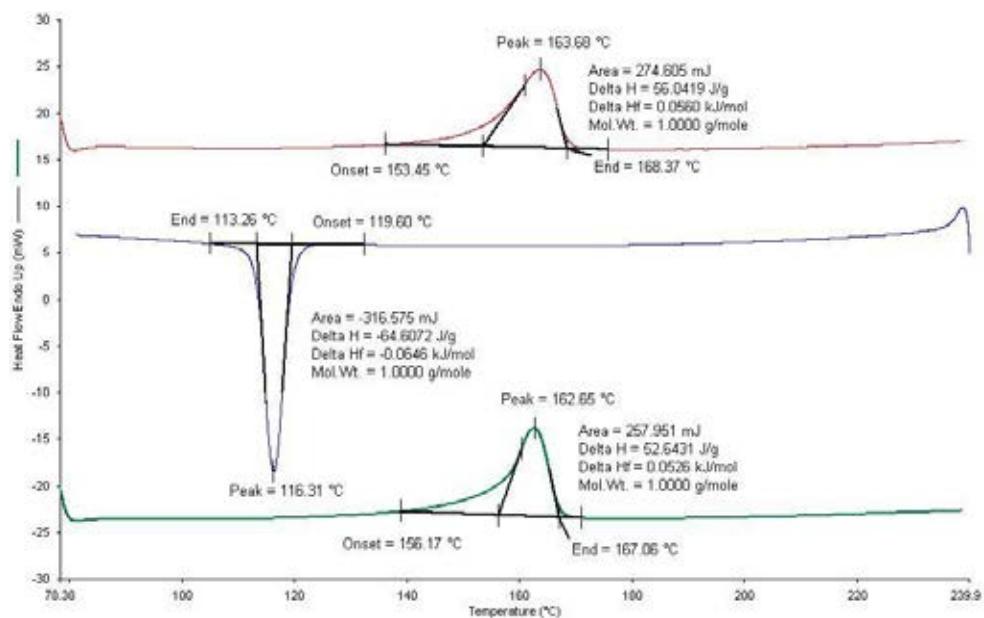
ภาพ จ-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 70/30/0



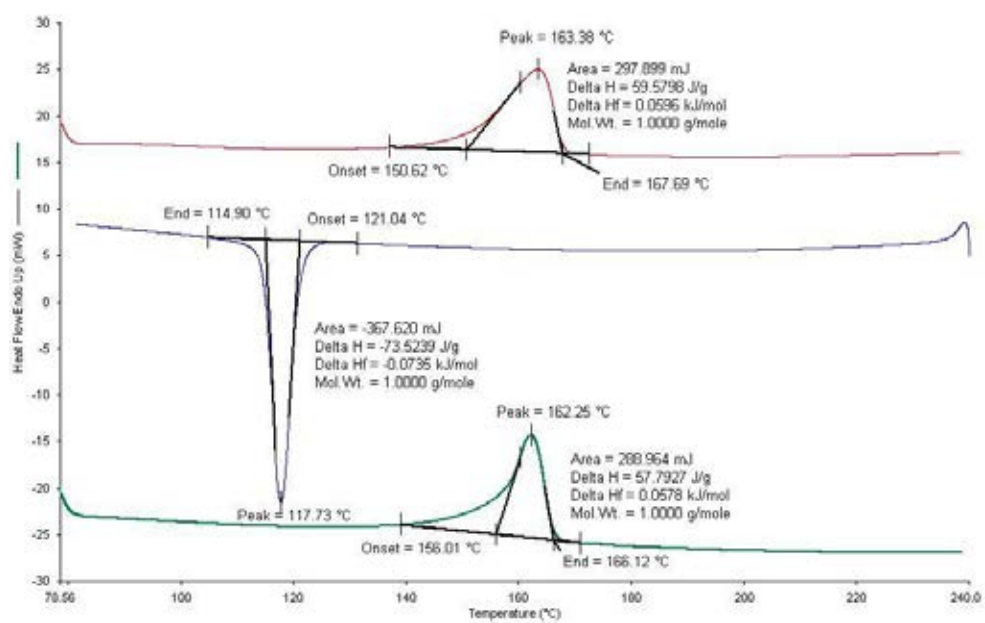
ภาพ จ-8 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 70/30/0.5



ภาพ จ-9 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพโรฟีนที่อัตราส่วน 70/30/1



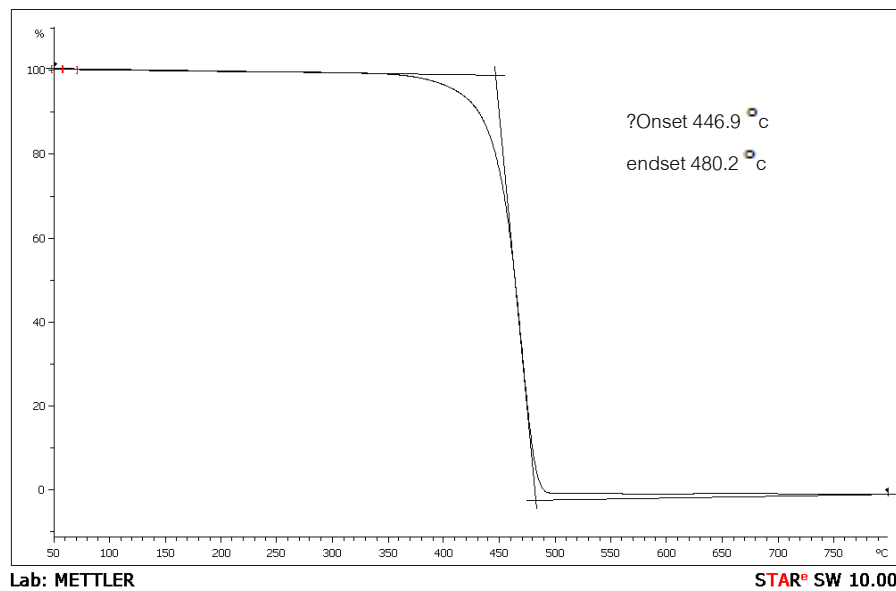
ภาพ จ-10 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพโรฟีนที่อัตราส่วน 70/30/1.5



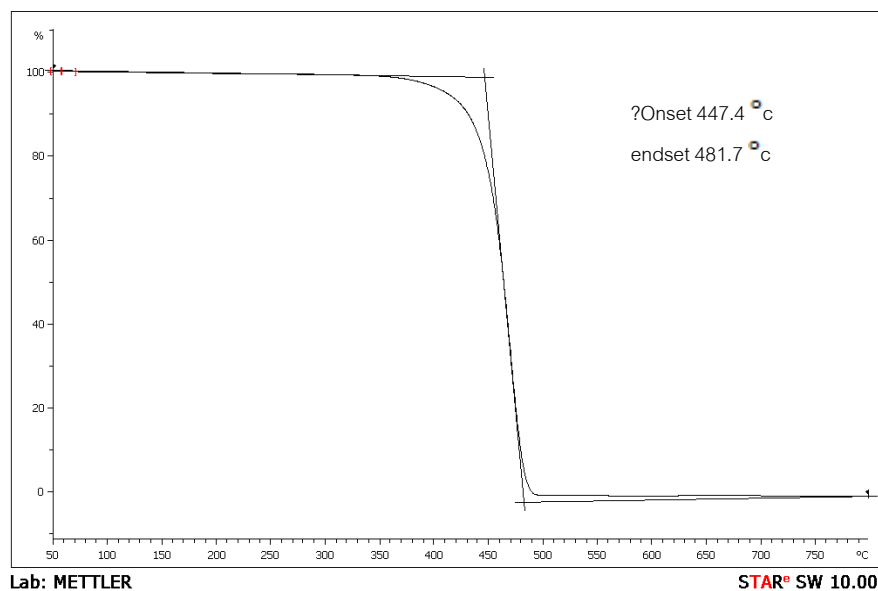
ภาพ จ-11 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพโรพิสที่อัตราส่วน 70/30/2

