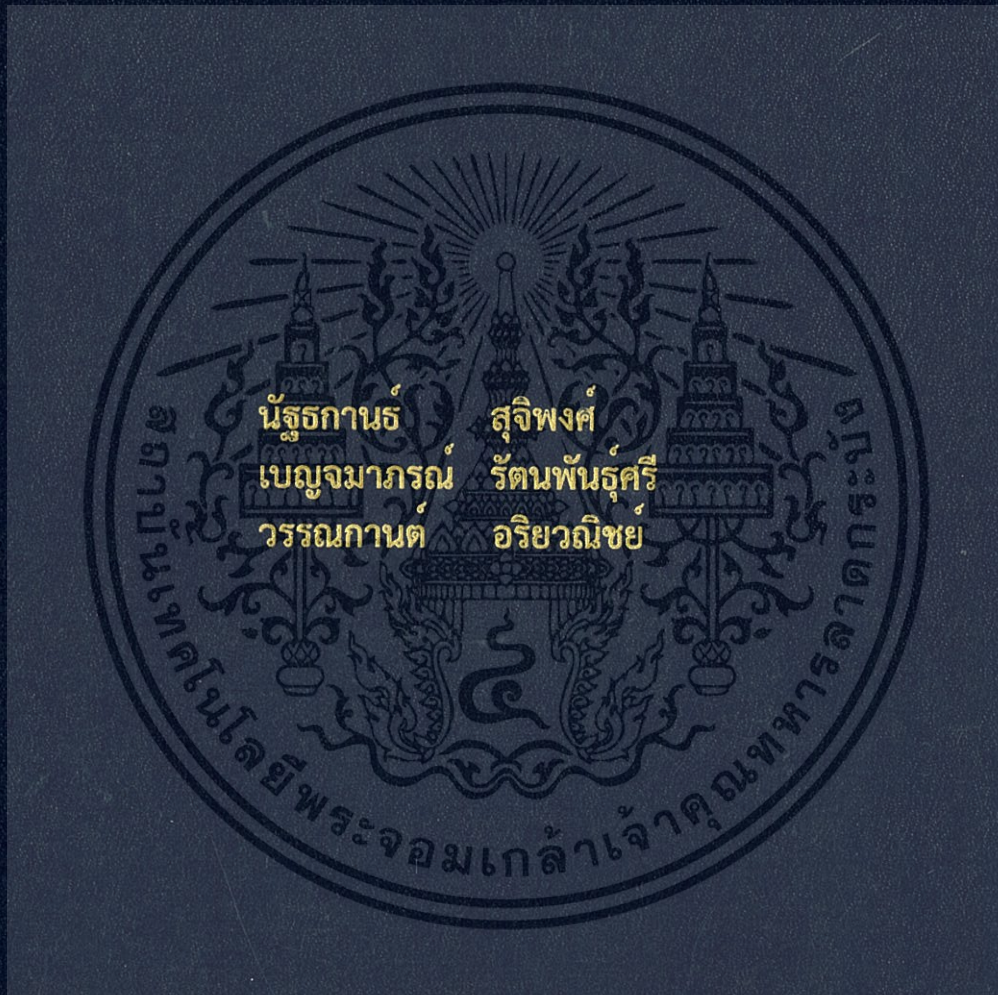


การศึกษาการเติมสารตัวเติมผสมกลุ่มคาร์บอนในพอลิยูรีเทน
นาโนคอมพอสิต

STUDY OF CARBON FILLERS
COMBINATION/POLYURETHANES NANOCOMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาการเติมสารตัวเติมผสมกลุ่มคาร์บอนในพอลิยูรีเทน
นาโนคอมพอสิต

STUDY OF CARBON FILLERS
COMBINATION/POLYURETHANES NANOCOMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดุษฎีบัณฑิต
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF CARBON FILLERS
COMBINATION/POLYURETHANES NANOCOMPOSITES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(INDUSTRIAL CHEMISTRY)

DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาการเติมสารตัวเติมผสมกลุ่มคาร์บอนในพอลิยูรีเทน
นาโนคอมพอสิต

Study Of Carbon Fillers Combination/
Polyurethanes Nanocomposites

ชื่อนักศึกษา

นางสาวนัฐธกานต์ สุจิตพงศ์ รหัสนักศึกษา 57050432
นางสาวเบญจมาภรณ์ รัตนพันธุ์ศรี รหัสนักศึกษา 57050448
นางสาววรรณกานต์ อริยวณิชย์ รหัสนักศึกษา 57050500

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี




ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|--|--|
| ผศ.ดร. เอกรัฐ เดชศรี ประธานกรรมการ |  |
| ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ |  |
| ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|--------------------|---|--------------|----------|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาการเติมสารตัวเติมผสมกลุ่มคาร์บอนในพอลิยูรีเทนนาโนคอมพอสิต | | |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวนัฐกานท์ สุจิตพงศ์ | รหัสนักศึกษา | 57050432 |
| | นางสาวเบญจมาภรณ์ รัตน์พันธุ์ศรี | รหัสนักศึกษา | 57050448 |
| | นางสาววรรณกานต์ อริยวณิชย์ | รหัสนักศึกษา | 57050500 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) | | |
| ภาควิชา | เคมี | | |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ | | |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) | | |
| ปีการศึกษา | 2560 | | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ | | |

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตของพอลิยูรีเทน (PU) ที่เป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อกที่มีโครงสร้างส่วนนิมที่แตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) นาโนคอมพอสิตถูกเตรียมด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว โดยใช้สารตัวเติมแบบเดี่ยวคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (MWCNT) หรือ คาร์บอนแบล็ค (CB) และสารตัวเติมแบบผสม โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB ที่ 1:3 และ 1:7 ที่ความเข้มข้นรวม 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าใน PU-ester นาโนคอมพอสิต MWCNT กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนนิม ส่วน CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนแข็ง แต่ PU-ether นาโนคอมพอสิต MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนเดียวกันคือโครงสร้างส่วนนิม ทำให้สามารถสร้างโครงข่ายการนำไฟฟ้าเกิดเป็นเส้นทางนำไฟฟ้าได้ดี ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 ปริมาณความเข้มข้น 3 %wt ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดทั้งใน PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต โดย PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2.23×10^{-3} S/cm ซึ่งสูงกว่า PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.27×10^{-3} S/cm ส่วนด้านสมบัติเชิงกลพบว่า PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตสูตร 3.0Es1:3 และ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตสูตร 3.0Eth1:3 มีค่า Young's modulus สูงสุดและเมื่อเปรียบเทียบกับ PU ที่ไม่มีสารตัวเติม (Unfilled) มีแนวโน้ม %Improvement 433 และ 457 ตามลำดับ เนื่องจาก PU-ether นาโนคอมพอสิต มีการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในโครงสร้างส่วนเดียวกันคือโครงสร้างส่วนนิม ทำให้สามารถเสริมความแข็งแรงได้มากกว่า นอกจากนี้การศึกษาการกระจายตัวด้วยเทคนิค FESEM พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ MWCNT กับ CB และการเพิ่มปริมาณความเข้มข้น สารตัวเติมทั้งสองชนิดยังคงสามารถกระจายตัวได้ดีใน PU เมทริกซ์

คำสำคัญ : คาร์บอนแบล็ค คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น สารตัวเติมผสม นาโนคอมพอสิตพอลิยูรีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|----------------------|--|---------------------|--|
| Title | Study of Carbon Fillers Combination/Polyurethanes Nanocomposites | | |
| Students | Miss Natthakarn Sujipong | Student ID 57050432 | |
| | Miss Benjamaporn Rattanapansri | Student ID 57050448 | |
| | Miss Wannakarn Ariyawanich | Student ID 57050500 | |
| Degree | Bachelor of Science (Industrial Chemistry) | | |
| Department | Chemistry | | |
| Faculty | Science | | |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) | | |
| Academic Year | 2017 | | |
| Advisor | Dr. Kittimon Jirakittidul | | |

Abstract

In this research, polyurethanes (PU) are a block copolymer had two different soft segments (polyester (PU-ester) and polyether (PU-ether)) nanocomposites were prepared by melt mixing with one filler type and two filler types. Carbon fillers used in this research were multiwalled carbon nanotube (MWCNT) and carbon black (CB). The mixing filler ratio of MWCNT:CB was studied at 1:3 and 1:7 in total filler content of 0.5, 1.5 and 3.0 %wt. DSC was used to testing thermal properties. It was found that MWCNT dispersed in soft segments while CB dispersed in hard segments in PU-ester nanocomposites. For PU-ether nanocomposites both MWCNT and CB dispersed in hard segments resulting in good conductive network creation and an increment of conductivity. The highest conductivities of both PU nanocomposites in corperating with mixing fillers were found at the MWCNT:CB ratio of 1:3 at 3.0 %wt. In addition, the highest conductivity of PU-ether/MWCNT/CB nanocomposites at 2.23×10^{-3} S/cm was higher than that of PU-ester/MWCNT/CB nanocomposites at 1.27×10^{-3} S/cm. Considering at mechanical properties, the highest Young's modulus of MWCNT/CB nanocomposites were 3.0Es1:3 and 3.0Eth1:3. Comparing with UnfilledPU %improvement of Young's modulus was approximately 433% and 457% for PU-ester and PU-ether nanocomposites respectively. It was a result of both MWCNT and CB dispersed in soft segments of PU-ether contributing to better mechanical property. Furthermore, morphology of nanocomposites was investigated by FESEM. It was found both of carbon fillers were well dispersed in PU matrices as changing the ratio and increasing MWCNT and CB.

Keywords: Carbon black, Multiwalled carbon nanotube, Filler combination, Nanocomposites, Polyurethane

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษจนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เอกรัฐ เดชศรี ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบโครงการพิเศษ ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการการสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขรูปเล่มเป็นอย่างดี อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีและเจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทดลอง

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) และ Differential Scanning Colorimeter (DSC)

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การสนับสนุนโอกาสทางการศึกษา และเป็นกำลังใจจนโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มของข้าพเจ้าเอง ที่ให้ความร่วมมือ ตั้งใจ และช่วยกันทำโครงการพิเศษเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ หากมีความผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูง และผู้เขียนหวังว่าโครงการพิเศษเล่มนี้คงมีประโยชน์บ้าง ไม่น่าก็น้อยสำหรับผู้สนใจ

นัฐธกานต์ สุจิตพงศ์
เบญจมาภรณ์ รัตนพันธุ์ศรี
วรรณกานต์ อริยวณิชย์

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| คำย่อ/สัญลักษณ์ | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 5 |
| 1.3 ขอบเขต..... | 5 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| 2.1 พอลิยูรีเทน | 6 |
| 2.1.1 โครงสร้างของพอลิยูรีเทนและปฏิกิริยาพื้นฐาน..... | 6 |
| 2.1.2 การประยุกต์ใช้พอลิยูรีเทน..... | 8 |
| 2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 8 |
| 2.2.1 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 8 |
| 2.2.2 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 11 |
| 2.2.3 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 12 |
| 2.3 คาร์บอนแบล็ค..... | 12 |
| 2.3.1 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค..... | 12 |
| 2.3.2 ชนิดของคาร์บอนแบล็ค..... | 13 |
| 2.3.3 สมบัติของคาร์บอนแบล็ค..... | 14 |
| 2.3.4 การประยุกต์ใช้คาร์บอนแบล็ค..... | 15 |
| 2.4 วัสดุนาโนคอมพอสิต | 15 |
| 2.4.1 ความหมายของนาโนคอมพอสิต | 15 |
| 2.4.2 ประเภทของนาโนคอมพอสิต | 15 |
| 2.5 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า | 16 |
| 2.5.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต | 16 |
| 2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต..... | 16 |
| 2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง | 18 |
| 2.6.1 ผลกระทบของ MWCNT ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล | 18 |
| 2.6.2 ผลกระทบของการใช้ CB ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล..... | 19 |
| 2.6.3 เปรียบเทียบผลกระทบ MWCNT หรือ CB ต่อสมบัติการนำไฟฟ้า..... | 20 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--|-----------|
| 2.6.4 ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมผสมระหว่าง MWCNT และ CB | |
| ต่อสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา | 22 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 26 |
| 3.1 แผนดำเนินงาน..... | 26 |
| 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์..... | 26 |
| 3.3 วิธีการทดลอง | 27 |
| 3.3.1 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต..... | 27 |
| 3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต..... | 28 |
| 3.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิต | 28 |
| 3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC..... | 28 |
| 3.4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM..... | 29 |
| 3.4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM..... | 31 |
| 3.4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter..... | 31 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 33 |
| 4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC..... | 33 |
| 4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM..... | 37 |
| 4.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM | 41 |
| 4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter..... | 52 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 59 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 61 |
| ภาคผนวก..... | 65 |
| ภาคผนวก ก..... | 66 |
| ภาคผนวก ข..... | 72 |
| คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ..... | 84 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ส่วนประกอบหลักสารตั้งต้นของ Thermoplastic polyurethane..... | 7 |
| 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะของคาร์บอนแบล็คแต่ละชนิด..... | 14 |
| 3.1 ชื่อสูตร PU-ester/MWCNT/CB ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ..... | 27 |
| 3.2 ชื่อสูตร PU-ether/MWCNT/CB ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ..... | 28 |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต..... | 34 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต..... | 35 |
| 4.3 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต..... | 37 |
| 4.4 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness (J) ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต..... | 38 |
| 4.5 แสดงการปรับปรุงค่า Young's modulus ของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต เมื่อเทียบ Unfilled..... | 40 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมพอสิต..... | 1 |
| 1.2 การเรียงตัวเป็นโครงตาข่ายของอนุภาคนาไฟฟ้า | 2 |
| 1.3 สมการเกิด Polyurethane | 3 |
| 1.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน..... | 3 |
| 1.5 แผ่นแกรฟีนม้วนตัวซ้อนทับกันหลายชั้นเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น | 4 |
| 1.6 คาร์บอนแบล็ค..... | 4 |
| 2.1 โครงสร้างของ Thermoplastic polyurethane | 6 |
| 2.2 ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการม้วนเข้าหากันคล้ายท่อทรงกระบอก | 9 |
| 2.3 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนภายในคาร์บอนนาโนทิวป์..... | 9 |
| 2.4 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียว | 10 |
| 2.5 โครงสร้างการม้วนตัวในลักษณะต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียว..... | 10 |
| 2.6 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น | 11 |
| 2.7 แบบจำลองการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค..... | 12 |
| 2.8 คาร์บอนแบล็คโครงสร้างน้อยและโครงสร้างมาก | 13 |
| 2.9 ค่า Percolation threshold ของอนุภาคทรงกลมและอนุภาคเป็นท่อ..... | 17 |
| 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณของ MWCNT ของฟิล์ม PU คอมพอสิต..... | 18 |
| 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการผสม PLA/ PCL /0.25 %wt MWCNT คอมพอสิต | 19 |
| 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณความเข้มข้นของ CB ของCB/PP/EVA คอมพอสิต | 20 |
| 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณสารตัวเติม PU/MWNT และ PU/CB | 21 |
| 2.14 กราฟแสดงผลของสารตัวเติมแต่ละชนิดต่อค่าการนำไฟฟ้า | 23 |
| 2.15 กราฟ Stress-Strain ของคอมพอสิตที่มีค่าการนำไฟฟ้า 10^{-4} s/cm..... | 23 |
| 2.16 กลไกการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้าโดย MWNTs และ CB ใน Ternary systems ความเข้มข้นของสารตัวเติมต่ำและความเข้มข้นของสารตัวเติมสูง | 24 |
| 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณความเข้มข้นของ CB กับ MWCNT ใน Epoxy นาโนคอมพอสิต | 25 |
| 3.1 ภาพแสดงเครื่อง DSC รุ่น 204 F1 Phoenix®..... | 29 |
| 3.2 ชิ้นงานดัมเบลล์สำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV..... | 30 |
| 3.3 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึง..... | 30 |
| 3.4 ภาพแสดง FESEM รุ่น JEOL LSM-7610F | 31 |
| 3.5 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า..... | 32 |
| 4.1 กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 1.5 %wt..... | 33 |
| 4.2 กราฟ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 1.5 %wt..... | 34 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.3 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus กับปริมาณสารตัวเติม ในสูตรผสม ที่ต่างกัน (a) PU-ester และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต..... | 39 |
| 4.4 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 5000x เท่าของ (a) 0.5EsCB และ (b) 3.0EsCB | 42 |
| 4.5 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5EsMWCNT และ (b) 3.0EsMWCNT..... | 43 |
| 4.6 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Es1:3 และ (b) 3.0Es1:3..... | 44 |
| 4.7 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Es1:7 และ (b) 3.0Es1:7..... | 45 |
| 4.8 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 5000x เท่าของ (a) 0.5EthCB และ (b) 3.0EthCB | 47 |
| 4.9 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5EthMWCNT และ (b) 3.0EthMWCNT | 48 |
| 4.10 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Eth1:3 และ (b) 3.0Eth1:3..... | 49 |
| 4.11 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Eth1:7 และ (b) 3.0Eth1:7..... | 50 |
| 4.12 | ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 50000x เท่าของ (a) 3.0Es1:3 และ (b) 3.0Eth1:3..... | 51 |
| 4.13 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่ความเข้มข้น 0.5 %wt..... | 52 |
| 4.14 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่ความเข้มข้น 1.5 %wt..... | 52 |
| 4.15 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณความเข้มข้น 3.0 %wt..... | 53 |
| 4.16 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณความเข้มข้น 0.5 %wt..... | 54 |
| 4.17 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณความเข้มข้น 1.5 %wt..... | 54 |
| 4.18 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณความเข้มข้น 3.0 %wt..... | 55 |
| 4.19 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณรวมของสาร ตัวเติมที่เติมลงใน PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz | 56 |
| 4.20 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณรวมของสาร ตัวเติมที่เติมลงใน PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz | 57 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ

| คำย่อ | คำอธิบาย |
|----------|---|
| CB | คาร์บอนแบล็ค |
| CNT | คาร์บอนนาโนทิวบ์ |
| DSC | Differential scanning calorimetry |
| ECPs | Electrically conductive polymer composite |
| FESEM | Field Emission Scanning Electron Microscope |
| MWCNT | คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น |
| PU | พอลิยูรีเทน |
| PU-ester | พอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มเป็น Polyester |
| PU-ether | พอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มเป็น Polyether |
| SWCNT | คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว |
| UTM | Universal Testing Machine |

สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|-------------------|--|
| g | กรัม |
| Hz | เฮิร์ตซ์ |
| J | จูล |
| NCO | หมู่ไอโซไซยาเนต |
| -NHCO-O | พันธะยูรีเทน |
| Nm | นาโนเมตร |
| °C | องศาเซลเซียส |
| %wt | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก |
| p_c | ความเข้มข้นของจุดที่เกิดการนำไฟฟ้า |
| S/cm | ซีเมนต์/เซนติเมตร |
| m ² /g | ตารางเมตร/กรัม |
| mL/g | มิลลิลิตร/กรัม |
| T_{gSS} | อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่ม |
| T_{gHS} | อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนแข็ง |
| T_{gMP} | อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็งที่ผสมกัน |
| T_{MMT} | อุณหภูมิการเกิด Microphase mixing |
| ΔH_{MMT} | พลังงานที่ใช้ในการเกิด Microphase mixing |

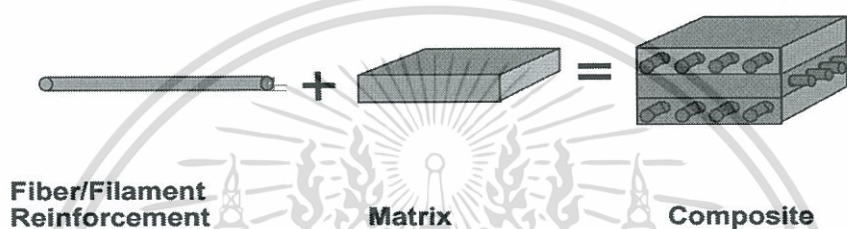
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer composite) เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมในปัจจุบัน และมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงมีการพัฒนาสมบัติเพื่อตอบสนองการใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย ทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ได้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ [1]



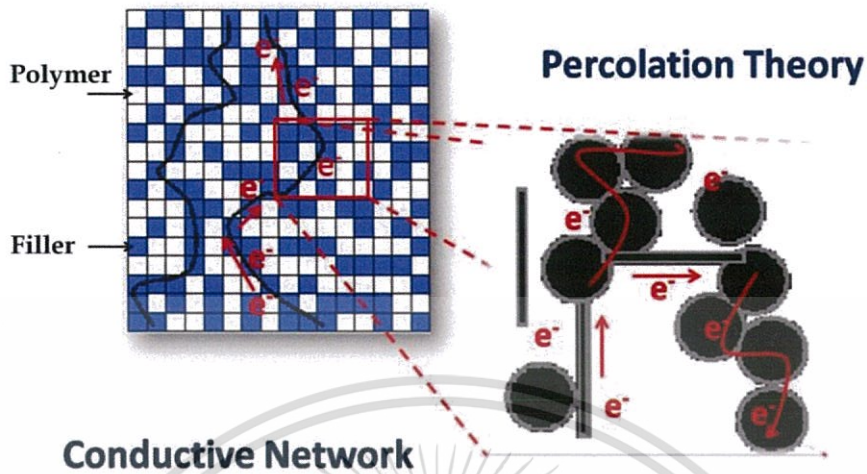
รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมพอสิต [2]

พอลิเมอร์คอมพอสิตเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภทขึ้นไป โดยที่องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันและจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยส่วนเสริมแรง (Reinforce phase) ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเส้นใย อนุภาค หรือแผ่นฝังตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ (Matrix) ที่อาจเป็นโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ตัวเสริมแรงจะช่วยให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ดังนั้นจึงมีการนำเอาวัสดุต่างชนิดมาผสมกันเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติพิเศษที่ได้จากข้อดีของวัสดุแต่ละชนิด ลักษณะของเมทริกซ์และสารเสริมแรงเป็นดังต่อไปนี้ [3]

1. เมทริกซ์ (Matrix) คือ วัสดุที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เป็นวัสดุที่มีความยาวต่อเนื่องแต่มีความแข็งแรงและค่ามอดุลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง เช่น Polyurethane, Epoxy เป็นต้น
2. สารเสริมแรง (Reinforcement) คือ วัสดุที่ไม่มีความต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีขนาดอนุภาคที่เล็กกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้า หรือใช้เพื่อลดต้นทุนในการผลิต เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) คาร์บอนแบล็ค (Carbon black, CB) เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยแก้ว เป็นต้น

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านไฟฟ้าจะพบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า หากต้องการให้พอลิเมอร์คอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้ต้องเติมสารตัวเติมที่มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้า (Electrically conductive fillers) เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนแบล็ค เป็นต้น เมื่อสารตัวเติม

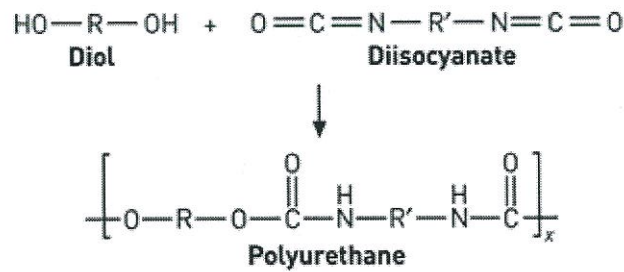
เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดการเรียงตัวเป็นโครงตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า (Conductive network) [4] ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การเรียงตัวเป็นโครงตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า [5]

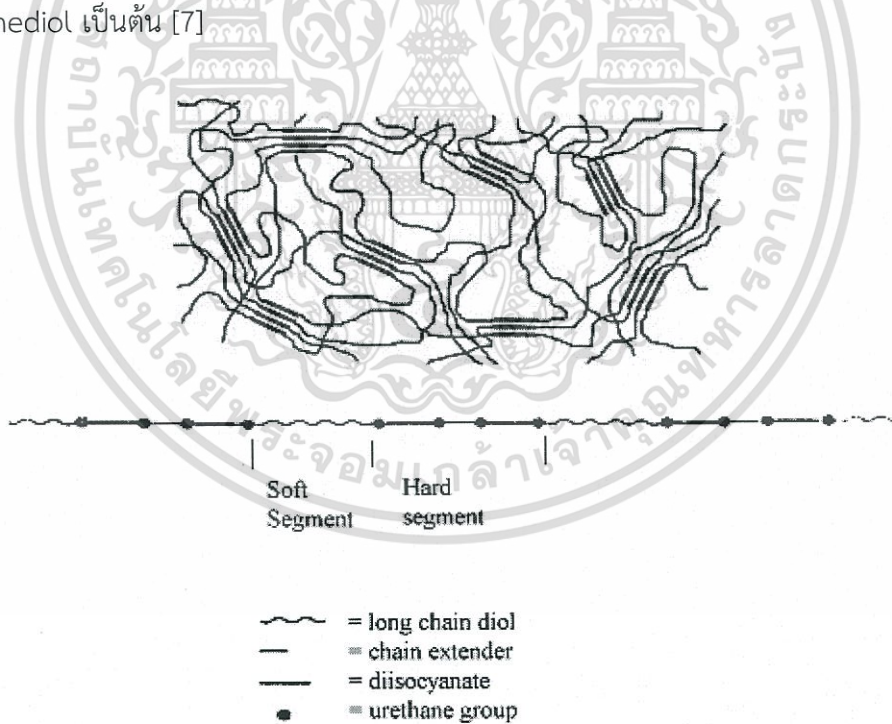
กลไกที่ทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระอย่างต่อเนื่องทั้งในและระหว่างโมเลกุลของอนุภาคสารตัวเติมที่มีสมบัติการนำไฟฟ้า โดยการเรียงตัวเป็นโครงตาข่ายอนุภาคการนำไฟฟ้านี้มีตลอดทั่วเมทริกซ์ จึงเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตจะขึ้นอยู่กับ การเชื่อมโยงกันของอนุภาคสารตัวเติม ปริมาณของอนุภาคสารตัวเติมที่เติมลงในเมทริกซ์ ซึ่งต้องมีปริมาณเกินกว่าสัดส่วนวิกฤตที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (Percolation threshold) ซึ่งเป็นจุดที่พอลิเมอร์คอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการนำไฟฟ้า [5]

ในงานวิจัยนี้เมทริกซ์ที่ใช้ คือ พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลดี ความแข็งแรงสูง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ระหว่างไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanates) กับไดออล (Diols) สมการดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยสามารถเลือกใช้หมู่ไฮโดรคาร์บอนของพอลิออล (Polyol) และไดไอโซไซยาเนตได้หลายชนิด โดยเฉพาะพอลิออลสามารถใช้โครงสร้างที่เป็นพอลิเอสเทอร์ (Polyester) และพอลิอีเทอร์ (Polyether) ทำให้ได้พอลิยูรีเทนที่มีสมบัติแตกต่างกัน โดยพอลิเอสเทอร์มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดี มีเสถียรภาพทางความร้อน และมีความต้านทานต่อน้ำมัน ส่วนพอลิอีเทอร์สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ดูดซึมน้ำได้ต่ำ ทำให้สามารถใช้งานได้ดีในสภาวะที่มีความชื้นสูง [6]



รูปที่ 1.3 สมการเกิด Polyurethane [6]

พอลิยูรีเทนจัดเป็นพลาสติกวิศวกรรมซึ่งสามารถเป็นได้ 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset) โดยในงานวิจัยนี้ใช้พอลิยูรีเทนประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymer) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 สามารถแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนนิ่ม (Soft segment) เป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น ประกอบด้วยส่วนที่เป็นพอลิเอสเตอร์ที่มีหมู่ปิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลหลายหมู่ เช่น Polyester polyol และ Polyether polyol เป็นต้น ส่วนโครงสร้างส่วนแข็ง (Hard segment) เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงประกอบด้วยส่วนที่เป็น Diisocyanates เช่น MDI, TDI และส่วน Chain extender เช่น 1,4-butanediol เป็นต้น [7]



รูป 1.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารตัวเติม (Filler) คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT) เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า แต่ข้อเสียมีราคาที่สูงจึงนำมาผสมกับคาร์บอนแบล็ค ซึ่งคาร์บอนแบล็คมีคุณสมบัติด้านการเสริมแรง เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป มีสมบัตินำไฟฟ้า และที่สำคัญมีราคาถูก จึงเป็นสารตัวเติมที่น่าสนใจในการนำมาผสมกับเมทริกซ์ สารตัวเติมเหล่านี้จะช่วยทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติที่ดียิ่งขึ้น

คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นเป็นวัสดุระดับนาโนที่มีความยาวออกไปใน 1 มิติ (1D nanomaterial) เกิดจากการซ้อนทับกันของแผ่นแกรฟีนมากกว่า 1 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.5 โดยแผ่นแกรฟีนมีโครงสร้างเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของคาร์บอนที่ต่อกันในระนาบเดียวกัน [8] คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรและความยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า ทำให้มีคุณสมบัติที่แข็งแรงกว่าเหล็กกล้า แต่มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นยังมีสมบัติเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า และมีสมบัตินำความร้อนที่ดีอีกด้วย [9]



รูปที่ 1.5 แผ่นแกรฟีนม้วนตัวซ้อนทับกันหลายชั้นเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น [10]

คาร์บอนแบล็คเป็นคาร์บอนที่อยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ หรือจากการแยกส่วนประกอบด้วยความร้อนของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นก๊าซหรือของเหลวภายใต้สภาวะควบคุม ลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียดสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 คาร์บอนแบล็คนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านการเสริมแรง เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า และที่สำคัญมีราคาถูกทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ [11]



รูปที่ 1.6 คาร์บอนแบล็ค [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ นิชนันท์ โตะมาจี และคณะ [12] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง MWCNT และ CB ใน PU นาโนคอมพอสิต โดยไม่ได้ควบคุมปริมาณสารตัวเติมคาร์บอนทั้งหมด พบว่าที่อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:7 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดทั้งใน PU-ester และ PU-ether ในงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาคอมพอสิตที่เติมสารตัวเติมเดี่ยว (CB หรือ MWCNT) กับสารตัวเติมผสม (CB และ MWCNT) ทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว ทำการกำหนดช่วงการศึกษาความเข้มข้นของสารตัวเติมที่ 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt และใช้อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 และ 1:7 ที่ โดยควบคุมปริมาณสารตัวเติมคาร์บอนรวมทั้งหมดทำการศึกษาผลกระทบที่จะเกิดกับสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และการกระจายตัวของ สารตัวเติมผสม MWCNT และ CB ในพอลิยูรีเทน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เปรียบเทียบพอลิยูรีเทนคอมพอสิตที่เติมสารตัวเติมเดี่ยว (CB หรือ MWCNT) กับ สารตัวเติมผสม (CB และ MWCNT) ที่อัตราส่วนและความเข้มข้นที่ต่างกันโดยศึกษาถึงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการนำไฟฟ้า และสัญญาณวิทยาของ PU นาโนคอมพอสิต
- 2) เปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของ ส่วนนึ่งที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PU, MWCNT และ CB และปัจจัยที่ส่งผลต่อ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุนาโนคอมพอสิต
- 2) เตรียม PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต โดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวด้วย เครื่อง Internal mixer กำหนดความเข้มข้นของสารตัวเติมรวมที่ 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt ที่อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 และ 1:7 โดยใช้พอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนึ่ง ที่แตกต่างกัน คือ Polyester และ Polyether
- 3) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการกดอัดด้วยเครื่อง Compression molding
- 4) ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิค Universal Testing Machine ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter และตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค FESEM

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง MWCNT และ CB ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้า
- 2) สามารถลดปริมาณสารตัวเติม MWCNT โดยการแทนที่ด้วย CB ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิต ลดต่ำลง

บทที่ 2

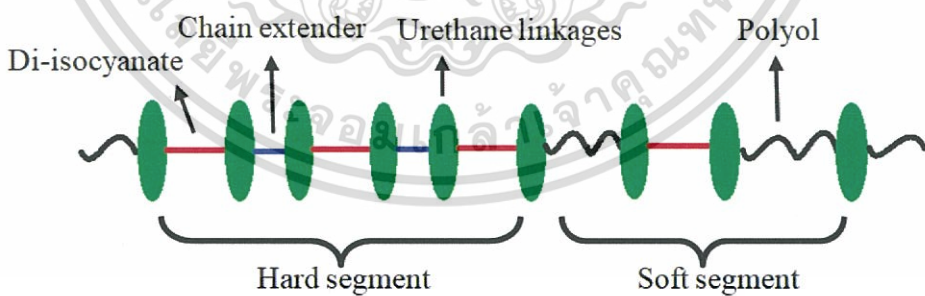
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนเป็นพลาสติกที่มี 2 ชนิด คือ เทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต สามารถผลิตออกมาหลายรูปแบบ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น เบาะรถยนต์ เฟอ์นิจเจอร์ ภาชนะเก็บของร้อนและเย็น และฉนวนกันความร้อนในตู้เย็น โดยพอลิยูรีเทนยังสามารถเตรียมเป็นโฟมที่ยืดหยุ่นหรือไม่ยืดหยุ่น และอีลาสโตเมอร์ได้อีกด้วย [13]

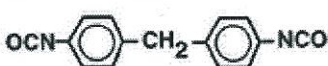
2.1.1 โครงสร้างของพอลิยูรีเทนและปฏิกิริยาพื้นฐาน