ภาคผนวก จ

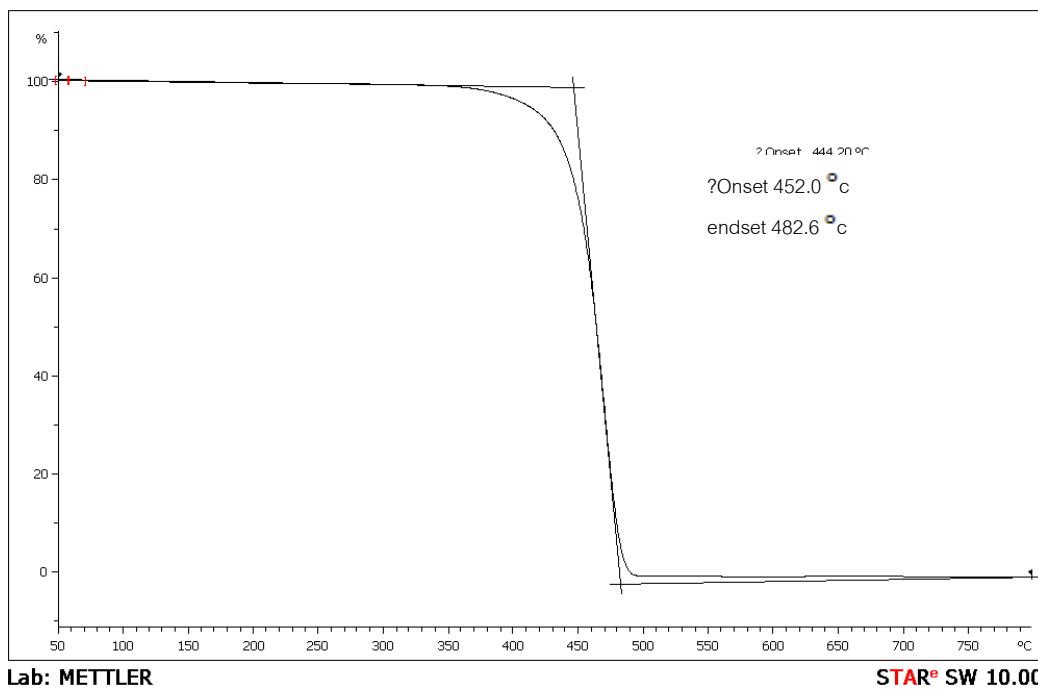
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



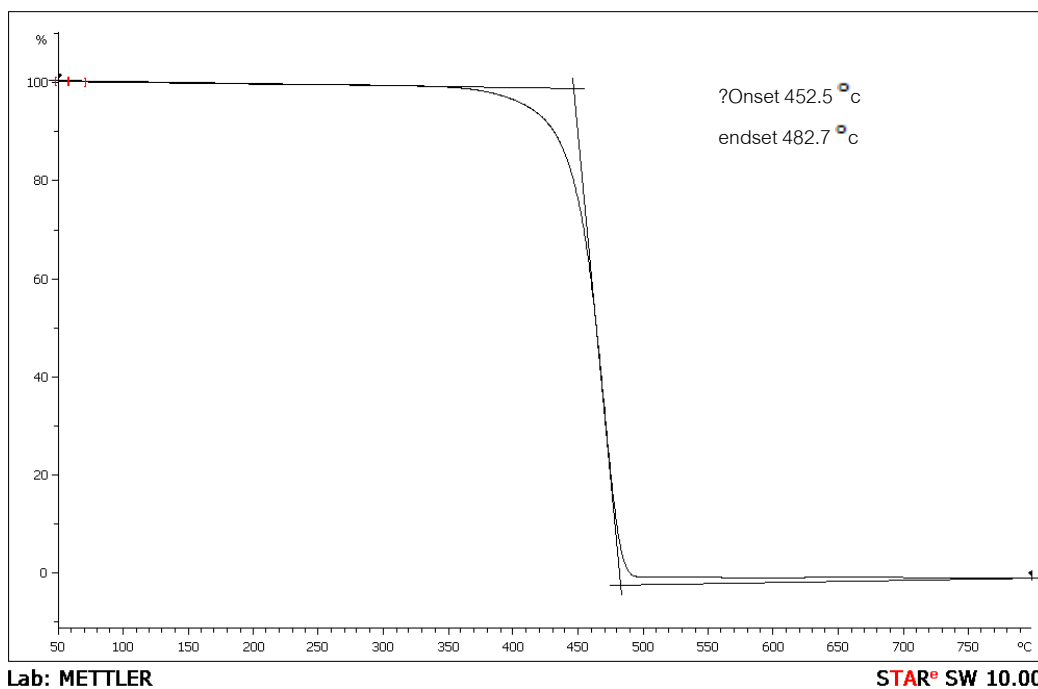
ภาพ จ-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิดีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



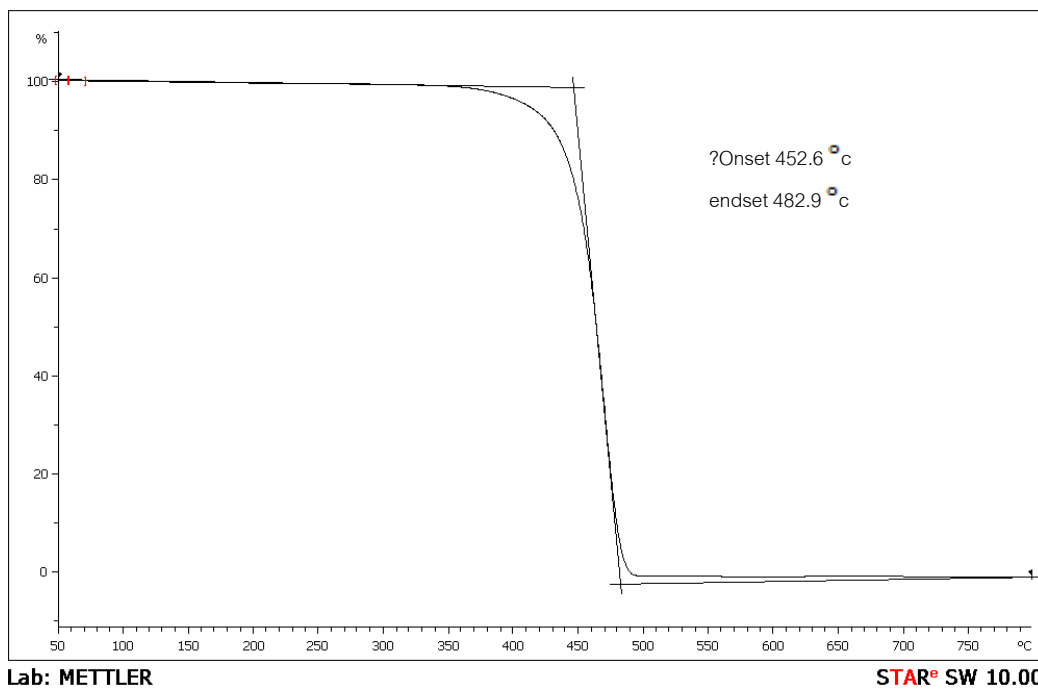
ภาพ จ-2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิดีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0



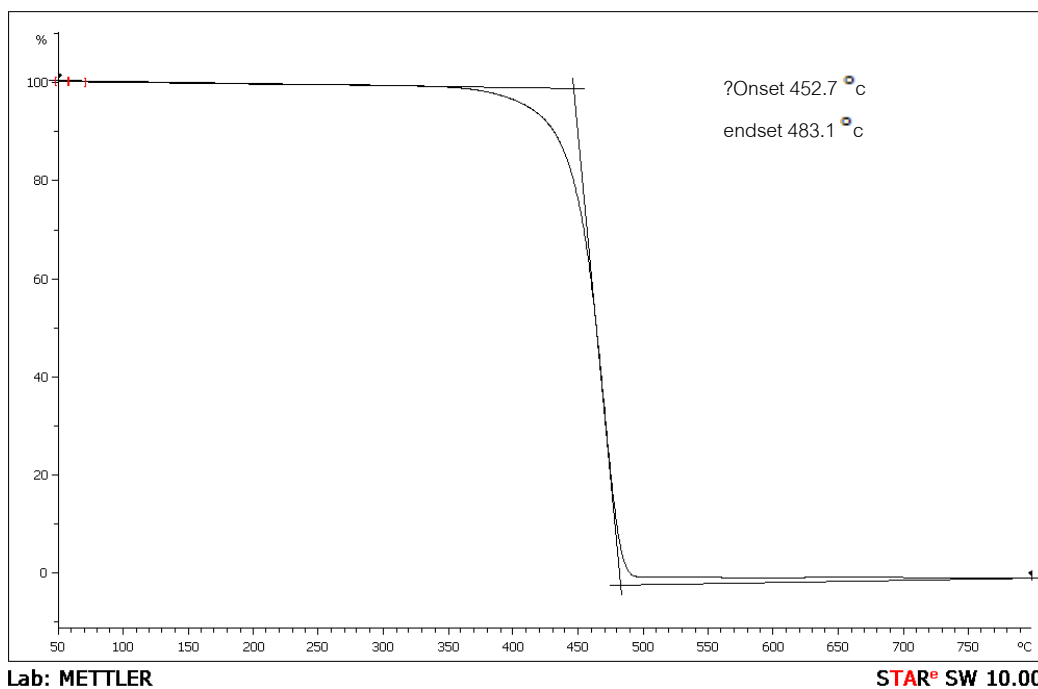
ภาพ จ-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์พีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0.5