โครงสร้างพอลิยูรีเทนเป็น Block copolymer จึงสามารถทำให้มีสมบัติได้หลากหลาย อีกทั้งยังเป็นแบบชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic polyurethane, TPU) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็ง [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่างสารตั้งต้นพื้นฐานคือ Diisocyanate, Chain extender และ polyol ในตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสารตั้งต้นพื้นฐานที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา โดยไอโซไซยานตเป็นสารจำพวก Aromatic isocyanate ได้แก่ 2,4-โทลูอินไดไอโซไซยานต แนพทิลีนไดไอโซไซยานต และไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานต ส่วนพอลิโออลเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล (OH) จะใช้พอลิโออลที่มีความยืดหยุ่นได้แก่ พอลิอีเทอร์ พอลิเอสเทอร์ และพอลิพรพิลีนออกไซด์พอลิโออล จากการใช้สารตั้งต้นพื้นฐานที่หลากหลายจึงสามารถทำให้พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติที่หลากหลายตั้งแต่มีความอ่อนนุ่มจนถึงความแข็งแรงมาก โดยเกิดจากชนิดและปริมาณสัดส่วนระหว่าง ไดไอโซไซยานตและพอลิโออลในโมเลกุล โดยการที่มีปริมาณกลุ่มไอโซไซยานตที่สูงมีผลทำให้พอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงสูง [13]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Thermoplastic polyurethane

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักสารตั้งต้นของ Thermoplastic polyurethane [14]

| วัตถุดิบ | โครงสร้างทางเคมี |
|----------------|--|
| Isocyanate |  Methylene-bis(4-phenyl isocyanate), MDI |
| Macro-glycol | OH-polyester-OH OH-polyether-OH |
| Chain extender | HO-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -OH 1,4 butane diol |

2.1.1.1 โครงสร้างส่วนนิ่ม

โครงสร้างส่วนนิ่มมีความยืดหยุ่นสูงจัดเป็นส่วนอสัณฐาน (Amorphous phase) และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง โดยประกอบด้วยส่วนที่เป็น Polyol มีหมู่ปิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ตัวอย่าง Polyol มีดังต่อไปนี้ [15]

1. Polyester polyol

Polyester polyol เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง Di หรือ trifunctional polyol กับ Dicarboxylic acid หรือ Acid anhydride โดย Polyol ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ Glycerol, diethylene glycol, 1,4-Butanediol, 1,2-Propane diol และ Neopentyl glycol ส่วน Dicarboxylic acid ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ Glutaric acid, Succinic acid, Isophthalic acid และ Phthalic anhydride โดย Polyester polyol มีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ดี ทำให้มีความต้านทานต่อน้ำมัน (Oil resistance) และเสถียรภาพทางความร้อน (Thermo oxidative stability) เนื่องจาก Polyester มีขั้วจึงไม่ทำปฏิกิริยากับสารประเภทน้ำมัน เป็นสารที่ไม่มีขั้ว

2. Polyether polyol

Polyether polyol เกิดได้จากปฏิกิริยาระหว่าง Hydroxyl group กับ Cyclic ether โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ Glycerol (GLY), Bisphenol A (BPA), 1,2-propanediol (PG) และ Ethylene glycol (EG) โดย Polyether polyol สามารถนำมาใช้งานได้ดีในที่อุณหภูมิต่ำหรือที่มีความชื้นสูง เนื่องจาก Polyether เป็นส่วนที่ไม่มีขั้วไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและต้านทานต่อจุลินทรีย์

3. Polycarbonate polyol เกิดได้จากกระบวนการ Transesterification ทำปฏิกิริยาระหว่าง Dimethyl carbonate (DMC) หรือ Diphenyl carbonate (DPC) กับ Glycol ได้แก่ 1,6-Hexanediol โดย Polycarbonate polyol มีความทนทานต่อสภาพอากาศ มีความหนืดต่ำ และทนทานต่อกระบวนการ Hydrolysis ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Other polyol เกิดได้จากการสังเคราะห์โดย Polymer หรือ Oligomer ที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภท Carboxylic, Sulfhydryl, Hydroxyl และ Amine ตัวอย่าง Polyol อื่นๆ ได้แก่ Polysiloxane, Polyester amide, Polycetal, Alkyl resin และ Polythioether เป็นต้น

2.1.1.2 โครงสร้างส่วนแข็ง

โครงสร้างส่วนแข็งเป็นส่วน Crystalline phase เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงซึ่งประกอบด้วย Diisocyanate และ Chain extender สายโซ่ส่วนแข็งเกิดจากการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้มีความแข็งแรง ทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) และมอดูลัส (Modulus) สูง ลักษณะของส่วนประกอบโครงสร้างส่วนแข็ง มีดังนี้ [16]

1. Diisocyanate ที่มีความนิยมใช้ในการสังเคราะห์ TPU คือ 4,4-Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) เป็นสารประเภท Aromatic isocyanate มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ Hydroxyl ส่งผลให้พอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี

2. Chain extender ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวาง ส่งผลให้พอลิยูรีเทนทนทานต่อความร้อนและสารเคมีมากขึ้น ซึ่งทำปฏิกิริยากับ Diisocyanate เป็นส่วนผลึกช่วยเสริมความแข็งแรง Chain extender ที่นิยมใช้ คือ 1,4-Butanediol

2.1.2 การประยุกต์ใช้พอลิยูรีเทน

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ที่ทำขึ้นจากพอลิยูรีเทนมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพอลิยูรีเทนมีทนทานสูง ความยืดหยุ่น สามารถกันเสียง กันการรั่วซึมได้อย่างดีเยี่ยม เป็นฉนวนนำความร้อนได้ดี ราคาถูก และประสิทธิภาพในการใช้งานสูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าฉนวนประเภทอื่น ซึ่งพอลิยูรีเทนสามารถแบ่งออกตามการใช้งานได้เป็น 3 กลุ่ม ดังต่อไปนี้ [14]

1. โฟมนิ่มหรือโฟมยืดหยุ่น (Flexible foam) สามารถรองรับน้ำหนักได้ดี จึงนิยมนำมาทำเป็นเบาะรองรับสำหรับเฟอร์นิเจอร์ โฟมชนิดนี้ทนทานต่อตัวทำลายและความร้อนได้ดี
2. โฟมแข็ง (Rigid foam) คล้ายกับโฟมนิ่ม แต่มีองค์การเชื่อมโยงที่มากกว่า และมีความทนทานต่อแรงกด นิยมใช้สำหรับเสริมช่องว่างที่ต้องการน้ำหนักเบา เช่น ปีกเครื่องบิน ซึ่งโฟมชนิดนี้มีสมบัตินำความร้อนต่ำ จึงใช้เป็นฉนวนในกระติกน้ำแข็งหรือในตู้เย็น
3. ยางพอลิยูรีเทน (Polyurethane elastomer) มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง จึงสามารถนำไปเป็นล้อยางหรือยางกันกระแทก

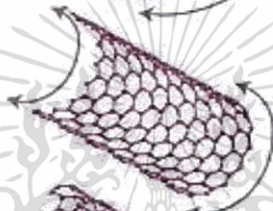
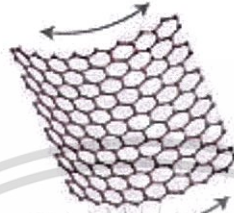
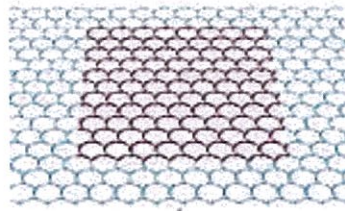
2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes)

2.2.1 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

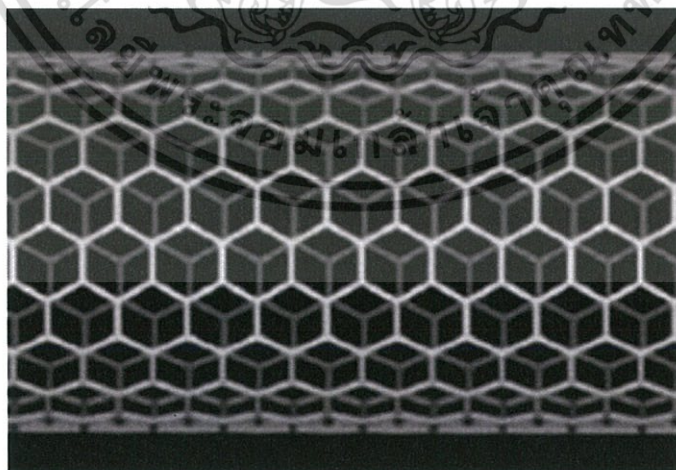
คาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นจากอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมจัดเรียงตัวกันเป็นแผ่น โดยมีการเชื่อมโยงกันเป็นตาข่ายรูปทรงหกเหลี่ยมมีลักษณะที่ม้วนตัวเข้าหากันเป็นท่อทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยอะตอมคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นตาข่ายด้วยพันธะโคเวเลนต์แบบ sp^2 ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถสังเคราะห์โครงสร้างของท่อให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.4–4 นาโนเมตร และมีความยาว 10 ไมโครเมตร [16] ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกค้นพบขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1991 โดยศาสตราจารย์ชาวญี่ปุ่นชื่อ ซุมิโอะ ลิจิมะ (Sumio Iijima) ที่ประเทศญี่ปุ่น ในขณะที่กำลังใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมาก สังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อยาวคล้ายรากไม้ โดยโครงสร้างของอะตอมสมมาตรและเป็นระเบียบ ซึ่งคาร์บอนนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิวป์ที่พบเป็นครั้งแรก คือ คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT) [17]



รูปที่ 2.2 ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการม้วนเข้าหากันคล้ายท่อทรงกระบอกของแผ่นแกรไฟีน [18]

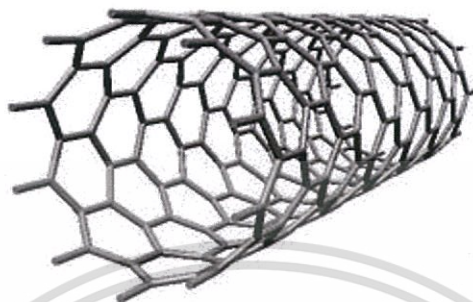


รูปที่ 2.3 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนภายในคาร์บอนนาโนทิวป์ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

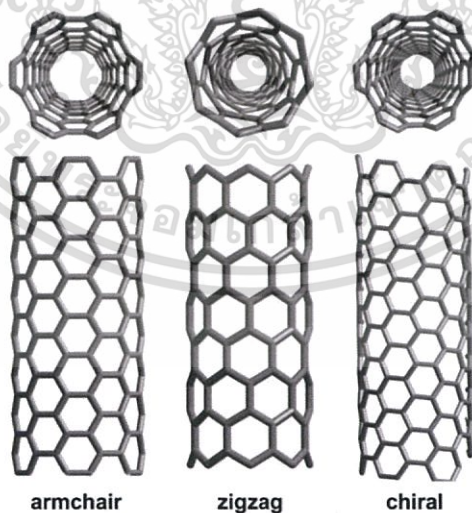
คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes, SWCNT) มีลักษณะก่อกว้างเกิดจากการม้วนแผ่นแกรฟีน 1 แผ่นในระนาบ 2 มิติ ให้เป็นท่อทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 นาโนเมตร [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว [20]

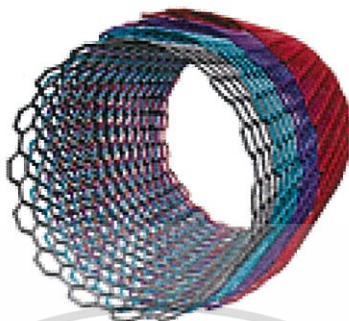
คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียวสามารถม้วนได้ 3 แบบ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะที่แตกต่างกัน ได้แก่ Zig-zag, Armchair และ Chiral โดยโครงสร้างแบบ Zig-zag เกิดจากวงอะโรมาติกต่อกันตามแนวสมมาตรในแกนนอน ขณะที่โครงสร้างแบบ Armchair เกิดจากวงอะโรมาติกต่อกันตามแนวสมมาตรในแกนตั้ง และโครงสร้างท่อแบบ Chiral เกิดจากการต่อกันของวงอะโรมาติกด้วยมุมอื่นต่างจากสองแบบแรก [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างการม้วนตัวในลักษณะต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT) มีลักษณะคล้ายกันกับคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว แต่มีการซ้อนทับของแกรฟีนมากกว่า 1 ชั้น โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกันและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-20 นาโนเมตร [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น [20]

2.2.2 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

2.2.2.1 สมบัติเชิงกล

โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นมาก เนื่องจากมีอัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุเหมาะแก่การใช้เป็นวัสดุเสริมแรง [8] ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากกว่าเหล็กถึง 60 เท่าและมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า [17]

2.2.2.2 สมบัติการนำไฟฟ้า

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีสมบัติเป็นวัสดุนำไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ได้ในทิศทางตามความยาวของท่อทิศทางเดียว และระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทานและไม่มีการชนกันของอิเล็กตรอน อีกทั้งยังมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือการนำไฟฟ้าได้เมื่อมีแรงภายนอกมากระตุ้น [22] สมบัติการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นผลมาจากทิศทางการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังท่อ ได้แก่ โครงสร้างท่อแบบ Armchair แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า โครงสร้างแบบ Zigzag แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกึ่งตัวนำไฟฟ้า และโครงสร้างแบบ Chiral จะมีสมบัติอยู่ระหว่างสองแบบแรก [8] นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีว่าทองแดง โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm² ขณะที่ทองแดงนำไฟฟ้าสูงสุดได้เพียง 10^6 A/cm² [23]

2.2.2.3 สมบัติทางความร้อน

คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 750°C ในสภาวะปกติ และ 2,800°C ภายใต้ภาวะสูญญากาศ อีกทั้งยังสามารถนำความร้อนได้สูงถึง 6000 W/mK ซึ่งมากกว่าเพชรและแกรไฟต์ที่สามารถนำความร้อนได้เพียง 2,000 W/mK [8]

2.2.3 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์

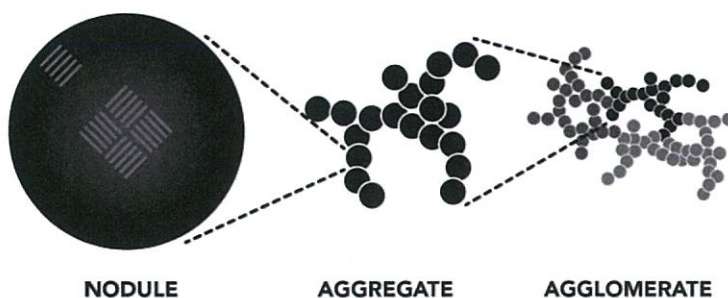
คาร์บอนนาโนทิวบ์มีสมบัติเชิงกลที่เหนือจากวัสดุอื่นจึงเหมาะนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์กีฬา เครื่องบิน และยานยนต์ เป็นต้น และจากคุณสมบัติที่สามารถนำความร้อนได้ดี อีกทั้งยังมีความสามารถในการเก็บประจุทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ นิยมนำมาใช้งานในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ แบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์ฉายภาพหรือจอภาพแบบแบน (Flat panel displays) และทรานซิสเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นหรือซูเปอร์คอนดักเตอร์ คือ ตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีแรงต้านทานไฟฟ้าเลย และกึ่งตัวนำไฟฟ้าหรือเซมิคอนดักเตอร์ได้อีกด้วย [24]

2.3 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)

คาร์บอนแบล็คหรือเขม่าดำเป็นสารตัวเติมนำไฟฟ้า (Electrically conductive filler) เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง เมื่อเติมสารตัวเติมชนิดนี้ลงในพอลิเมอร์จะช่วยให้พอลิเมอร์มีสมบัตินำไฟฟ้า คาร์บอนแบล็คเป็นคาร์บอนที่อยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลวในที่บรรยากาศหรือเกิดจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น คาร์บอนแบล็คนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านการเสริมแรง เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ราคาถูก แต่ไม่นิยมใช้กับงานบางชนิดที่ต้องการความสวยงามเนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพเป็นสีดำ [25]

2.3.1 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็คอธิบายถึงลักษณะการเกาะกลุ่มของอนุภาค คาร์บอนแบล็คมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ กลุ่มก้อนของอนุภาคที่ติดกันเรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregates) ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) เกิดจากการหลอมติดกันของอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า “โนดูล” (Nudules) หรือ Primary particle ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์บอนแบล็ค แต่ละโนดูลเกิดจากการเรียงตัวกันของชั้นแกรไฟต์เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมี แต่โครงสร้างของคาร์บอนแบล็คจะไม่เป็นระเบียบเหมือนแกรไฟต์ นอกจากนั้นแอ็กกรีเกตแต่ละกลุ่มยังสามารถจับตัวกันหลวมๆเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ด้วยแรงวานเดอร์วาลส์ เรียกว่า “แอ็กโกลเมอเรต” (Agglomerates) จัดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้จะถูกทำลายได้เมื่อให้แรงเฉือนที่มากพอในระหว่างการผสมจะทำให้แอ็กโกลเมอเรตแตกออกเป็นแอ็กกรีเกตขนาดเล็กจำนวนมาก [26] ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างปฐมภูมิของคาร์บอนแบล็คแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ โครงสร้างแบบต่ำ (Low structure) และโครงสร้างแบบสูง (High structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างแบบต่ำเป็นคาร์บอนแบล็คที่มีโนดูลเกาะกันอย่างเป็นระเบียบ รูปร่างกลมหรือค่อนข้างกลม ความหนาแน่นสูง ไม่มีกิ่งก้าน คาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างแบบสูงเป็นคาร์บอนแบล็คที่มีจำนวนโนดูลต่อหนึ่งแอ็กกรีเกตมากมาเกาะกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีความหนาแน่นต่ำ มีความเกาะกันเนื่องจากมีกิ่งมาก [26]



รูปที่ 2.8 คาร์บอนแบล็คโครงสร้างแบบต่ำ (Low structure) และโครงสร้างแบบสูง (High structure) [28]

2.3.2 ชนิดของคาร์บอนแบล็ค

สามารถแบ่งแยกตามวิธีการสังเคราะห์ได้ 3 ชนิด ดังต่อไปนี้ [26]

2.3.2.1 คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส (Furnace black)

คาร์บอนแบล็คชนิดนี้เป็นชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนที่มากเกินไป เกิดเป็นอากาศร้อนหมุนวนภายใต้เตาเผาบริเวณที่เผาไหม้ น้ำมันวัตถุดิบนิยมใช้เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่มีสารอะโรมาติกปริมาณมาก จะถูกฉีดเข้าไปเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์กลายเป็นกากคาร์บอน ลักษณะเป็นก้อนคาร์บอนแบล็คปริมาณมาก ซึ่งจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ คาร์บอนแบล็คมีโครงสร้างเป็นกลุ่มก้อนติดกันเรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregates) มีโครงสร้างสูง ขนาดเล็กประมาณ 10-100 นาโนเมตร และมีปริมาณออกซิเจนต่ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันอะตอมออกซิเจนบางประเภทหรือออกซิไฮโดรคาร์บอนปริมาณเล็กน้อย พื้นผิวของคาร์บอนแบล็คจึงเป็นต่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)

2.3.2.2 คาร์บอนแบล็คชนิดเทอร์มอล (Thermal black)

คาร์บอนแบล็คชนิดนี้เกิดจากการแตกตัว (Cracking) ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนที่บริเวณผิวร้อนภายในเตาเผาอุณหภูมิสูงได้เป็นคาร์บอนแบล็คที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ คาร์บอนแบล็คชนิดนี้มีลักษณะเป็นทรงกลม โครงสร้างน้อย พื้นผิวเรียบ และมีขนาดใหญ่ประมาณ 100-500 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 คาร์บอนแบล็คชนิดชั้นแนล (Channel black)

คาร์บอนแบล็คชนิดนี้ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติในเตาเผา ทำให้เกิดเขม่าเกาะสะสมที่ผิวภายในท่อเหล็กและยังมีขนาดเล็กประมาณ 1-3 นาโนเมตร การใช้คาร์บอนแบล็คชนิดนี้จะมีผลห่วงปฏิบัติการเชื่อมโยงเนื่องจาก มีความเป็นกรดจึงไม่นิยมใช้ใน ปัจจุบัน

ตารางการเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติต่างๆของคาร์บอนแบล็คทั้ง 3 ชนิด แสดงใน ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบลักษณะของคาร์บอนแบล็คแต่ละชนิด [26]

| ลักษณะ | Furnace | Thermal | Chanel |
|---|-----------|-----------|----------|
| ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size) (nm) | 10-100 | 100-500 | 1-3 |
| พื้นที่ผิว (Surface area) (m^2/g) | 27-145 | 7-11 | 100-1125 |
| ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) (%) | 0.3-2.8 | 0.1-1.0 | 3.5-16.0 |
| ความเป็นกรด-ด่าง (pH) | 5.0-9.5 | 7-9 | 3-6 |
| ปริมาณกำมะถัน (Sulfur) (%) | 0.5-1.5 | 10 ppm | 0-0.1 |
| การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) (ml/g) | 0.67-1.55 | 0.32-0.47 | 1.0-6.0 |

2.3.3 สมบัติของคาร์บอนแบล็ค

สามารถแบ่งแยกสมบัติของคาร์บอนแบล็คได้ตามปัจจัยดังต่อไปนี้ [26]

2.3.3.1 ขนาดของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็คที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพด้านการเสริมแรง จะทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่อนุภาคขนาดเล็กจะกระจายตัวได้ยากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน แอ็กโกเมอเรต ส่งผลให้ต้องใช้แรงเฉือนที่มากในการทำให้กลุ่มก้อนแตกตัวออกจากกัน

2.3.3.2 สมบัติทางเคมีของพื้นผิวของคาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็คประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 90-95% และมีองค์ประกอบอื่นอีก 5% ได้แก่ ออกซิเจนและไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวคาร์บอนแบล็คมีความแตกต่างกันมาก เพราะพื้นผิวของคาร์บอนแบล็คประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีที่หลากหลาย เช่น บริเวณริมแผ่นแกรไฟต์ (Graphite basal planes) โดยเฉพาะในคาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนสและชั้นแนล ซึ่งจะพบหมู่ฟังก์ชันที่มีอะตอมออกซิเจน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl), ฟีนอล (Phenol), ควิโนน (Quinone) และ แลคโตน (Lactone) โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสมหรือการขึ้นรูป เนื่องจากในการผสมที่เกิดแรงเฉือนสูงอาจเกิดการขาดกันของสายโซ่โพลีเมอร์แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ปลายสายโซ่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อกิ่งเกิดเป็นพันธะเคมีเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนแบล็ค

2.3.3.3 ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างแบบสูงจะมีโครงสร้างซับซ้อนมีกิ่งก้านและช่องว่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็ค ทำให้สายโซ่โพลีเมอร์สามารถแทรกตัวระหว่างโครงสร้างเกิดการยึดติดที่ดีกับคาร์บอนแบล็ค

2.3.4 การประยุกต์ใช้คาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็คสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้ [29]

1. อุตสาหกรรมยาง โดยใช้เป็นสารตัวเติมในยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง เช่น ยางชั้นใน ตัวเนื้อยาง และผนังของยาง เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยนำความร้อนออกไปจากดอกและเข็มขัดของยาง เพื่อลดความเสียหายจากความร้อนและยืดอายุยาง

2. อุตสาหกรรมหมึกพิมพ์และหมึกเคลือบ คาร์บอนแบล็คที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมนี้ ต้องเป็นชนิดที่ออกซิไดซ์ด้วยกรดหรือชนิด Acid oxidized โดยกรดจะถูกนำมาพ่นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะมีจำนวนของพันธะออกซิเจนบนพื้นผิวของคาร์บอนแบล็คเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในการเป็นหมึกสีและหมึกเคลือบมากกว่าชนิดอื่น

3. การป้องกันไฟฟ้าสถิต คาร์บอนแบล็คมีโครงสร้างที่เป็นผลึกแกรไฟต์ ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า ที่ดีและยังเป็นสารที่ป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต จึงสามารถนำมาผลิตเป็นตัวป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ เช่น ฝาครอบเชื้อเพลิงและท่อน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ เป็นต้น [30]

4. อุตสาหกรรมพลาสติก เมื่อเติมคาร์บอนแบล็คลงไปในพลาสติกจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพลาสติกและมีสมบัติที่ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต เช่น สายไฟ ท่อ ถุงขยะสีดำ เป็นต้น [30]

2.4 วัสดุนาโนคอมพอสิต

2.4.1 ความหมายของนาโนคอมพอสิต

วัสดุผสมระดับนาโน (Nanocomposite) เป็นโครงสร้างระดับนาโนที่มีเนื้อวัสดุหลายชนิดผสมกัน (Multiphase material) โดยมีเนื้อวัสดุหนึ่งชนิดหรือหลายเนื้อวัสดุเป็นโครงสร้างที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 1 – 100 นาโนเมตร ซึ่งส่วนมากนาโนคอมพอสิตเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเนื้อวัสดุจำนวน 2 ชนิดขึ้นไป

วัสดุระดับนาโนที่สามารถเติมลงไปเพื่อสร้างเป็นนาโนคอมพอสิต เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ Buckminsterfullerene แผ่นกราฟไฟต์ เส้นใยนาโนคาร์บอน เส้นใยธรรมชาติ ซึ่งวัสดุเหล่านี้สามารถทำให้นาโนคอมพอสิตเพิ่มขีดความสามารถด้านการนำไฟฟ้า การนำความร้อน สมบัติเชิงกล มีค่าโมดูลัสและความแข็งแรงสูง และมีสมบัติทางแสงที่ดีไม่กระเจิงแสง อีกทั้งมีการนำมาใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกหรือวัสดุที่สามารถกักน้ำหรือของเหลวได้ เป็นต้น [31]

2.4.2 ประเภทของนาโนคอมพอสิต

นาโนคอมพอสิตสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้ [32]

1. วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายชนิดแยกชั้นกัน (Nanolayers composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากเนื้อของวัสดุหลายชนิดมีการแบ่งเป็นชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีขนาดในระดับนาโนเมตร

2. วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายชนิดแยกเส้นใย (Nanofilamentary composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากพื้นผิวที่มีการผสมเส้นใยขนาดระดับนาโนเมตรฝังตัวลงภายในโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกอนุภาค (Nanoparticulate composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากพื้นผิวที่มีการผสมอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตรฝังตัวลงภายในโครงสร้าง

2.5 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า

พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า (Electrically conductive polymer composites, ECPCs) เป็นวัสดุที่ได้จากการผสมกันระหว่างวัสดุพอลิเมอร์ทั้ง Thermoplastic และ Thermoset ซึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้ากับสารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนแบล็ค แกรไฟต์ เส้นใยคาร์บอน และผงโลหะ เป็นต้น เมื่อวัสดุทั้งสองชนิดผสมกัน ส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติในการนำไฟฟ้า [33] เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องในโครงสร้างโมเลกุลของอนุภาคการนำไฟฟ้าและเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการนำไฟฟ้าในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต จึงทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจนเกิดเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้า (Conductive network) ทั่วเมทริกซ์ ซึ่งปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงไปผสมในเมทริกซ์ต้องมีปริมาณเกินกว่าสัดส่วนวิกฤติ (Critical volume fraction) ที่เรียกว่า สัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (Percolation threshold) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุคอมพอสิตจะเปลี่ยนสมบัติจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้า ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิตลดลงอย่างรวดเร็ว [8]

2.5.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ทฤษฎีกลไกการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยมีการกระจายตัวแบบสุ่มของสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ทฤษฎี ได้แก่ [8]

1. ทฤษฎี Conductive path การสร้างโครงข่ายนำไฟฟ้าหรือสายโซ่การนำไฟฟ้าของสารตัวเติมที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่เติมลงในเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งด้วยโครงข่ายนำไฟฟ้าของสารตัวเติมเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า ซึ่งโครงข่ายนำไฟฟ้าเกิดจากการสัมผัสหรือติดกันของอนุภาคสารตัวเติม ดังนั้นปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้เมื่อสัดส่วนของสารตัวเติมสูงกว่าสัดส่วนวิกฤติ (Critical concentration หรือ Percolation limit)

2. ทฤษฎี Electron tunneling อิเล็กตรอนกระโดดข้ามผ่านช่องว่างผ่านตัวกีดขวาง (Barrier) ระหว่างองค์ประกอบของเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ ส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าซึ่งระยะห่างระหว่างช่องว่างอยู่ในช่วงที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดได้ (ระดับนาโนเมตร) ทฤษฎีนี้มีความแตกต่างจากทฤษฎีแรกหรือ Conductive path คือ สัดส่วนสารตัวเติมวิกฤติของทฤษฎีนี้จะน้อยกว่าสัดส่วนวิกฤติ

3. ทฤษฎี Electric field radiation การให้สนามไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบหรือช่องว่างของอนุภาคสารตัวเติม ทำให้เกิดการไหลของประจุ ส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้า แต่ทฤษฎีนี้ใช้ได้เมื่อสัดส่วนของสารตัวเติมน้อยกว่าสัดส่วนวิกฤติและการใช้ทฤษฎีนี้เป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อปริมาณสารตัวเติมสูงที่อุณหภูมิสูง

2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีหลายปัจจัย ดังต่อไปนี้ [29]

1. สารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น สารตัวเติมกลุ่มคาร์บอน (Carbonaceous fillers) โดยคาร์บอนแต่ละรูปแบบก็จะมีค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนแบล็คมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^2 S/cm, เส้นใยคาร์บอนจาก Pitch มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^4

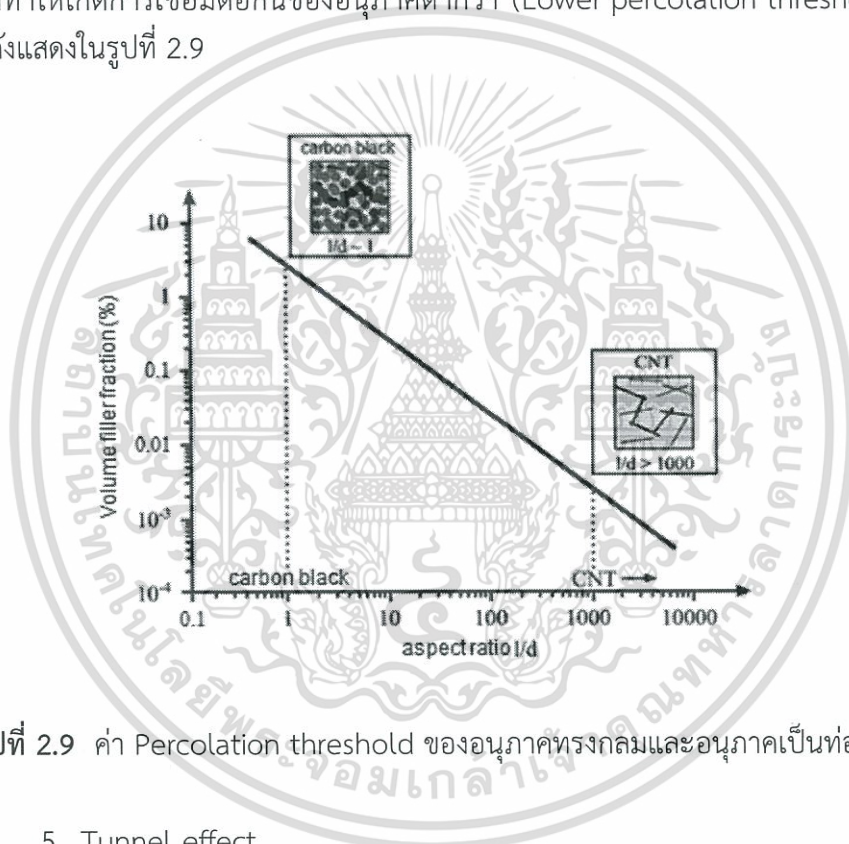
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S/cm และแกรไฟต์ (Graphite) มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^5 S/cm เป็นต้น

2. กระบวนการขึ้นรูปคอมพอลิติกจะมีผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารตัวเติม โดยการจัดเรียงตัวแบบสุ่มจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคได้ดีกว่าการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ซึ่งมีผลต่อทิศทางการนำไฟฟ้าของคอมพอลิติก

3. สมบัติของผิวหน้า โดยพลังงานอิสระของผิวหน้าของสารตัวเติมและเมทริกซ์มีอิทธิพลต่อการสัมผัสกันระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งวัสดุที่มีค่าพลังงานผิวหน้าอิสระต่างกันน้อยสามารถสัมผัส เข้ากันได้ดีกว่าพลังงานผิวหน้าอิสระที่ต่างกันมาก ทำให้มีค่าสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคที่มากกว่าสารตัวเติมกับเมทริกซ์เข้ากันได้ดี

4. ขนาดของอนุภาค อนุภาคที่เป็นท่อนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าและมีค่าความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio, l/d) ที่มากกว่าอนุภาคทรงกลม (Spherical particles) ส่งผลให้มีสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคต่ำกว่า (Lower percolation threshold) อนุภาคทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ค่า Percolation threshold ของอนุภาคทรงกลมและอนุภาคเป็นท่อ [34]

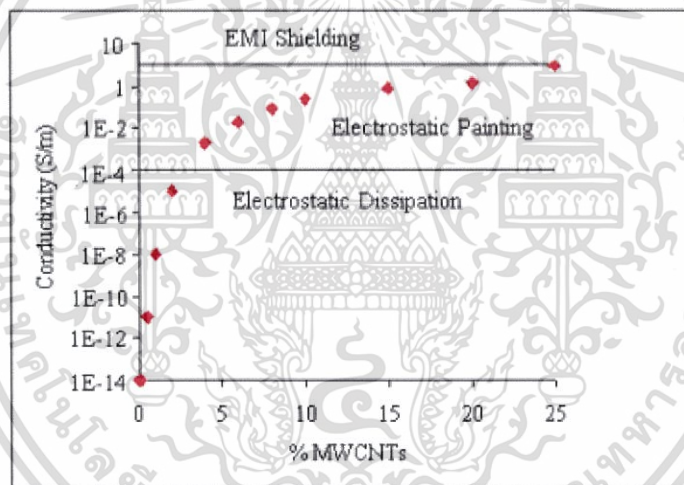
5. Tunnel effect

ปัจจัยนี้เป็นลักษณะการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่เป็นท่อ ผนังมีความบางในระดับนาโนเมตร พบว่าอิเล็กตรอนบางส่วนสามารถเกิด Tunneling โดยอิเล็กตรอนสามารถข้ามผ่านมาอีกฝั่งหนึ่งของผนังกันได้ [35]