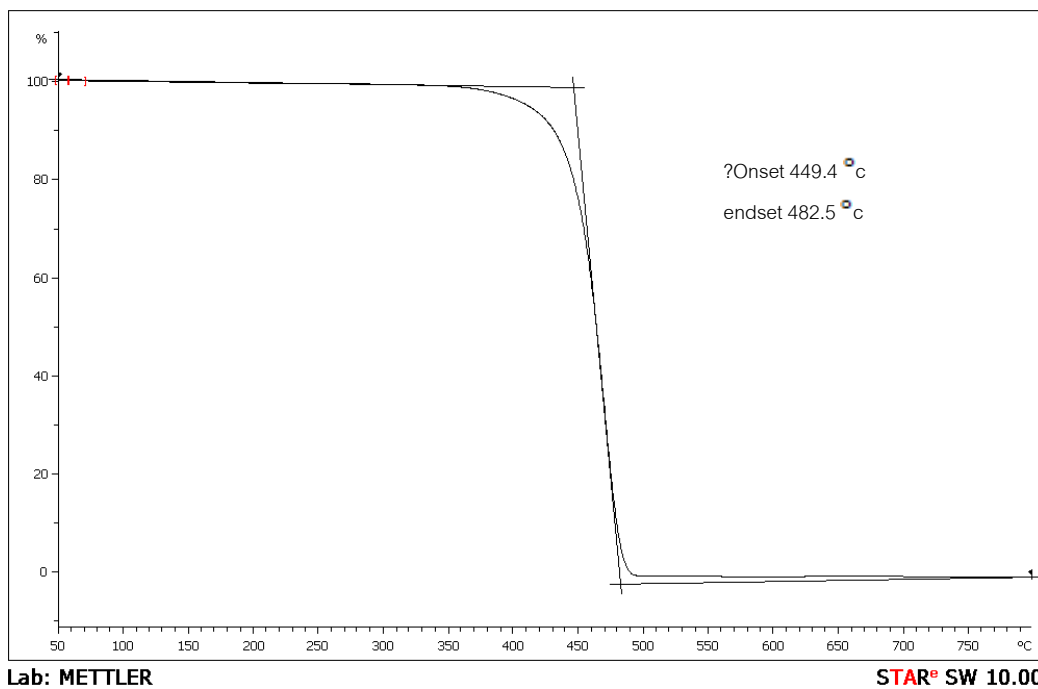
ภาพ จ-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์พีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/1



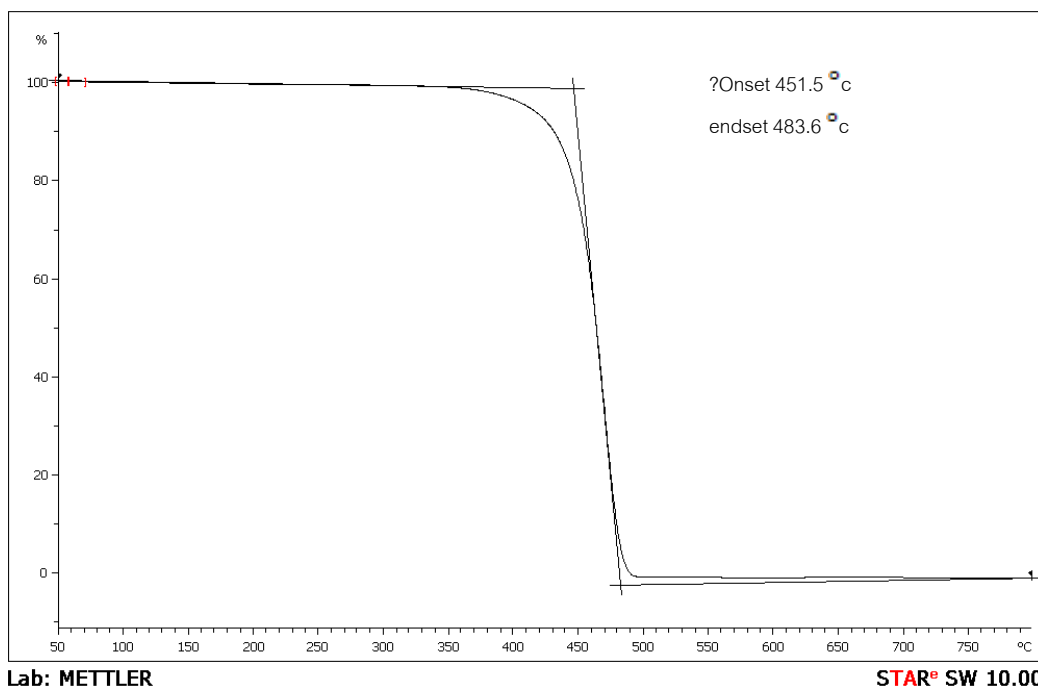
ภาพ จ-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิลีนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/1.5



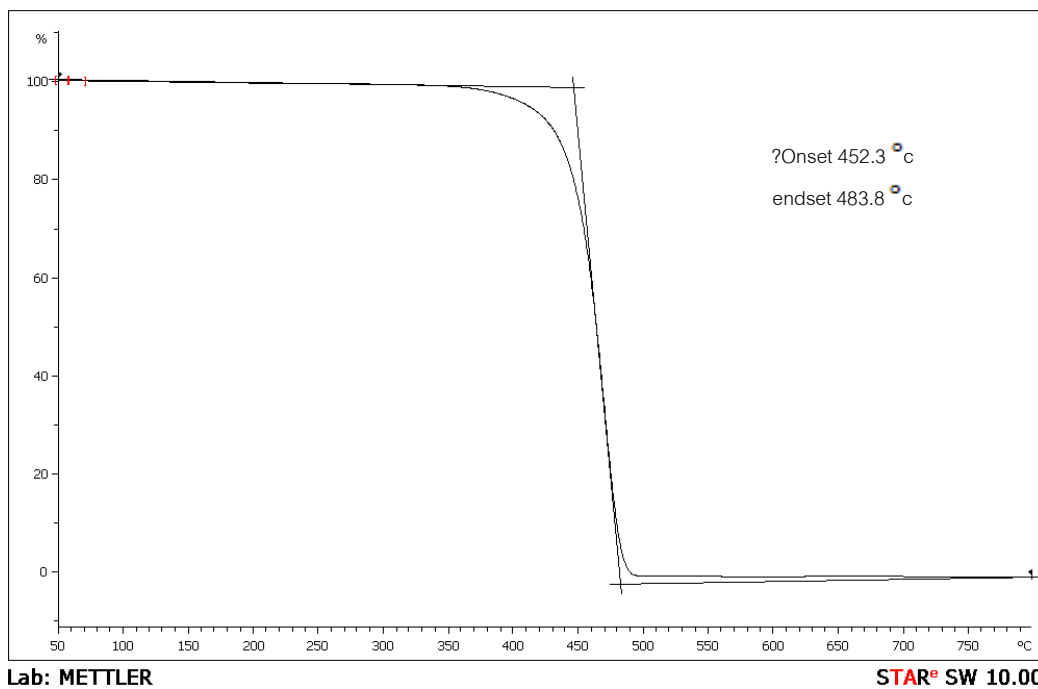
ภาพ จ-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิลีนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/2