2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ผลกระทบของ MWCNT ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล

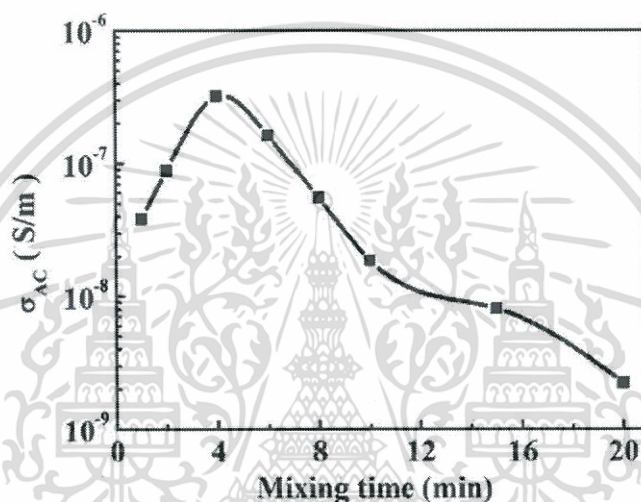
Hoang [36] ได้ทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มพอลิยูรีเทน (PU) คอมพอสิตที่ผสมสารตัวเติมเดี่ยว MWCNT โดยกำหนดช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 25 %wt วัสดุคอมพอสิตถูกเตรียมโดยวิธีการบดด้วยเครื่อง Planetary ball mill เป็นเวลามากกว่า 1 ชั่วโมง 30 นาที เพื่อให้ MWCNT กระจายตัวได้ดีใน PU เรซิน จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 2.5 %wt ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 10 magnitude เมื่อเทียบกับฟิล์ม PU ที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก MWCNT เชื่อมต่อกันจนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่องจึงเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้น และที่ปริมาณความเข้มข้น MWCNT 20 %wt ขึ้นไปมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 10 S/cm ซึ่งอยู่ในช่วง Electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE) คือช่วงที่วัสดุมีประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวัสดุคอมพอสิตจะไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก ส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณของ MWCNT ของฟิล์ม PU คอมพอสิต (จากงานวิจัยของ Hoang [36])

Huang และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT ที่ส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตในพอลิเมอร์ผสมแบบ Co – continuous immiscible blend ระหว่าง PLA/PCL (Poly(lactic acid)/Poly(ϵ -caprolacton)) โดยทำการเติมปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT ที่ 0.01 ถึง 1.5 %wt ใน PLA/PCL ที่อัตราส่วน 50:50 โดยใช้วิธีการผสมแบบหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 180°C โดยแบ่งการผสมเป็น 2 ขั้นตอนคือ นำ PLA ผสม MWCNT เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำ PLA/MWCNT ไปผสมกับ PCL ที่ความเร็วสกรูเป็น 80 rpm มีช่วงเวลาการผสมเป็น 1, 4, 8 และ 20 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 10 นาที จากการศึกษาพบว่าเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการผสม PLA/PCL/0.25 %wt MWCNT คอมพอสิต คือ 4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาที่ เนื่องจาก MWCNT กระจายตัวอยู่ที่ระหว่างภูมิภาค PLA และ PCL นำไปสู่การเกิดโครงสร้างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้าได้ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการผสมมากกว่า 4 นาที พบว่าค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจาก MWCNT เกิดการกระจายตัวในส่วน PCL มากกว่าในส่วน PLA ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ 4 นาที ในการผสม PLA/PCL/MWCNT คอมพอสิต เพื่อให้เกิดค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.11 นอกจากนั้นพบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT เพิ่มขึ้นในคอมพอสิตที่ทำการผสมที่เวลา 4 นาที มีค่าการนำไฟฟ้าและมอดุลัสสะสม (Storage modulus) เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณความเข้มข้น MWCNT ที่ 0.025 %wt จะเกิดการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้า 2 magnitude แสดงถึงการเกิดโครงสร้างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า ซึ่งมีค่าต่ำกว่าทั่วไปอันเป็นผลจากการกระจายตัวที่ระหว่างภูมิภาคของ MWCNT นั้นเอง



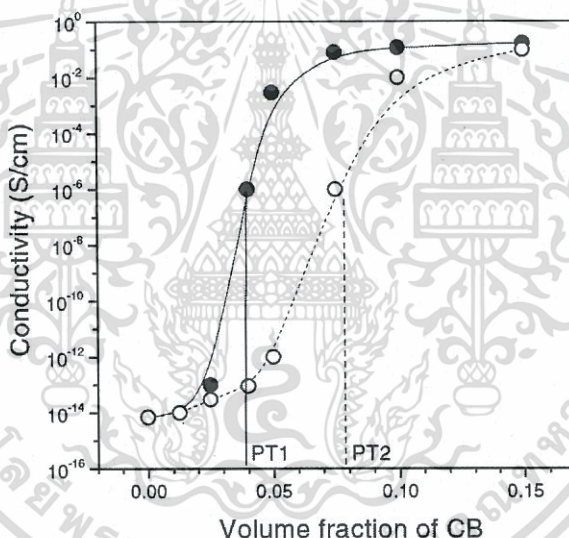
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการผสม PLA/PCL /0.25 %wt MWCNT คอมพอสิต (จากงานวิจัยของ Huang และคณะ [37])

2.6.2 ผลกระทบของการใช้ CB ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล

Marhoon [38] ได้ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ CB (ชนิด N900 ซึ่งเป็นคาร์บอนแบล็คชนิดที่มีโครงสร้างแบบสูง) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ PU คอมพอสิต โดยทำการเติม CB ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 %wt ลงใน PU เรซิน โดยใช้เครื่อง Ultrasonic wave bath ในการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงเติม Hardener ลงไป และนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบ จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นและการกระจายตัวของ CB มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PU คอมพอสิต เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CB ส่งผลให้ค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness) และความหนาแน่น (Density) เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) สูงที่สุดที่ CB ปริมาณ 6 %wt และที่ CB ปริมาณ 4 %wt มีค่า ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงที่สุด ส่วนค่าความแข็งต่อการกระแทก (Impact strength) มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า Tensile strength เนื่องจาก CB กระจายตัวได้ดีใน PU คอมพอสิตและมีแรงยึดเหนี่ยวกับ PU ที่ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CB ส่งผลให้ CB มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะที่ลดลงและเกิดการรวมตัวจับเป็นกลุ่มก้อน จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยของ Zhang และคณะ [39] ที่ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ CB ใน PP (Polypropylene) คอมพอสิต และ PP/Ethylene vinyl acetate (EVA) คอมพอสิต ทำการเตรียมคอมพอสิตด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185°C มีความเร็วสกรู 40 rpm เป็นเวลา 10 นาที ที่ปริมาณความเข้มข้นของ CB ที่ 0 ถึง 0.15 %vol แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นที่อุณหภูมิ 190°C จากการศึกษาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของ Ternary CB/PP/EVA คอมพอสิต และ Binary CB/PP คอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของ CB เพิ่มขึ้น ใน Ternary CB/PP/EVA คอมพอสิต มีค่า Percolation threshold เท่ากับ 3.8 vol% อีกทั้งยังมีค่าการนำไฟฟ้าที่ปริมาณความเข้มข้นของ CB ช่วง 0.05 ถึง 0.1 %vol สูงกว่า Binary CB/PP คอมพอสิต ที่มีค่า Percolation threshold เท่ากับ 7.8 %vol ดังแสดงในรูป 2.12 เนื่องจาก EVA ส่งเสริมให้เกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้า ส่งผลให้ค่า Percolation threshold ที่ต่ำและมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเมื่อเติม CB และ EVA ลงไปส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) และ Melting enthalpy (ΔH_m) ลดลง เนื่องจากความเป็นผลึกของ PP ลดลง อีกทั้ง Tensile strength และ Elongation at break มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CB ที่มากเกินไป ส่งผลให้คอมพอสิตเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง



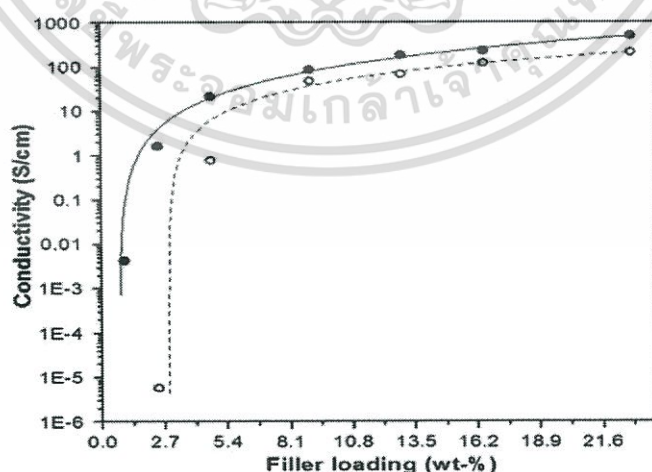
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณความเข้มข้นของ CB ของ CB/PP/EVA คอมพอสิต (●) และ CB/PP คอมพอสิต (○) (จากงานวิจัยของ Zhang และคณะ [39])

2.6.3 เปรียบเทียบผลกระทบ MWCNT หรือ CB ต่อสมบัติการนำไฟฟ้า

Ramo'a และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของ PU คอมพอสิต ที่ผสมสารตัวเติมเดี่ยว MWCNT และ CB โดยกำหนดช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 12 %wt และ 0 ถึง 15 %wt ตามลำดับ วัสดุคอมพอสิตถูกเตรียมโดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว ในกระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิเท่ากับ 180 °C ความเร็วสกรูเท่ากับ 50 rpm เป็นเวลา 15 นาที จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 1 %wt ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 5 magnitude และเมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 3 %wt ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 10 magnitude เมื่อเทียบกับ PU ที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของ CB คอมพอสิตเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเช่นเดียวกับ MWCNT แต่ต้องเพิ่มความเอกซอร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นในปริมาณมากกว่า MWCNT เพื่อให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจาก MWCNT มี Aspect ratio สูง และมีการกระจายตัวได้ดีใน PU เมทริกซ์ ส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่มากกว่า CB ค่า Percolation threshold ของ PU/MWCNT และ PU/CB คอมพอสิตเท่ากับ 1.0 %wt และ 1.7 %wt ตามลำดับ ส่วน CB คอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่า Percolation threshold ต่ำกว่า CB-filled binary คอมพอสิตทั่วไปสืบเนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นแบบ Multiphase จึงทำให้ค่า Percolation threshold ต่ำ โดยอนุภาค CB อาจกระจายอยู่ในวัฏภาคใดวัฏภาคหนึ่งหรือ CB อาจกระจายตัวอยู่ระหว่างพื้นผิวของ 2 วัฏภาค (Interface) คือ Polyester เป็นวัฏภาคส่วนนิ่ม และ Diisocyanate เป็นวัฏภาคส่วนแข็ง ส่วนค่า Critical exponent ของ TPU/MWCNT คอมพอสิตมีค่าสูงกว่า PU/CB คอมพอสิต คือ 4.2 และ 2.1 %wt ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยของ Andreoli และคณะ [41] ที่ทำการศึกษาปริมาณ CB ที่ใช้แทน MWCNT ในสารเคลือบ PU โดยที่ยังคงค่าการนำไฟฟ้าที่สูง ทำการผสมผง PU, MWCNT (สำหรับ PU/MWCNT คอมพอสิต) หรือ CB (สำหรับ PU/CB คอมพอสิต) ที่ความเข้มข้น 5 phr และตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับ N-methylpyrrolidinone (NMP) ที่อัตราส่วน 3:1 v/v ด้วยเครื่อง Bath sonication ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปั่นจนให้สารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง VWR ultrasonic cleaner 15 นาที แล้วปล่อยให้แห้งบนสไลด์แก้ว ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าสารเคลือบนาโนคอมโพสิตสามารถเตรียมได้ในน้ำโดยไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว แต่ใช้ NMP เป็นตัวช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ MWCNT หรือ CB ปริมาณน้อยสุดที่ทำให้เกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้า (Conductive pathways) เท่ากับ 0.8 และ 2.9 %wt ตามลำดับ และมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่ 500 และ 200 S/cm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า MWCNT สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า CB เนื่องจาก MWCNT มี Aspect ratio สูงกว่า CB เมื่อเติม MWCNT จึงเกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้าในคอมพอสิตได้ดี ส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าดีขึ้น เมื่อพิจารณาทั้ง PU/MWCNT และ PU/CB คอมพอสิต พบการอิมพัลส์ของค่าการนำไฟฟ้าที่สารตัวเติมปริมาณสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสามารถใช้ CB ทดแทน MWCNT ได้โดยที่ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้ายังคงเดิม และมีราคาต้นทุนที่ต่ำลง



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณสารตัวเติม PU/MWCNT (●) และ PU/CB (○) คอมพอสิต (จากงานวิจัยของ Andreoli และคณะ [41])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

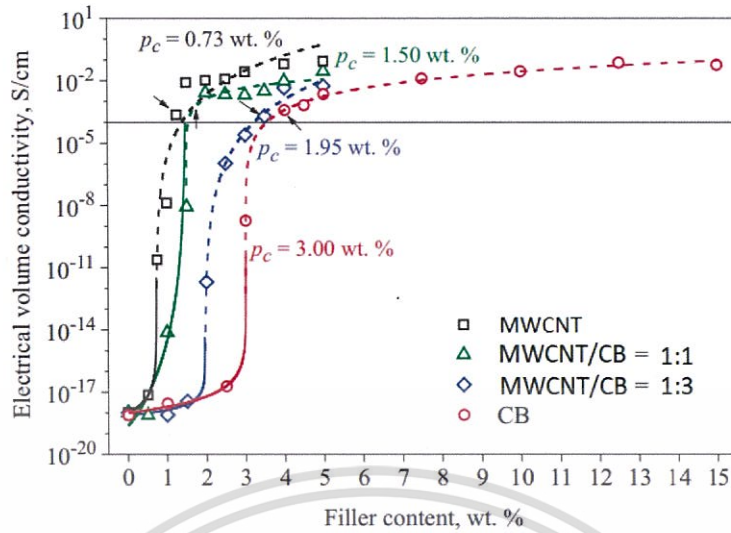
2.6.4 ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมผสมระหว่าง MWCNT และ CB ต่อสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา

นิชนันท์ และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการเติม MWCNT และ CB ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมพอสิต ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้า โดยทำการเติม MWCNT:CB อัตราส่วน 1:1, 1:3, 1:5 และ 1:7 ที่ปริมาณความเข้มข้น MWCNT 0.3, 0.4 และ 0.5 %wt โดยมีโครงสร้างส่วนเติมที่แตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) ด้วยวิธีผสมแบบหลอมเหลว ซึ่ง PU-ester ใช้อุณหภูมิ 200°C ส่วน PU-ether ใช้อุณหภูมิ 210°C ความเร็วสกรู 60 rpm ในการผสม และนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีกดอัดเป็นแผ่น จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นและการกระจายตัวของ MWCNT และ CB อัตราส่วน 1:7 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดทั้งใน PU-ester และ PU-ether เมื่อเติม CB ลงในนาโนคอมพอสิต พบว่า CB มีความสามารถในการสร้างโครงสร้างเชื่อมโยงกับ MWCNT เกิดเป็นเส้นทางนำไฟฟ้า ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิต และ PU-ether นาโนคอมพอสิต พบว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต มี MWCNT และ CB กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง แต่ PU-ether นาโนคอมพอสิต มี MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่ม และ CB กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิตสูงกว่า PU-ether นาโนคอมพอสิต นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ MWCNT และ CB สารตัวเติมทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวใน PU เมทริกซ์ได้ดี และค่า Young's modulus ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต และ PU-ether นาโนคอมพอสิตมีแนวโน้มสูงขึ้น

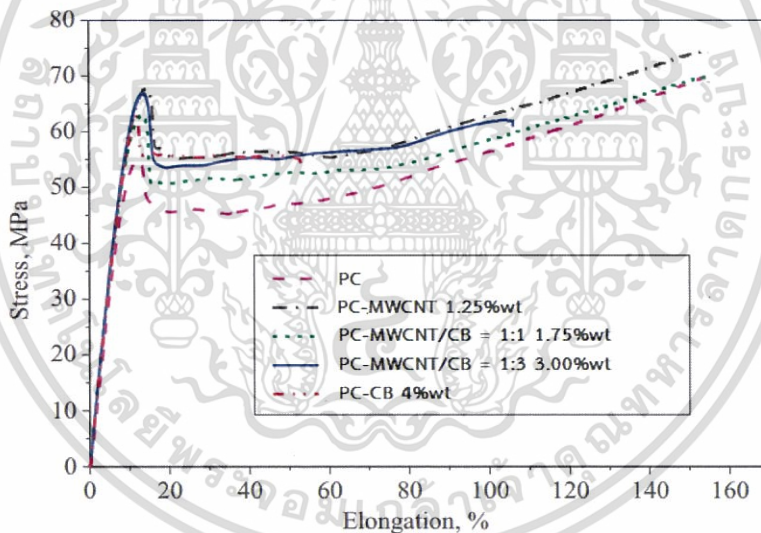
Potschke และคณะ [42] ได้ทำการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอนเนต (PC) คอมพอสิตที่เติมสารตัวเติม MWCNT และ CB โดยทำการเติม MWCNT:CB อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ความเข้มข้น 0.5 ถึง 5 %wt ลงใน PC ด้วยวิธีผสมแบบหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 280°C ความเร็วสกรู 50 rpm เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นอัดขึ้นรูปเป็นแผ่น จากการศึกษาพบว่าค่า Percolation threshold ของ PC/MWCNT คอมพอสิตเท่ากับ 0.73 %wt PC/MWCNT/CB คอมพอสิตที่ 1:1 เท่ากับ 1.50 %wt PC/MWCNT/CB คอมพอสิตที่ 1:3 เท่ากับ 1.95 %wt และ PC/CB คอมพอสิตเท่ากับ 3 %wt จะเห็นได้ว่าในคอมพอสิตของสารตัวเติมเดี่ยว MWCNT มีค่าจุดนำไฟฟ้าต่ำกว่า CB เนื่องจาก MWCNT มีค่า Aspect ratio สูงกว่า CB ส่วนคอมพอสิตสารตัวเติมผสมระหว่าง CB กับ MWCNT มีค่าจุดนำไฟฟ้าต่ำกว่า CB คอมพอสิต เนื่องจาก CB แทรกตัวระหว่างปลายท่อ MWCNT ทำให้เกิดเส้นทางนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา PC/MWCNT/CB คอมพอสิตที่ปริมาณความเข้มข้นของสารตัวเติมต่ำ (1 ถึง 3 %wt) ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจาก MWCNT และ CB เกิด Synergistic effect (สารเคมี 2 ชนิดเกิดการเสริมฤทธิ์กันอย่างยิ่งยวด) แต่จะไม่พบการเกิด Synergistic effect ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารตัวเติมสูง (5 %wt ขึ้นไป) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

เมื่อพิจารณาด้านสมบัติเชิงกลของ MWCNT/CB คอมพอสิตพบว่า MWCNT/CB คอมพอสิตที่อัตราส่วน 1:1 มีค่าการทนแรงดึงและความเหนียวใกล้เคียงกับ MWCNT คอมพอสิต ในขณะที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าการทนแรงดึงใกล้เคียงกับ MWCNT คอมพอสิต แต่มีความเหนียวต่ำกว่า ส่วน CB คอมพอสิต มีค่าการทนแรงดึงและความเหนียวต่ำกว่าทั้ง MWCNT และ MWCNT/CB คอมพอสิต เนื่องจากปริมาณ CB ที่เติมลงในเมทริกซ์เพิ่มขึ้น CB จะเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้คอมพอสิตมีความเหนียวลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



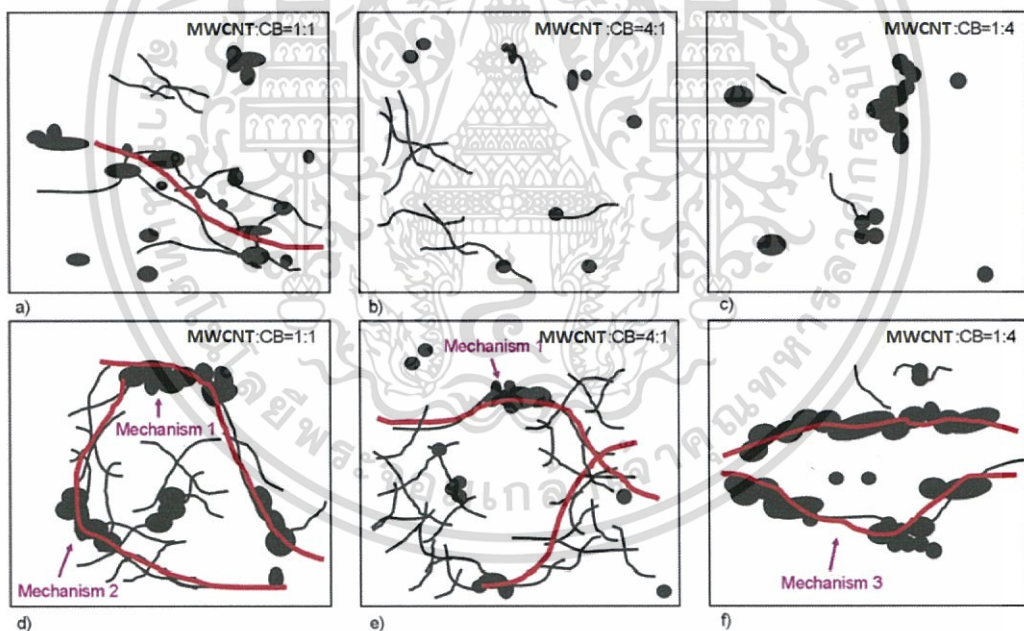
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงผลของสารตัวเติมแต่ละชนิดต่อค่าการนำไฟฟ้า (จากงานวิจัยของ Potschke และคณะ [42])



รูปที่ 2.15 กราฟ Stress-Strain ของคอมพอสิตที่มีค่าการนำไฟฟ้า 10^{-4} s/cm (จากงานวิจัยของ Potschke และคณะ [42])

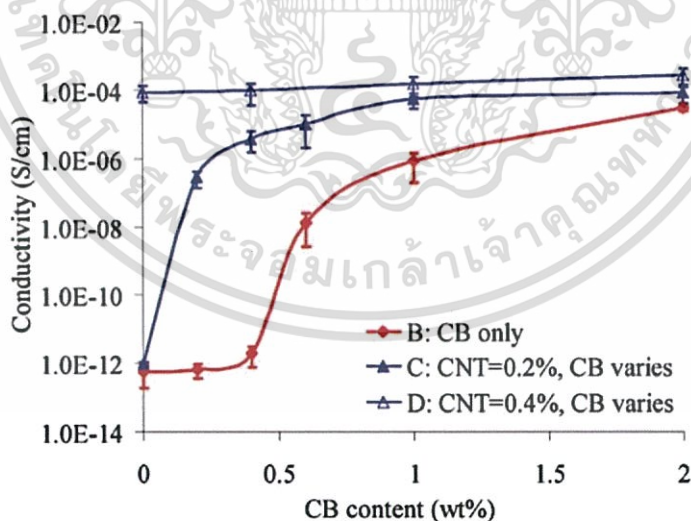
Zhang และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาการสร้างเครือข่ายนำไฟฟ้าของสารตัวเติมผสมระหว่าง MWCNT กับ CB ในโคพอลิเมอร์ Polypropylene copolymer (Co-PP) โดยทำการเตรียม Masterbatch ที่ผสมระหว่าง Co-PP กับ MWCNT:CB อัตราส่วน 1:1, 1:4 และ 4:1 ด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 200°C ความเร็วสกรู 100 rpm เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการเตรียม Conductive polymer composites (CPCs) โดยผสม Masterbatch กับ Maleic anhydride ที่ต่อกิ่งด้วย Polypropylene อัดขึ้นรูปเป็นฟิล์มความหนาประมาณ $200\ \mu\text{m}$ อุณหภูมิ 200°C ความดัน 20 MPa เป็นเวลา 5 นาที จากการศึกษาพบว่าค่า Percolation threshold ของ MWCNT เวกสารเป็นเวกสารที่ส่งแรงไหลหรือการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ระดับขั้นตอนการการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพอสิตเท่ากับ 2.4 %wt CB คอมพอสิตเท่ากับ 4 %wt และ MWCNT/CB คอมพอสิตที่ 1:1 เท่ากับ 0.21 %wt ที่ 4:1 เท่ากับ 1.8 %wt ที่ 1:4 เท่ากับ 3.2 %wt สังเกตได้ว่าเมื่อแทนที่ครึ่งหนึ่งของปริมาณ MWCNT ด้วย CB ค่า Percolation threshold ลดลงอย่างมากจาก 2.4 %wt เป็น 0.21 %wt เนื่องจาก MWCNT และ CB เกิด Synergistic effect ต่อกัน โดย CB เข้าไปแทรกกระหว่างปลายท่อของ MWCNT ทำให้เกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่การที่จะเกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้าจะต้องมีปริมาณสารตัวเติมที่เพียงพอ ดังนั้นที่ความเข้มข้นของสารตัวเติมต่ำ (ดังแสดงในรูป 2.16 a, b และ c) MWCNT:CB อัตราส่วน 1:1 จึงสามารถเกิดเส้นทางนำไฟฟ้าได้เล็กน้อย อัตราส่วน 4:1 MWCNT เกิดการพันกันเอง จึงไม่เกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้า อัตราส่วน 1:4 ปริมาณ MWCNT ต่ำเกินไป จึงไม่ทำให้เกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้า แต่ที่ความเข้มข้นของสารตัวเติมสูง (ดังแสดงในรูป 2.16 d, e และ f) เกิดการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้า 3 แบบ คือ 1. CB เข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างปลาย MWCNT 2. CB เข้าไปเกาะบน MWCNT ที่เป็นส่วนเชื่อมของเส้นทางนำไฟฟ้าอยู่แล้ว และ 3. กลุ่มก้อนของ CB ไปเกาะบน MWCNT พิจารณาที่ MWCNT:CB อัตราส่วน 1:1 เกิดกลไกแบบที่ 1 และ 2 ทำให้มีค่า Percolation threshold ต่ำสุด ในขณะที่อัตราส่วน 4:1 เกิดกลไกแบบที่ 1 แบบเดียวค่า Percolation threshold จึงสูงกว่าอัตราส่วน 1:1 ส่วนอัตราส่วน 1:4 เกิดกลไกแบบที่ 3 ซึ่งเส้นทางนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นกลุ่มก้อนของ CB ซึ่งตามธรรมชาติแล้ว CB มีค่านำไฟฟ้าที่ต่ำกว่า MWCNT จึงทำให้มีค่า Percolation threshold สูงที่สุด



รูปที่ 2.16 กลไกการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้า โดย MWCNT และ CB ใน Ternary systems : (a, b, c) ความเข้มข้นของสารตัวเติมต่ำ : (d, e, f) ความเข้มข้นของสารตัวเติมสูง (จากงานวิจัยของ Zhang และคณะ [43])

นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยของ Ma และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าใน Epoxy นาโนคอมพอสิต จากสารตัวเติมผสมระหว่าง CB กับ MWCNT โดยทำผสม CB กับ MWCNT ใน Epoxy นาโนคอมพอสิต โดยใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย ด้วยเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง ความเร็วสกรู 3000 rpm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C นาน 5 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลาย จากนั้นเติมสารสารเชื่อมโยง m-phenylenediamine แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการโพสเคียวที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของ Epoxy/CB นาโนคอมพอสิต จะมีค่า Percolation threshold ที่ 0.6% และ Epoxy/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีค่า Percolation threshold ที่ 0.3% หลังจากนั้นจึงได้ศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมผสมระหว่าง MWCNT กับ CB ใน Epoxy นาโนคอมพอสิต โดยกำหนดความเข้มข้นคงที่ของ MWCNT คือ 0.2 และ 0.4 %wt และปริมาณความเข้มข้นของ CB ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.2 ถึง 2.0 %wt พบค่า Percolation threshold ของสารตัวเติมผสมที่ความเข้มข้น MWCNT 0.2 %wt และ CB 0.2 %wt ที่เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคนำไฟฟ้าทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้น MWCNT 0.4 %wt เมื่อผสม CB ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า เนื่องจากที่ความเข้มข้นของ MWCNT 0.4 %wt ได้เกิด Percolation threshold แล้ว จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาค CB มีประสิทธิภาพการเชื่อมโยงช่องว่างระหว่าง MWCNT ที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้เกิดเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้าได้ โดย CB และ MWCNT มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงวานเดอร์วาลส์และมีประจุไฟฟ้าที่ดึงดูดกัน รวมทั้งยังมี Synergistic effect ระหว่าง CB และ MWCNT ที่มีการทำงานร่วมกันได้ดี ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าและความทนทานต่อการแตกหักของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณความเข้มข้นของ CB กับ MWCNT ใน Epoxy นาโนคอมพอสิต (จากงานวิจัย Ma และคณะ [44])

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของ MWCNT และ CB ใน PU นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว โดยใช้สารตัวเติมเดี่ยว (MWCNT หรือ CB) และ สารตัวเติมผสมระหว่าง MWCNT และ CB อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 และ 1:7 ที่มีความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt โดยศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อ สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และการกระจายตัวของสารตัวเติมผสม ใน PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต และเปรียบเทียบสมบัติของ PU นาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนเติมที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

1. PU-ester : Desmopan 3695AU DPS101 ของบริษัท Bayer
2. PU-ether : Utechllan UE-95AU ของบริษัท Bayer
3. MWCNT ของบริษัท Sigma-Aldrin
4. CB ของบริษัท Orion Engineered Carbons
5. พอลิเมอร์คอมปาวด์สำหรับล้างเครื่องผสมระบบปิด : LIOCLEAN-Z Lot No.Z610050 ของบริษัท Toyo Ink (Thailand)
6. กาวอีพ็อกซีชนิดนำไฟฟ้า : EPO-TEX EE129-4 ของบริษัท Epoxy Technology
7. PELCO Conductive Silver Paint ของบริษัท Ted Pella
8. สายไฟ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 mm ของบริษัท Thai Wonderful Wire Cable
9. โถดูดความชื้น (Desiccator)
10. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) รุ่น PL 2100 ของบริษัท Brabender Plasti-Corder
11. เครื่องกดอัด (Compression machine) ของบริษัท Mach Group (1992)
12. Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น 204 F1 Phoenix® ของบริษัท Netzsch
13. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7610F ของบริษัท JOEL
14. LCR Meter รุ่น E4980A ของบริษัท Agilent
15. Universal Testing Machine รุ่น Model LRK-2Kn Load cell 2Kn ของบริษัท NTS Technology

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต

เตรียมคอมพอสิตระหว่าง PU, MWCNT และ CB โดยการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องผสมระบบปิด มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เตรียมเม็ด PU (PU-ester และ PU-ether) โดยนำเม็ด PU ทั้ง 2 ชนิด ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. เตรียม MWCNT และ CB ทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. ชั่ง PU, MWCNT และ CB ให้มีน้ำหนักสุทธิ 48 กรัม โดยกำหนดสภาวะการเตรียมอ้างอิงจากงานวิจัยของ นิชนันท์ และคณะ [12] โดยเตรียม PU-ester นาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมิในการผสม 200°C เป็นเวลา 10 นาที และเตรียม PU-ether นาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมิในการผสม 210°C เป็นเวลา 8 นาที โดยกำหนดให้ความเร็วในการหมุนสกรูเท่ากับ 60 rpm ในนาโนคอมพอสิตทั้งสองชนิด ชื่อสูตรและอัตราส่วนความเข้มข้นของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต ดังแสดงตารางที่ 3.1 และ 3.2 โดยกำหนดความเข้มข้นของสารตัวเติมเท่ากับ 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt ที่อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง MWCNT:CB เท่ากับ 1:3 และ 1:7

ตารางที่ 3.1 ชื่อสูตร PU-ester/MWCNT/CB ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ

| สูตร | %Total filler | MWCNT:CB (%wt) | PU-ester | MWCNT:CB (g) |
|------------|---------------|----------------|----------|--------------|
| 0.5EsMWCNT | 0.5 | 0.5:0 | 47.76 | 0.24:0 |
| 0.5Es1:3 | 0.5 | 0.125:0.375 | 47.76 | 0.06:0.18 |
| 0.5Es1:7 | 0.5 | 0.063:0.438 | 47.76 | 0.03:0.21 |
| 0.5EsCB | 0.5 | 0:0.5 | 47.76 | 0:0.24 |
| 1.5EsMWCNT | 1.5 | 1.5:0 | 47.28 | 0.72:0 |
| 1.5Es1:3 | 1.5 | 0.375:1.125 | 47.28 | 0.18:0.54 |
| 1.5Es1:7 | 1.5 | 0.188:1.312 | 47.28 | 0.09:0.63 |
| 1.5EsCB | 1.5 | 0:1.5 | 47.28 | 0:0.72 |
| 3.0EsMWCNT | 3.0 | 3.0:0 | 46.56 | 1.44:0 |
| 3.0Es1:3 | 3.0 | 0.750:2.250 | 46.56 | 0.36:1.08 |
| 3.0Es1:7 | 3.0 | 0.375:2.625 | 46.56 | 0.18:1.26 |
| 3.0EsCB | 3.0 | 0:3.0 | 46.56 | 0:1.44 |