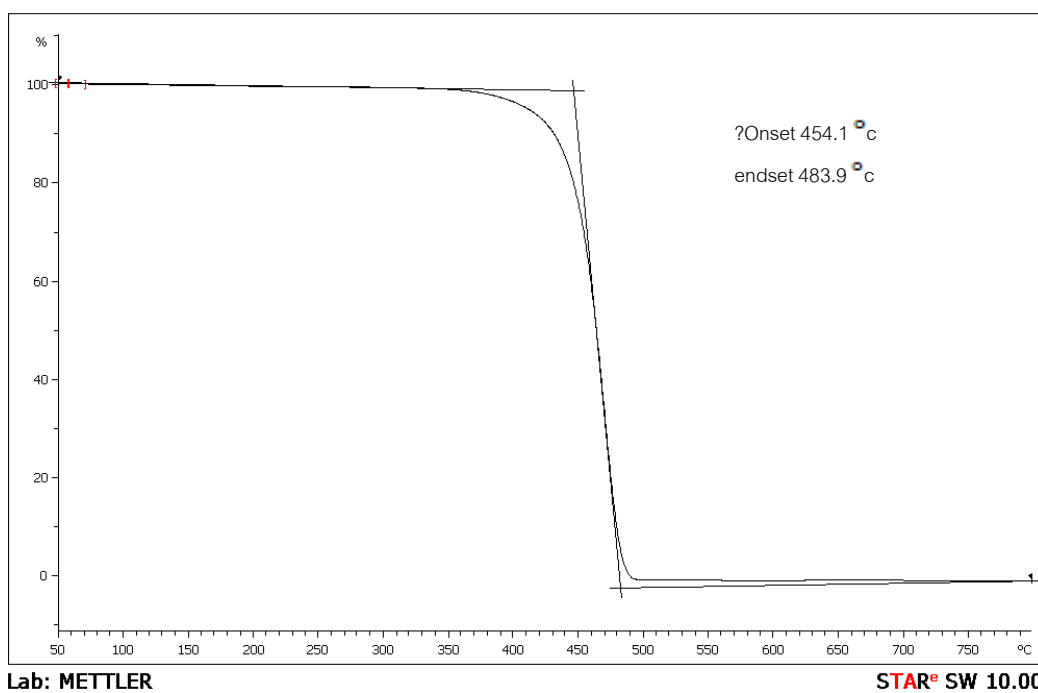
ภาพ จ-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0



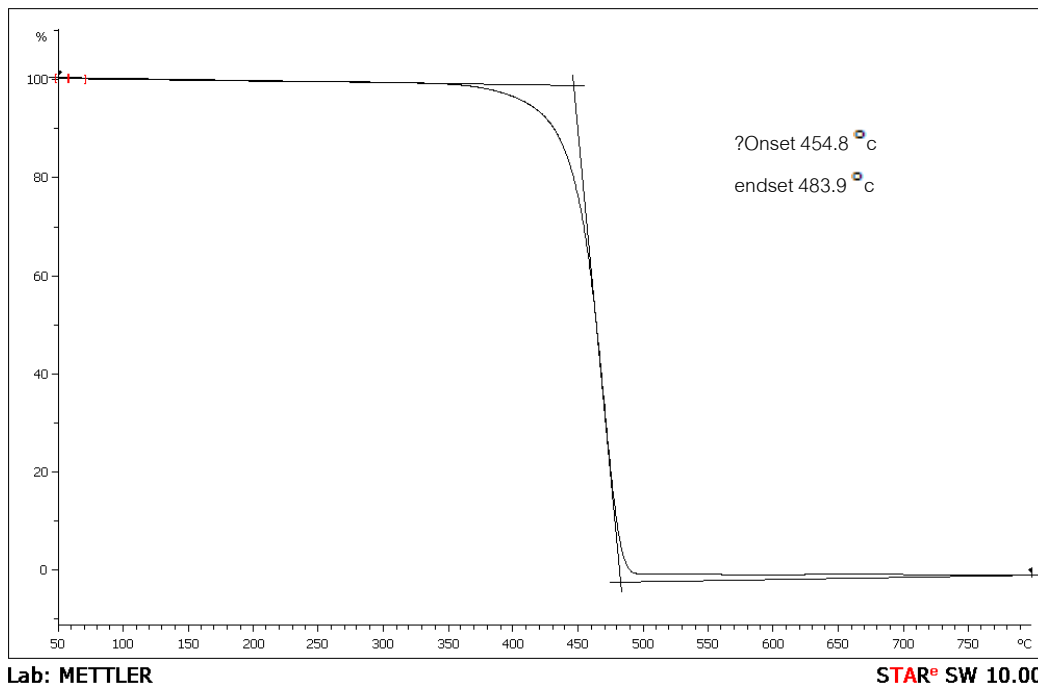
ภาพ จ-8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0.5



ภาพ จ-9 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/1



ภาพ จ-10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/1.5

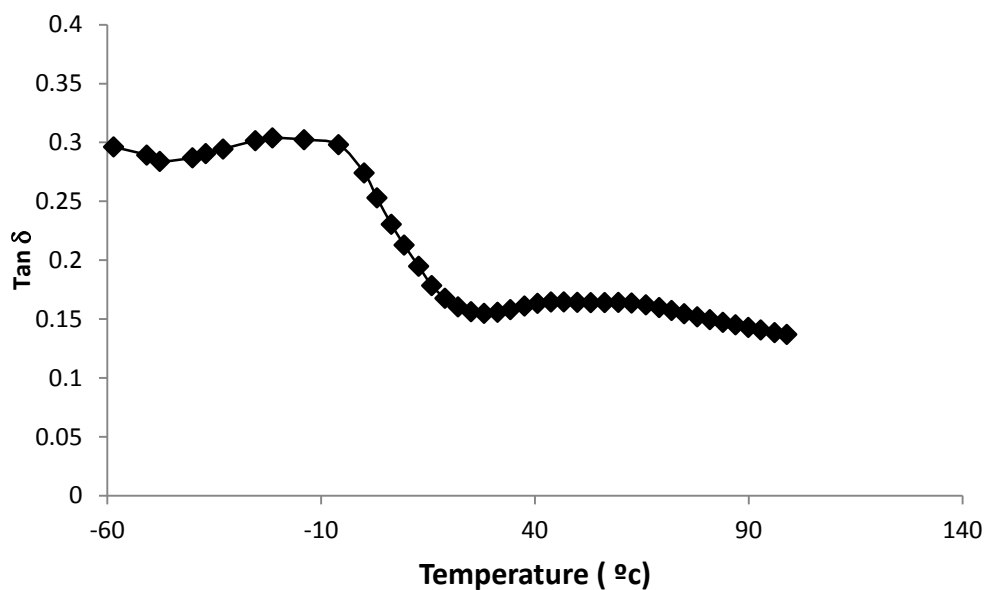


ภาพ ฉ-11 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/2

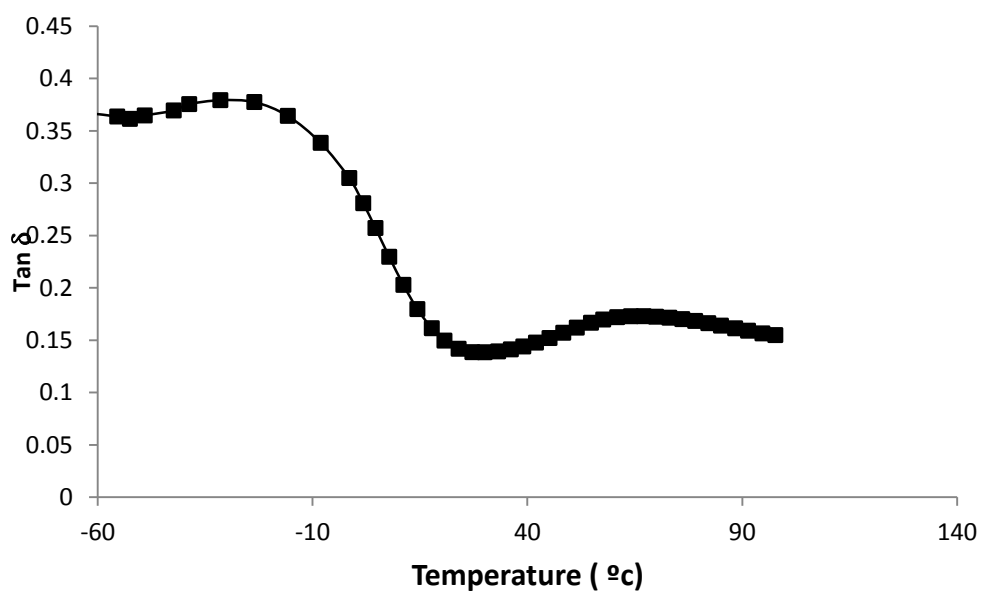
ภาคผนวก ช

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต ด้วยเทคนิค DMA

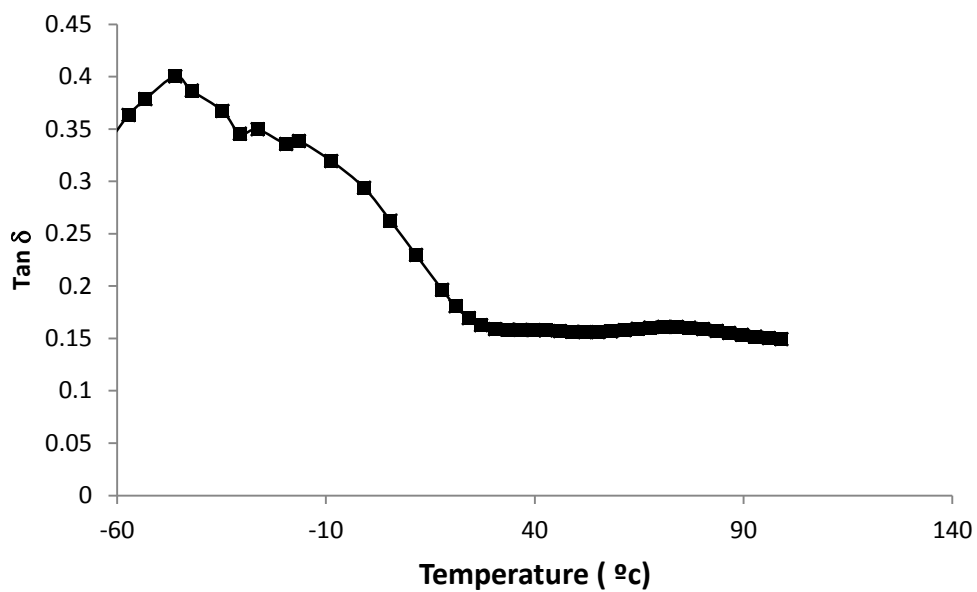
1. แทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$) ของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต



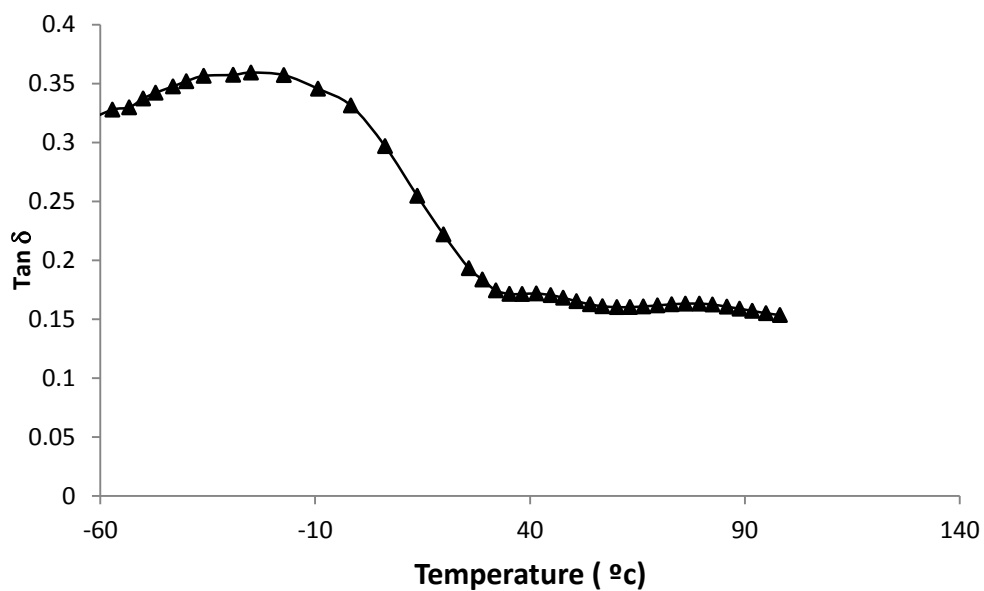
ภาพ ช-1 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



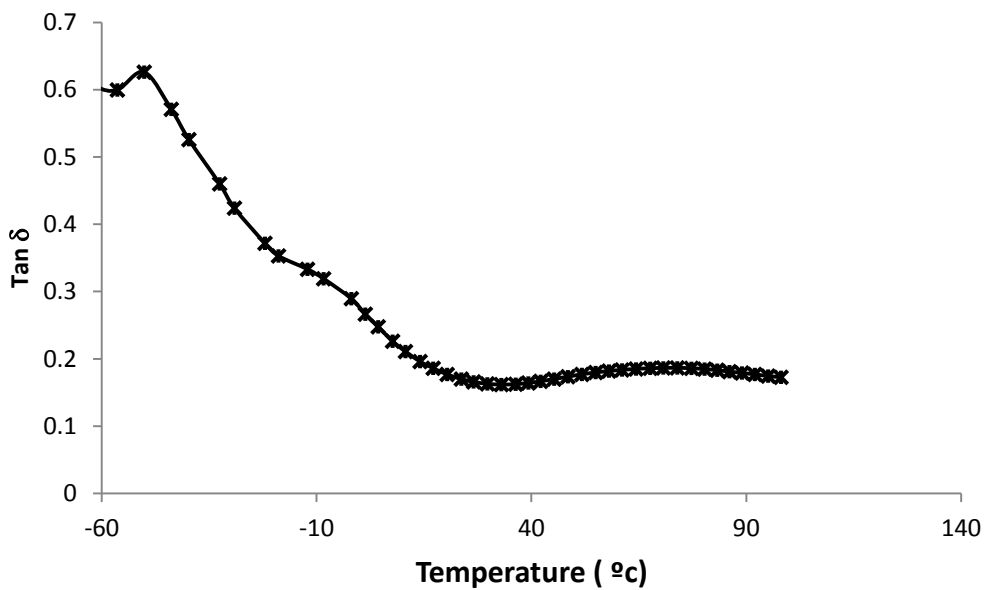
ภาพ ช-2 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80./20/0



ภาพ ซ-3 แทนเจนต์สูญเสียบของพอลิไพร์ฟิลีนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0.5

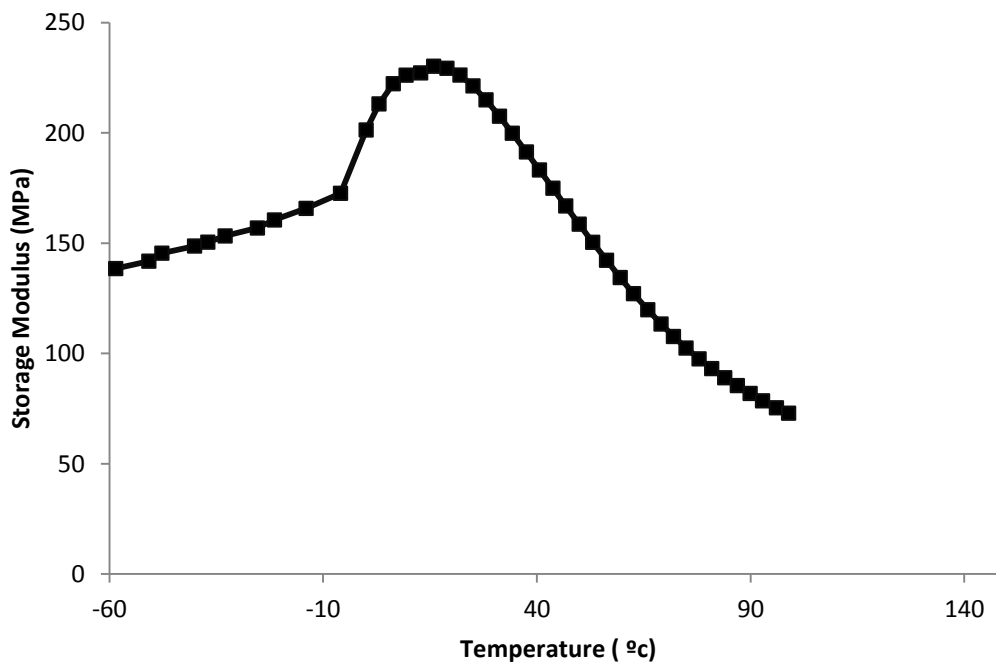


ภาพ ซ-4 แทนเจนต์สูญเสียบของพอลิไพร์ฟิลีนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0