ตารางที่ 3.2 ชื่อสูตร PU-ether/MWCNT/CB ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ

| สูตร | %Total filler | MWCNT:CB (%wt) | PU-ether | MWCNT:CB (g) |
|-------------|---------------|----------------|----------|--------------|
| 0.5EthMWCNT | 0.5 | 0.5:0 | 47.76 | 0.24:0 |
| 0.5Eth1:3 | 0.5 | 0.125:0.375 | 47.76 | 0.06:0.18 |
| 0.5Eth1:7 | 0.5 | 0.063:0.438 | 47.76 | 0.03:0.21 |
| 0.5EthCB | 0.5 | 0:0.5 | 47.76 | 0:0.24 |
| 1.5EthMWCNT | 1.5 | 1.5:0 | 47.28 | 0.72:0 |
| 1.5Eth1:3 | 1.5 | 0.375:1.125 | 47.28 | 0.18:0.54 |
| 1.5Eth1:7 | 1.5 | 0.188:1.313 | 47.28 | 0.09:0.63 |
| 1.5EthCB | 1.5 | 0:1.5 | 47.28 | 0:0.72 |
| 3.0EthMWCNT | 3.0 | 3.0:0 | 46.56 | 1.44:0 |
| 3.0Eth1:3 | 3.0 | 0.750:2.250 | 46.56 | 0.36:1.08 |
| 3.0Eth1:7 | 3.0 | 0.375:2.625 | 46.56 | 0.18:1.26 |
| 3.0EthCB | 3.0 | 0:3.0 | 46.56 | 0:1.44 |

3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอลสิต

นำนาโนคอมพอลสิตที่เตรียมได้มาขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดด้วยเครื่อง Compression machine โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 mm และมีสภาวะในการขึ้นรูป โดย PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอลสิต ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 200°C เวลาในการ Preheat 16 นาที เวลาในการขึ้นรูป 16 นาที และเวลาในการหล่อเย็น 5 นาที

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอลสิต

3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

DSC (Differential Scanning Colorimeter) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal transition) ของวัสดุ โดยทำการวัดปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของสารตัวอย่าง เมื่อได้รับความร้อนจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (Endothermic or Exothermic processes) หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat capacity changes) จึงนำเอาเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะคล้ายยาง (Glass transition, T_g), การหลอมเหลว (Melting points), กระบวนการตกผลึก (Crystallization process) และความจุความร้อน (Heat capacity) เป็นต้น [45]

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลการวิเคราะห์จากเทคนิค DSC ใช้ในการศึกษาการแยกวัฏภาคของ PU ในโครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็ง ซึ่งใช้ทดสอบชิ้นงาน PU-ether, PU-ester และ PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบ Compression molding ทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างโดยตัดชิ้นงานให้มีน้ำหนัก 7 ± 0.3 mg แล้ววางบนจานอะลูมิเนียมชนิดที่มีฝาปิดนำสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานวางบนจานอะลูมิเนียม สารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกัน ซึ่งจะควบคุมการให้ความร้อนกับถาดทั้งสองที่วางแยกกันด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง โดยกำหนดสภาวะในการทดสอบแบบ Heat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน และกำหนดช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ -70 ถึง 250°C ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เครื่อง DSC ที่ใช้ในการวิจัยแสดงดังในรูปที่ 3.1

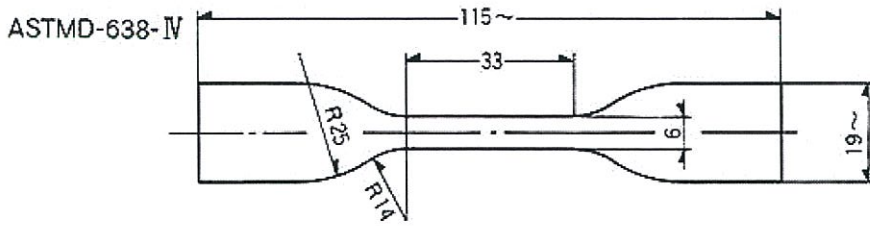


รูปที่ 3.1 DSC รุ่น 204 F1 Phoenix® [45]

3.4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM

UTM (Universal Testing Machine) เป็นเครื่องทดสอบแรงประเภท Static load test โดยการให้แรงกระทำทดสอบคงที่ต่อชิ้นทดสอบใช้สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เป็นโลหะ ยาง พลาสติก และวัสดุทนไฟ การทดสอบได้แก่ ทดสอบแรงดึง (Tensile test) ทดสอบแรงเฉือน (Shear test) ทดสอบแรงบิด (Torsion test) และทดสอบแรงกด (Compressive test) [46]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแรงดึง โดยวิเคราะห์สมบัติทางด้านเชิงกล ได้แก่ มอดูลัสที่ 100% ความเหนียว (Toughness) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) การทดสอบทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างยึดให้มีขนาดตามมาตรฐานมีรูปร่างคล้ายดัมเบลล์ (Dumb-bell) แล้วใช้ที่จับ (Grips) สองชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยที่ปลายข้างหนึ่งทำให้อยู่กับที่ ส่วนอีกข้างหนึ่งเกิดการเคลื่อนที่จะมีเซลล์วัดแรง (Load cell) เป็นทั้งตัววัดควบคุมแรงและความเร็วที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่างจากการดึง



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานดัมเบลล์สำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV [47]



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึง

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างทำโดยการตัดชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการการขึ้นรูปเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ทำการหาค่าเฉลี่ยของความหนาและความกว้างของแต่ละชิ้นงานทดสอบ จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้ Load cell เท่ากับ 2 kN และกำหนดค่า Crosshead speeds เท่ากับ 500 mm/min เมื่อเริ่มทำการทดสอบ Load cell จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามที่กำหนดและชิ้นงานที่ทดสอบเกิดการให้แรงกระทำจนกระทั่งปลายของตัวอย่างที่ถูกยึดด้วยที่จับเกิดการดึงยืดออกจนขาด นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain curve) [48] โดยนำแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน (F) และพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน (A) แปลงค่าเป็นความต้านทานแรงดึง (Tensile strength, σ) โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นให้นำค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปและความยาวเริ่มต้นแปลงค่าเป็น Young 's Modulus (E) และ %Elongation at break ดังสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าเท่ากับความเหนียว (Toughness) นั้นเอง

$$\text{Tensile Strength, } \sigma \text{ (MPa)} = \frac{F}{A} \quad (\text{สมการที่1})$$

$$\text{Young 's Modulus, E (MPa)} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{สมการที่2})$$

$$\% \text{Elongation at break} = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (\text{สมการที่3})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM

FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field emission (T-FE) มีกำลังขยายสูงถึง 1 ล้านเท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่ด้านล่างผ่านเลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสที่ผิวตัวอย่าง ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ออกมาจากแต่ละจุดบนผิวตัวอย่าง โดยที่มุมและความเร็วของอิเล็กตรอนทุติยภูมิสัมพันธ์กับโครงสร้างพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึกและเปลี่ยนเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป โดยภาพที่ได้จาก FESEM เป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีความลึกและมีความละเอียดสูงถึง 1.5 นาโนเมตร [49]

ในงานวิจัยนี้ FESEM ใช้ในการศึกษารายละเอียดของโครงสร้างภายนอกหรือพื้นผิวของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งในการเตรียมตัวอย่างสำหรับ FESEM ทำโดยการนำชิ้นงานนาโนคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการทดสอบเชิงกลจนแตกหักแล้ว นำมาตัดบริเวณที่เกิดการแตกหักให้มีความหนาประมาณ 2-3 mm แล้วเคลือบผิวตัวอย่างด้วย Platinum จากนั้นถ่ายภาพด้วยลำแสงอิเล็กตรอน 5 kV ที่กำลังขยาย 5000x, 10000x และ 20000x เครื่อง FESEM ที่ใช้ในการวิจัยแสดงดังในรูปที่ 3.4

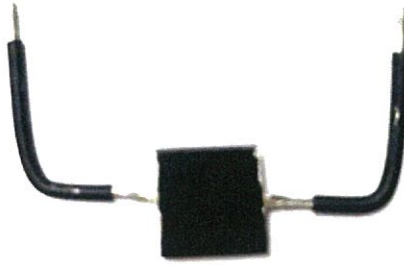


รูปที่ 3.4 FESEM รุ่น JEOL LSM-7610F [49]

3.4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter

LCR Meter เป็นเครื่องมือที่วัดค่าของอุปกรณ์คอมโพเนนต์ (Component parts) ทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ ค่าความต้านทาน (Resistance, R) ค่าเก็บประจุ (Capacitance, C) และวัดค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance, L) ของวัสดุ [50] ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง LCR Meter วัดค่าความต้านทานของวัสดุนาโนคอมพอสิตในช่วงความถี่ $20-1 \times 10^6$ Hz โดยทดสอบด้วยกระแสไฟฟ้าสลับ กำหนดฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบ คือ Lp-Rp และความต่างศักย์เท่ากับ 10 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า ทำโดยตัดชิ้นงานนาโนคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปให้มีความกว้าง 10 mm ความหนา 2 mm และความยาว 10 mm นำชิ้นงานมาต่อเข้ากับสายไฟด้วยกาวอีพ็อกซีชนิดนำไฟฟ้า แล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อป่นกาว (Curing) ให้เกิดการยึดติดกับชิ้นงาน จากนั้นนำ Silver paint ทาให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดที่ต่อเข้ากับสายไฟ เตรียมชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จแล้ว นำเครื่อง LCR Meter มาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง นำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จะนำไปแปลงค่าเป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume resistivity) โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นแปลงเป็นค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) โดยใช้สมการที่ 2 แล้วรายงานผลค่าการนำไฟฟ้าในหน่วย S/cm และนำค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความถี่

$$\text{Volume resistivity } (\Omega \cdot \text{m}) = \frac{\text{Resistance} \times \text{Cross section area}}{\text{Length}} \quad (\text{สมการที่ 5})$$

$$\text{Conductivity (S/cm)} = \frac{1}{\text{Volume resistivity}} \quad (\text{สมการที่ 6})$$

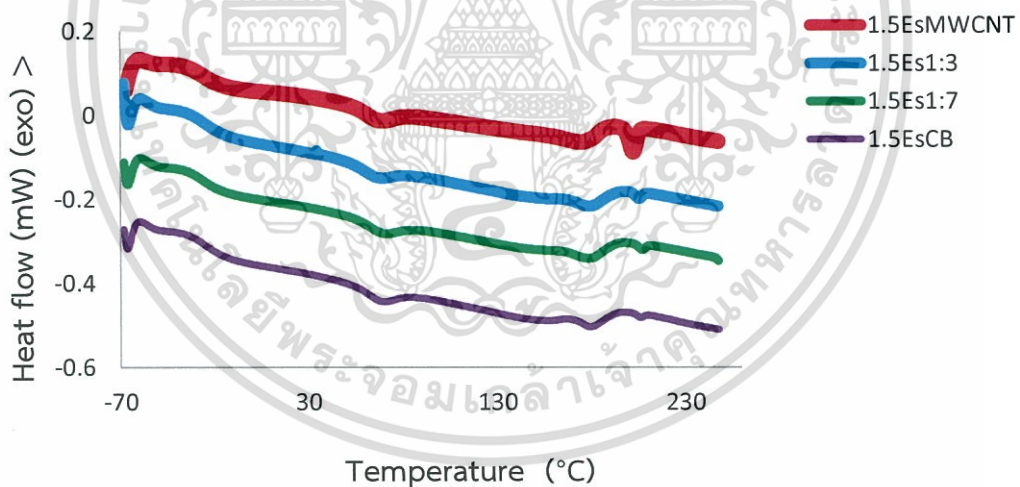
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

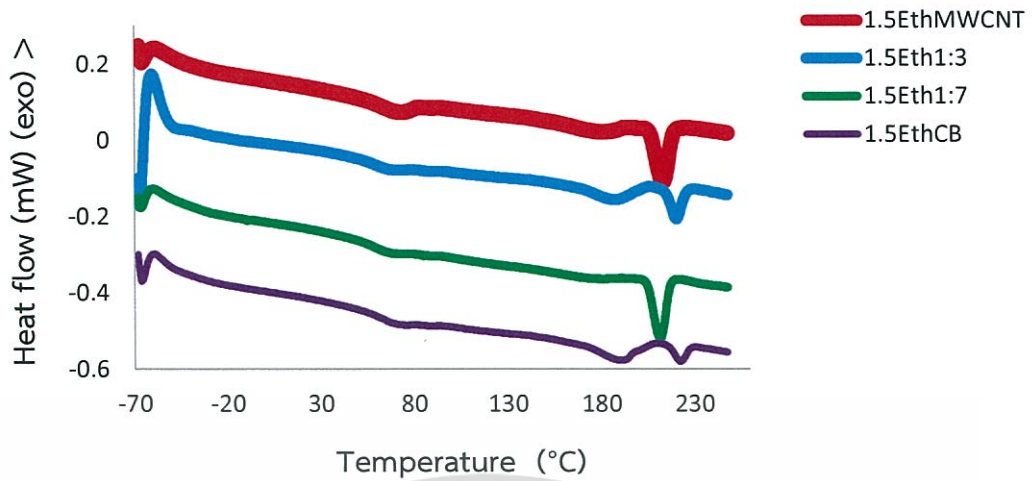
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

โครงสร้างของพอลิยูรีเทนในงานวิจัยนี้เป็นประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymer) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนแข็งและโครงสร้างส่วนนิ่ม เมื่อได้ทำการวิเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค DSC จึงสามารถพบวิญภาคของทั้งโครงสร้างส่วนแข็งและโครงสร้างส่วนนิ่ม และยังพบบริเวณที่โครงสร้างทั้งสองผสมกัน (Mixed phase) ทำให้สามารถพบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนได้ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนแข็ง ($T_{g(HS)}$), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่ม ($T_{g(SS)}$), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนแข็งและส่วนนิ่มผสมกัน ($T_{g(MP)}$), อุณหภูมิหลอมเหลวที่ส่วนนิ่มและส่วนแข็งมาผสมกันหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอุณหภูมิที่เกิด Microphase mixing (T_{MMT}), และพลังงานที่ใช้ในการเกิด Microphase mixing (ΔH_{MMT}) ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต และ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.1 ตามลำดับและตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 1.5 %wt



รูปที่ 4.2 กราฟ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 1.5 %wt

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต

| สูตร | $T_{g(SS)}$ (°C) | $T_{g(MP)}$ (°C) | T_{MMT1} (°C) | | T_{MMT2} (°C) | ΔH_{MMT} (KJ/g) |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------|-------|--------------------|----------------------------|
| | | | A | B | | |
| UnfilledEs* | -20.2 | 59.4 | - | 163.5 | - | 17.770 |
| 0.5EsMWCNT | -23.6 | 63.2 | - | 160.9 | 183.6 | 8.539 |
| 0.5Es1:3 | -24.0 | 58.6 | - | 175.7 | 204.6 | 7.340 |
| 0.5Es1:7 | -26.8 | 60.9 | - | 160.0 | - | 8.145 |
| 0.5EsCB | -25.1 | 59.4 | - | 175.1 | 205.3 | 6.328 |
| 1.5EsMWCNT | -24.9 | 59.4 | - | 174.8 | 202.4 | 8.720 |
| 1.5Es1:3 | -24.2 | 59.7 | - | 178.4 | 205.5 | 8.378 |
| 1.5Es1:7 | -26.6 | 62.6 | - | 178.7 | 207.3 | 6.767 |
| 1.5Es CB | -22.4 | 61.7 | 157.4 | 179.4 | 206.4 | 8.732 |
| 3.0EsMWCNT | -24.6 | 61.1 | - | 178.0 | 204.4 | 7.907 |
| 3.0Es1:3 | -27.6 | 61.6 | - | 174.9 | 201.8 | 6.614 |
| 3.0Es1:7 | -25.7 | 61.2 | - | 160.5 | 188.1 | 9.909 |
| 3.0EsCB | -25.7 | 61.6 | 157.1 | - | 181.7 | 4.987 |

หมายเหตุ * UnfilledEs คือ PU-ester ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม อ้างอิงจากงานวิจัยของนิชนันท์ โต้ะมาจี และคณะ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต

| สูตร | $T_{g(SS)}$ (°C) | $T_{g(MP)}$ (°C) | T_{MMT1} (°C) | | T_{MMT2} (°C) | ΔH_{MMT} (KJ/g) |
|--------------|---------------------|---------------------|-----------------|-------|--------------------|----------------------------|
| | | | A | B | | |
| UnfilledEth* | - | 59.4 | 175.6 | - | - | 17.080 |
| 0.5EthMWCNT | - | 62.7 | 186.0 | - | 214.7 | 9.979 |
| 0.5Eth1:3 | - | 63.2 | 186.7 | 203.5 | 221.7 | 7.401 |
| 0.5Eth1:7 | - | 59.6 | 184.9 | - | 217.9 | 8.283 |
| 0.5EthCB | - | 64.5 | 190.2 | - | 222.5 | 10.352 |
| 1.5EthMWCNT | - | 62.7 | 180.7 | - | 213.2 | 9.938 |
| 1.5Eth1:3 | - | 63.5 | 187.1 | - | 220.4 | 10.143 |
| 1.5Eth1:7 | - | 58.9 | 174.2 | - | 211.6 | 10.731 |
| 1.5EthCB | - | 63.2 | 190.1 | - | 222.4 | 9.968 |
| 3.0EthMWCNT | - | 59.2 | 187.6 | - | 221.5 | 10.990 |
| 3.0Eth1:3 | - | 59.4 | 188.4 | - | 219.4 | 10.251 |
| 3.0Eth1:7 | - | 60.7 | 184.9 | - | 216.8 | 8.104 |
| 3.0EthCB | - | 66.8 | 189.9 | - | 222.2 | 9.874 |