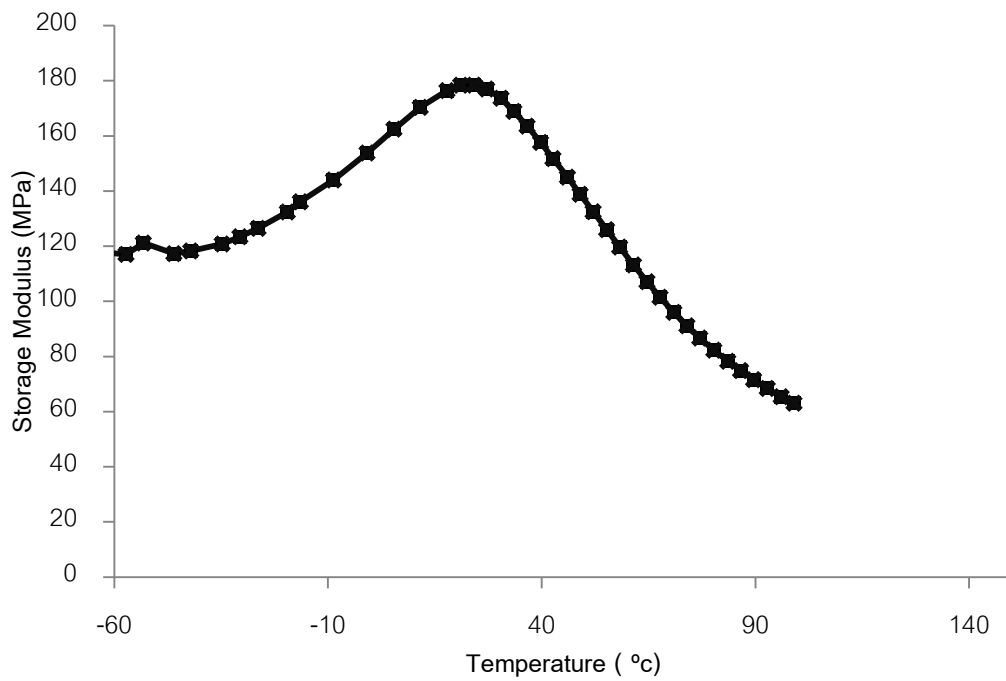


ภาพ ช-5 แทนเจนต์สูญเสียบของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0.5

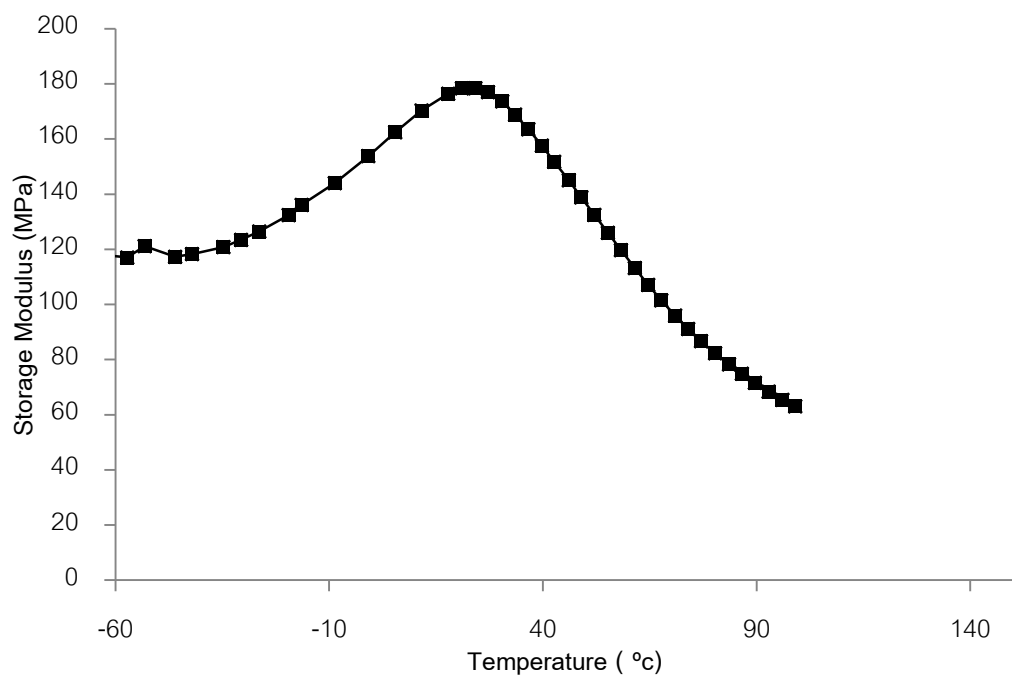
2. มอดุลัสสะสม (storage modulus, E') ของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต



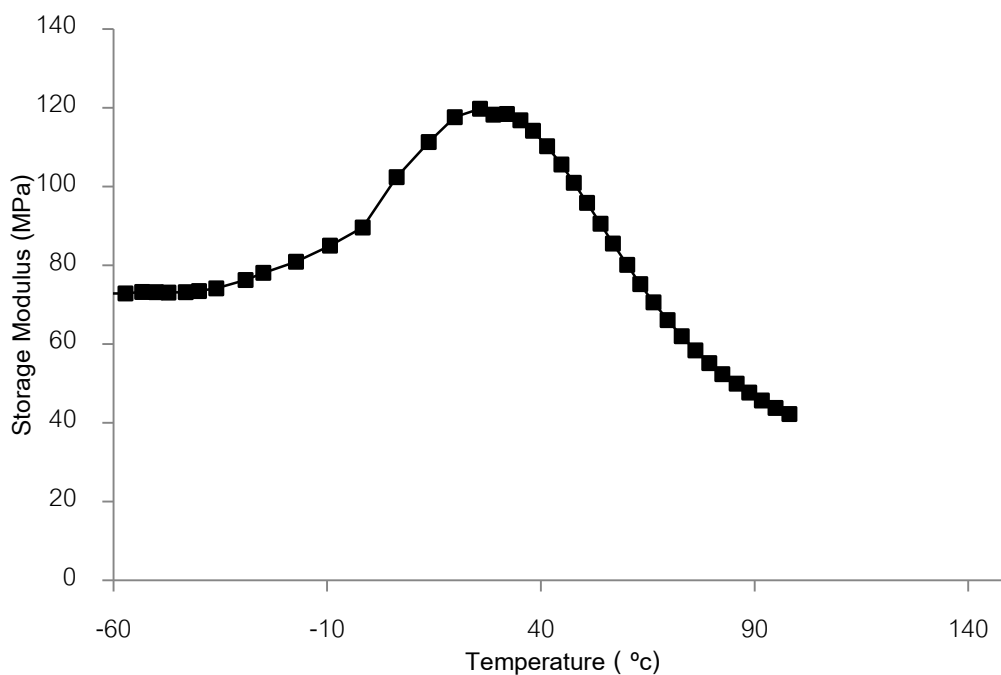
ภาพที่ ช-6 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



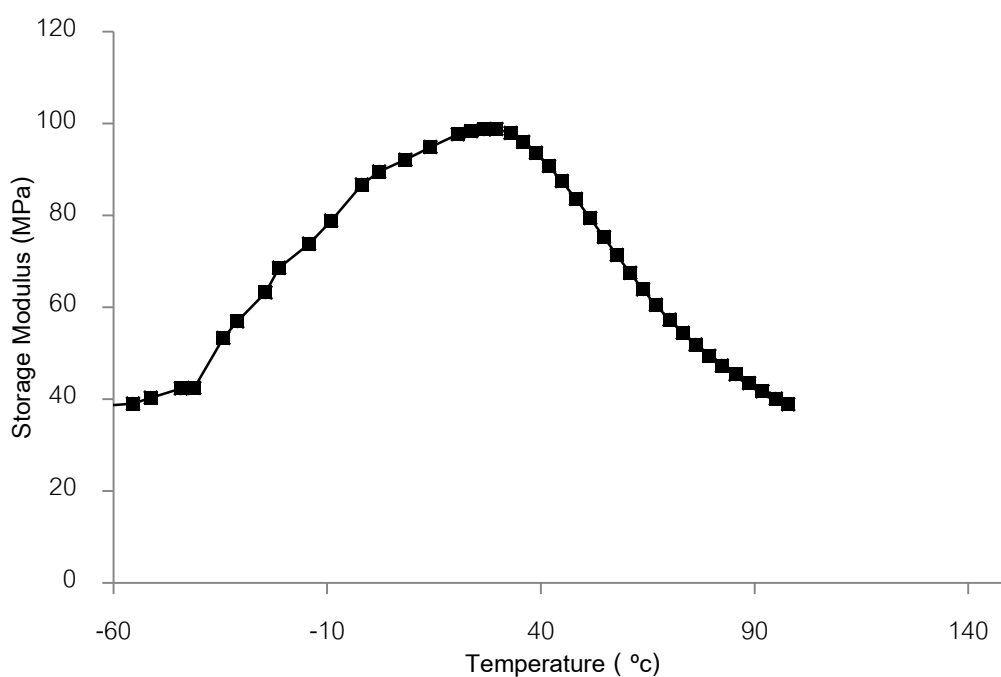
ภาพที่ ๗-7 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0



ภาพที่ ๗-8 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0.5



ภาพที่ ๙-9 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0

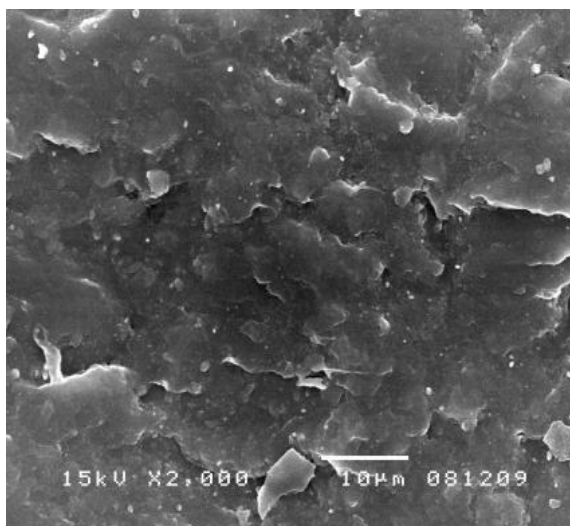


ภาพที่ ๙-10 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0.5

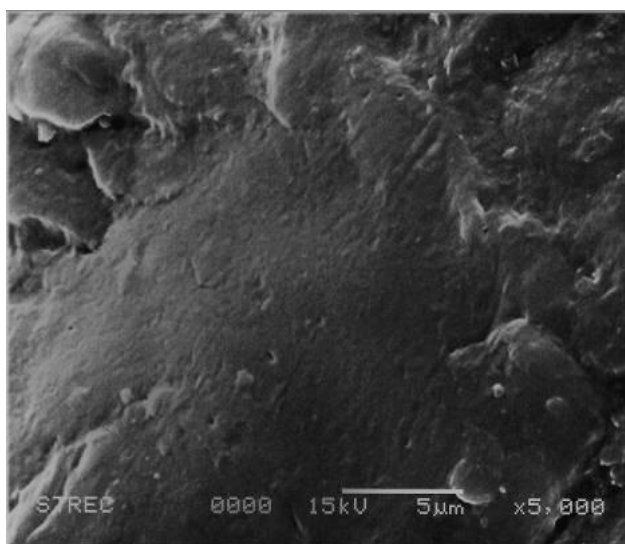
ภาคผนวก ซ

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

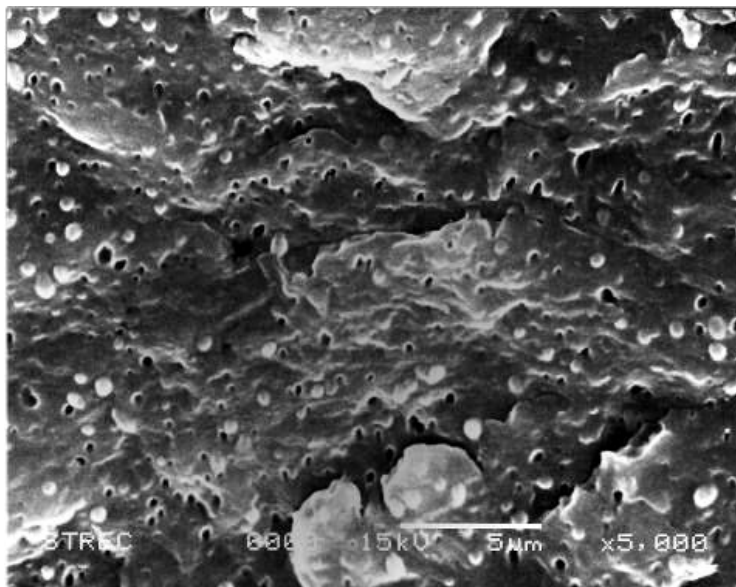
1. ภาพถ่ายชิ้นงานพอลิไพร์ฟิล์ม/เอทีเอ็นออกทีนโคพอลิเมอร์



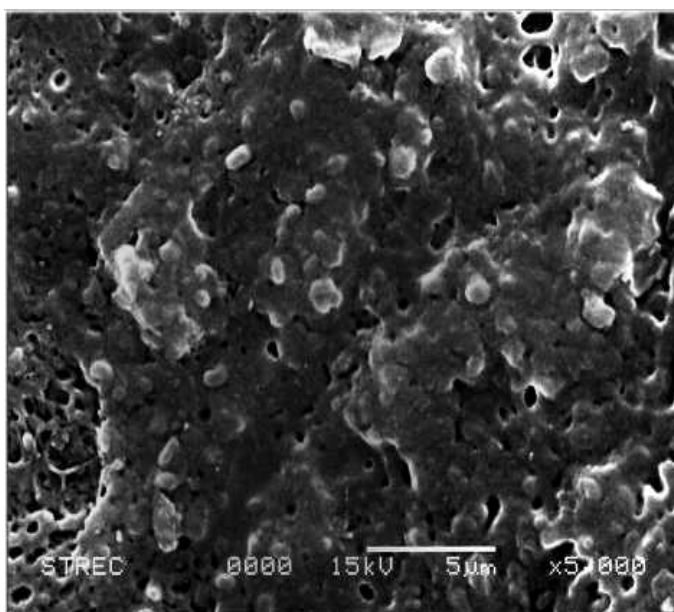
ภาพ ซ-1 ภาพถ่ายของพอลิไพร์ฟิล์มที่อัตราส่วน 100/0/0 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ภาพ ซ-2 ภาพถ่ายของพอลิไพร์ฟิล์มที่อัตราส่วน 100/0/0 ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

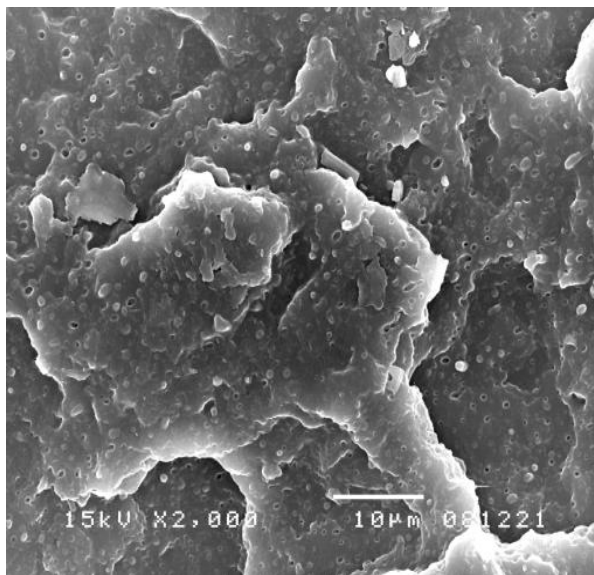


ภาพ ซ-3 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/0 ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

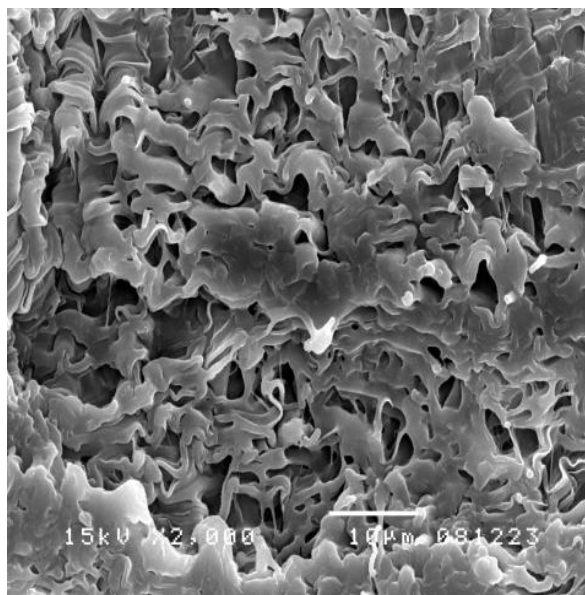


ภาพ ซ-4 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 70/30/0 ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

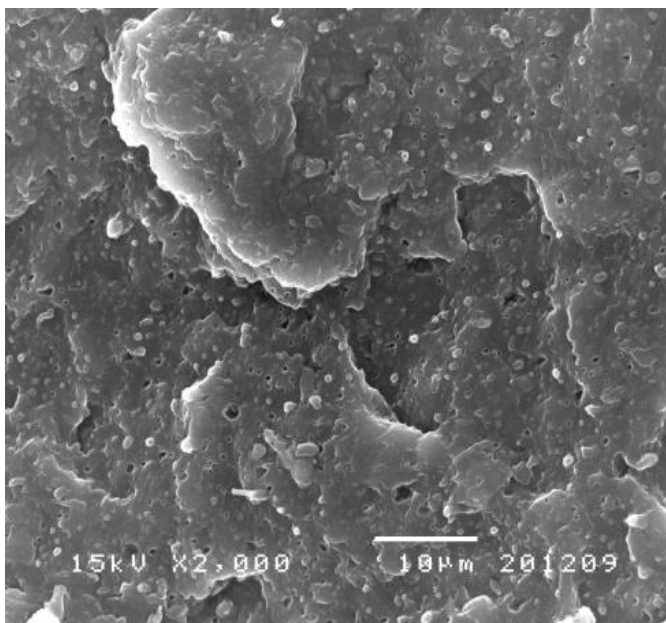
2. ภาพถ่ายชิ้นงานพอลิไพร์พิลิน/เฮทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/คาร์บอนนาโนทิวบ์
นาโนนาโนคอมพอสิต



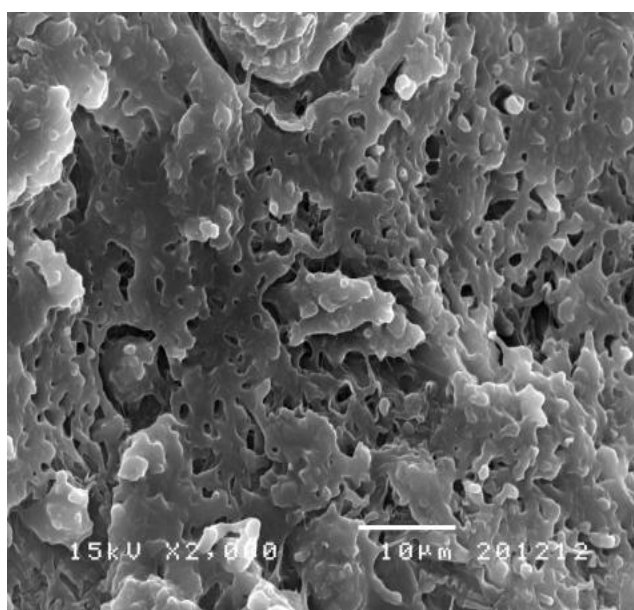
ภาพ ซ-5 ภาพถ่ายของพอลิไพร์พิลินที่อัตราส่วน 80/20/0.5 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



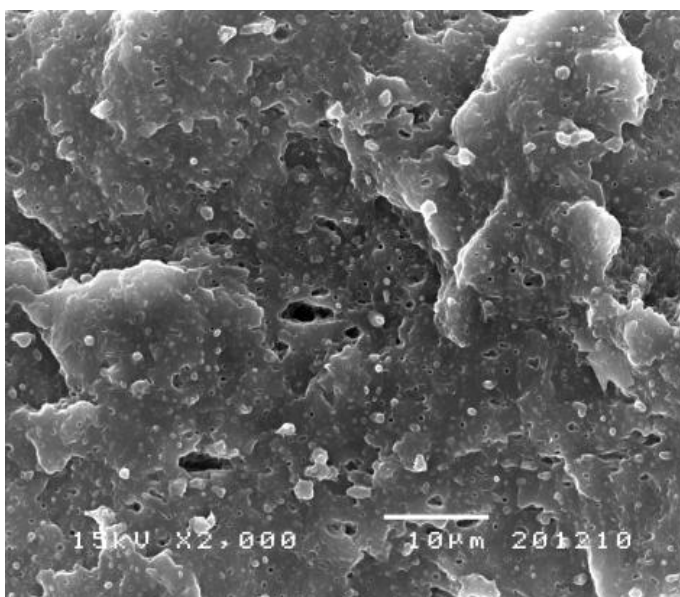
ภาพ ซ-6 ภาพถ่ายของพอลิไพร์พิลินที่อัตราส่วน 70/30/0.5 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



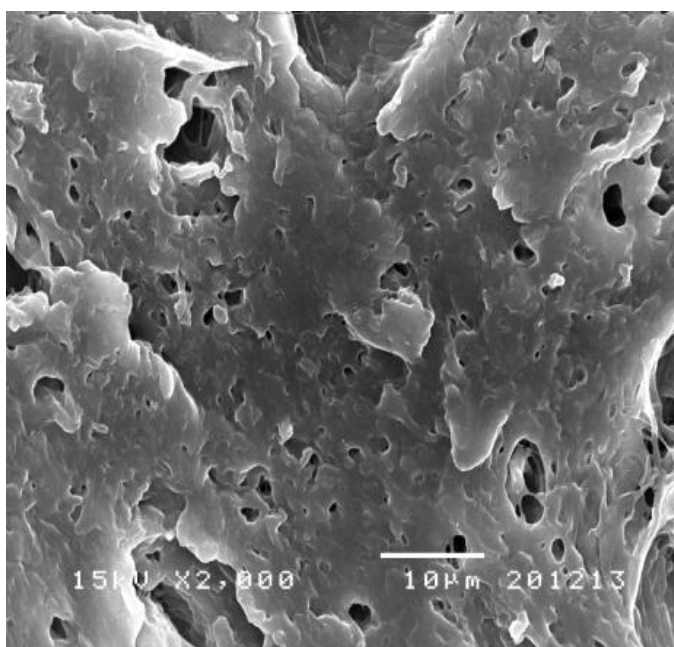
ภาพ ซ-7 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/1 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



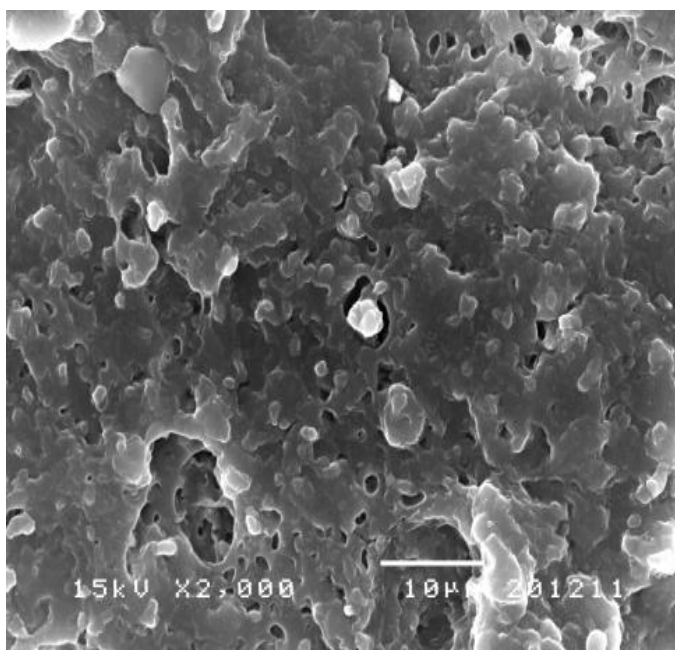
ภาพ ซ-8 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 70/30/1 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



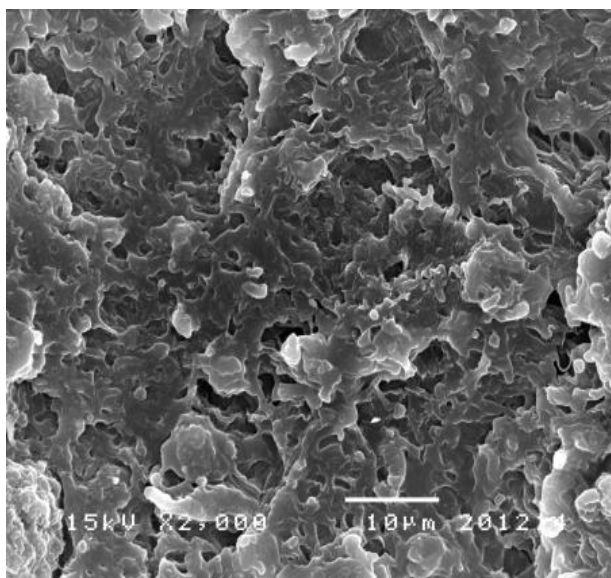
ภาพ ซ-9 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/1.5 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ภาพ ซ-10 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 70/30/1.5 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ภาพ ซ-11 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20/2 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ภาพ ซ-12 ภาพถ่ายของพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 70/30/2 ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฐิติมา รุพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2554