หมายเหตุ * UnfilledEth คือ PU-ether ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม อ้างอิงจากงานวิจัยของนิชนันท์ โต้ะมาจี้ และคณะ [12]

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต พิจารณา PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตเปรียบเทียบกับ UnfilledEs พบว่า $T_{g(SS)}$ มีอุณหภูมิลดลง เนื่องจากการเกิด Microphase separation และ $T_{g(MP)}$ มีอุณหภูมิที่ลดลง เนื่องจากการเกิด Microphase separation โครงสร้างส่วนแข็งแยกออกจาก Mixed phase และพบการแยกฟิคของ T_{MMT} ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น (T_{MMT1} และ T_{MMT2}) โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นแสดงถึงความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เพิ่มมากขึ้นและโครงสร้างที่เรียงชิดติดกัน ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT ที่มากขึ้น โดย T_{MMT1} มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับ UnfilledEs และ T_{MMT2} มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน บ่งบอกได้ว่า MWCNT ไม่ได้อยู่ในโครงสร้างส่วนแข็งแต่อยู่ในโครงสร้างส่วนนิ่ม เนื่องจาก MWCNT ไม่ได้ไปขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่ส่วนแข็งของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ผลึกในโครงสร้างเกิดได้ดี

ใน PU-ester/CB นาโนคอมพอสิตเมื่อเทียบกับ UnfilledEs พบว่า $T_{g(SS)}$ มีอุณหภูมิลดลง เนื่องจากการเกิด Microphase separation และ $T_{g(MP)}$ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างส่วนนิ่มแยกตัวออกจาก Mixed phase ส่งเสริมการเกิด Microphase separation นอกจากนี้ยังพบการแยกฟิคของ T_{MMT} คือ T_{MMT1} และ T_{MMT2} เริ่มมีการเห็นผลึกที่หลวม T_{MMT1} และ T_{MMT2} กลับมีอุณหภูมิลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ UnfilledEs เนื่องจาก CB มีการกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนแข็ง ทำให้เกิดการขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ความเป็นผลึกในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างส่วนแข็งลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้น 1.5 และ 3.0 %wt จะมีโครงสร้างที่หลวม ทำให้พบ T_{MMT1A} ที่อุณหภูมิต่ำลง (ประมาณ 157°C)

PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ในอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 และ 1:7 โดยมีปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ UnfilledEs พบว่า $T_{g(SS)}$ มีอุณหภูมิลดลง เนื่องจากการเกิด Microphase separation ส่วน $T_{g(MP)}$ มีค่าใกล้เคียงกันและไม่มีแนวโน้มที่มียุคสำคัญ เมื่อเพิ่มสัดส่วน CB ส่งผลให้ T_{MMT1} และ T_{MMT2} มีอุณหภูมิลดต่ำลง สังเกตได้จากที่อัตราส่วน 1:7 มีปริมาณ CB มากกว่าที่อัตราส่วน 1:3 ซึ่งจะเห็นผลได้อย่างชัดเจนที่ความเข้มข้น 3.0 wt% ซึ่งให้เห็นว่า CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนแข็งและเกิดการขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่ ทำให้ปริมาณความเป็นผลึกในโครงสร้างส่วนแข็งลดลงอย่างชัดเจน

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ซึ่งพบ $T_{g(MP)}$, การแยกฟีดของ T_{MMT} (T_{MMT1} และ T_{MMT2}) หากเปรียบเทียบกับ UnfilledEth กับ PU-ether นาโนคอมพอสิต พบว่า $T_{g(MP)}$ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิด Microphase separation แสดงถึงโครงสร้างส่วนนิ่มแยกออกจาก Mixed phase และเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT มากขึ้นอุณหภูมิของ T_{MMT1} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ UnfilledEth บ่งบอกได้ว่า MWCNT ไม่ได้อยู่ในโครงสร้างส่วนแข็งแต่อยู่ในโครงสร้างส่วนนิ่ม เนื่องจาก MWCNT ไม่ได้ไปขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ผลึกในโครงสร้างส่วนแข็งเกิดได้ดี ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จึงไม่ส่งผลต่อการขัดขวางการเกิดผลึก

เมื่อเปรียบเทียบกับ PU-ether/CB นาโนคอมพอสิตกับ UnfilledEth พบว่า $T_{g(MP)}$ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิด Microphase separation โครงสร้างส่วนนิ่มแยกออกจาก Mixed phase และพบการแยกฟีดของ T_{MMT} คือ T_{MMT1} และ T_{MMT2} เมื่อเพิ่มปริมาณ CB มากขึ้น ส่วน T_{MMT1} และ T_{MMT2} มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่า CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนนิ่ม เนื่องจากการเติม CB ลงไปใน PU-ether ไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกในโครงสร้างส่วนแข็งนั่นเอง

PU- ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน MWCNT:CB ต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ UnfilledEth พบว่า $T_{g(MP)}$ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิด Microphase separation โครงสร้างส่วนนิ่มแยกออกจาก Mixed phase และพบการแยกฟีดของ T_{MMT} คือ T_{MMT1} และ T_{MMT2} โดย T_{MMT1} มีอุณหภูมิต่ำกว่า UnfilledEth แสดงให้เห็นถึงการเกิดผลึกที่ดีในสารตัวเติมผสม เนื่องจาก MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของส่วนนิ่ม

ดังนั้นจึงสรุปผลการศึกษาด้วยเทคนิค DSC ได้ว่าการใส่สารตัวเติม MWCNT และ CB นั้นส่งเสริมการเกิด Microphase separation ทั้งใน PU-ester และ PU-ether อีกทั้งการใส่สารตัวเติมยังส่งผลให้ T_{MMT} เกิดการแยกฟีด (T_{MMT1} และ T_{MMT2}) เนื่องจากผลึกเกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น ใน PU-ester โครงสร้างส่วนนิ่มมี MWCNT กระจายตัวอยู่และโครงสร้างส่วนแข็ง มี CB กระจายตัวอยู่ ส่วน PU-ether ทั้ง MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนเดียวกันคือ โครงสร้างส่วนนิ่ม

4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM

ในการวิจัยนี้ใช้เครื่อง UTM ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุนาโนคอมพอสิต โดยรายงานค่า Young's modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต

| สูตร | Young's modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | %Elongation at break | Toughness (J) |
|-------------|-----------------------|------------------------|----------------------|---------------|
| UnfilledEs* | 6.7±0.2 | 29.8±1.2 | 866.9±39.7 | 54.67±1.9 |
| 0.5EsMWCNT | 34.3±0.4 | 47.4±2.4 | 1222.3±30.7 | 80.7±3.2 |
| 0.5Es1:3 | 26.5±1.0 | 47.5±1.2 | 1226.1±44.5 | 80.4±3.4 |
| 0.5Es1:7 | 29.3±0.6 | 54.8±2.6 | 1286.5±29.2 | 89.1±5.5 |
| 0.5EsCB | 30.4±1.4 | 54.8±1.7 | 1221.9±29.5 | 85.5±8.2 |
| 1.5EsMWCNT | 36.5±1.1 | 41.8±2.2 | 1124.8±41.8 | 72.9±4.4 |
| 1.5Es1:3 | 29.3±1.8 | 46.2±1.9 | 1243.3±22.0 | 79.4±5.7 |
| 1.5Es1:7 | 30.1±2.8 | 47.3±3.6 | 1204.6±11.4 | 82.3±3.1 |
| 1.5EsCB | 35.0±1.1 | 52.3±2.6 | 1194.7±19.4 | 79.0±4.4 |
| 3.0EsMWCNT | 45.0±0.9 | 36.4±2.7 | 983.4±33.5 | 64.7±3.4 |
| 3.0Es1:3 | 35.7±1.4 | 41.5±2.2 | 1125.4±61.2 | 72.9±6.6 |
| 3.0Es1:7 | 35.5±1.2 | 41.0±3.1 | 1176.9±69.2 | 54.7±3.7 |
| 3.0EsCB | 39.1±1.8 | 45.6±2.9 | 1121.5±22.8 | 76.1±3.4 |

หมายเหตุ * UnfilledEs คือ PU-ester ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม อ้างอิงจากงานวิจัยของนิชนันท์ ไต้ะมาจี้ และคณะ [12]

จากตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติเชิงกลของ PU-ester นาโนคอมพอสิต พบว่า Young's modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness มีค่าสูงกว่า UnfilledEs แสดงให้เห็นว่าการเติม CB และ MWCNT ช่วยปรับปรุงสมบัติของ PU เมทริกซ์ แต่ 3Es1:7 มีค่า Toughness ที่ใกล้เคียงกันและไม่มีแนวโน้มที่มีนัยสำคัญกับ UnfilledEs พบว่า Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มลดลง เมื่อเติมปริมาณของ MWCNT และ CB ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก CB เข้าไปแทรกตัวในสายโซ่จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น โดย Tensile Strength มีค่าอยู่ในช่วง 36-54 MPa, %Elongation at break มีค่าอยู่ในช่วง 983-1286% และ Toughness มีค่าอยู่ในช่วง 54-89 J ส่วน Young's modulus มีแนวโน้มสูงมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ MWCNT และ CB ดังแสดงในรูปที่ 4.3

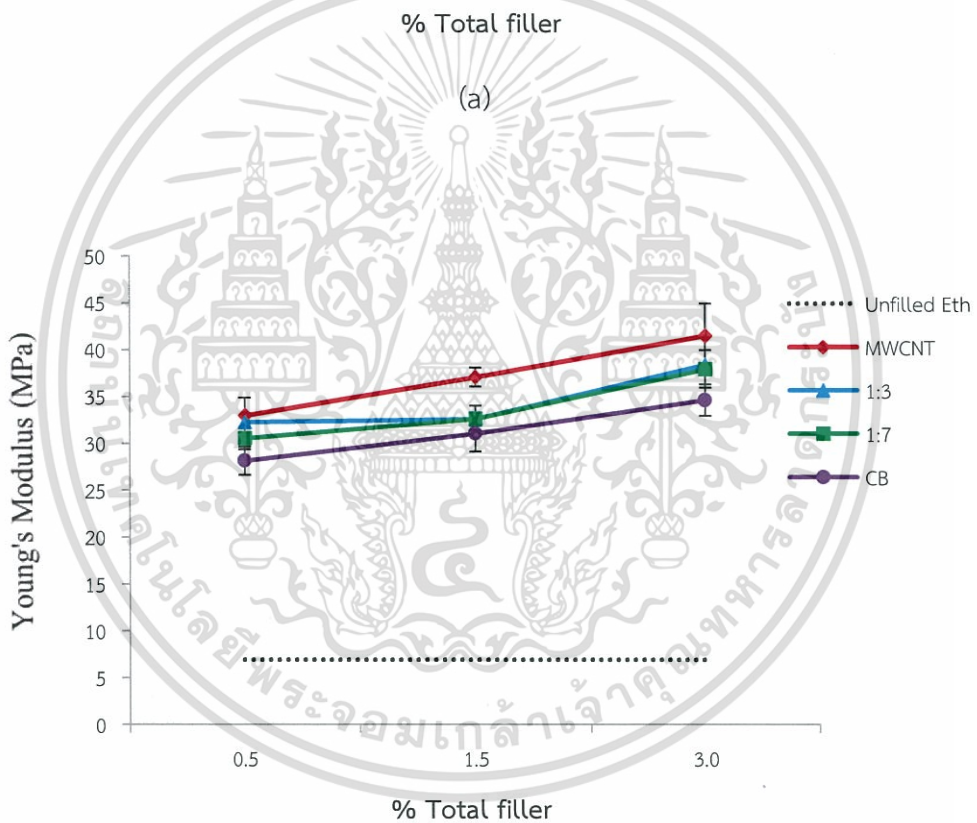
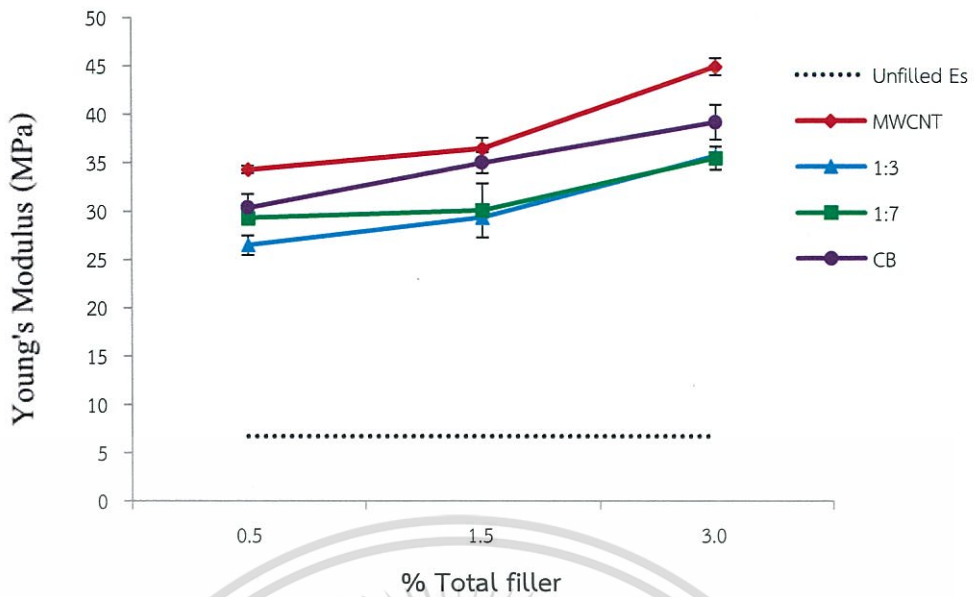
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต

| สูตร | Young's modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | %Elongation at break | Toughness (J) |
|--------------|-----------------------|------------------------|----------------------|---------------|
| UnfilledEth* | 6.9±0.1 | 27.5±1.8 | 811.5±28.8 | 47.3±4.0 |
| 0.5EthMWCNT | 33.0±1.9 | 35.8±2.2 | 1149.5±40.5 | 65.6±2.0 |
| 0.5Eth1:3 | 32.3±1.5 | 33.4±1.9 | 1080.0±37.0 | 60.6±2.3 |
| 0.5Eth1:7 | 30.5±1.3 | 33.7±0.6 | 1059.5±39.0 | 58.5±6.3 |
| 0.5EthCB | 28.1±1.2 | 41.5±2.7 | 1202.7±54.2 | 70.5±5.6 |
| 1.5EthMWCNT | 37.1±1.0 | 28.0±1.0 | 962.9±30.3 | 50.6±2.4 |
| 1.5Eth1:3 | 32.6±1.5 | 35.0±1.8 | 1133.5±29.5 | 64.1±1.8 |
| 1.5Eth1:7 | 32.7±1.4 | 34.3±1.9 | 1075.4±41.6 | 65.0±4.6 |
| 1.5EthCB | 31.1±1.9 | 31.0±0.9 | 1015.0±22.3 | 60.0±4.1 |
| 3.0EthMWCNT | 41.5±3.4 | 20.0±0.9 | 614.0±58.3 | 27.6±4.3 |
| 3.0Eth1:3 | 38.4±3.0 | 30.2±0.3 | 953.3±21.0 | 52.2±6.1 |
| 3.0Eth1:7 | 38.0±2.0 | 32.5±1.9 | 1008.1±48.4 | 63.1±5.3 |
| 3.0EthCB | 34.6±1.7 | 29.8±0.9 | 996.7±38.7 | 58.3±3.4 |

*หมายเหตุ UnfilledEth คือ PU-ether ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม อ้างอิงจากงานวิจัยของนิชนันท์ โต้ะมาจิง และคณะ [12]

จากตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติเชิงกลของ PU-ether นาโนคอมพอสิต พบว่า Young's modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness มีค่าสูงกว่า UnfilledEth บ่งชี้ถึงความสามารถในการช่วยเสริมสมบัติเชิงกลเหมือนที่พบใน PU-ester นาโนคอมพอสิต แต่ในสูตร 3EthMWCNT กลับพบว่า Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ต่ำกว่า UnfilledEth อาจมีสาเหตุมาจากปริมาณของ MWCNT มากเกินไปทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง MWCNT กับเมทริกซ์ได้ไม่ดี และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWCNT และ CB ที่เพิ่มสูงขึ้น Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก CB เข้าไปแทรกตัวในสายโซ่จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น โดย Tensile strength มีค่าอยู่ในช่วง 20-41 MPa, %Elongation at break มีค่าอยู่ในช่วง 614-1202% และ Toughness มีค่าอยู่ในช่วง 27-70 J ในทางตรงกันข้ามค่า Young's modulus มีแนวโน้มสูงมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ MWCNT และ CB ดังแสดงในรูปที่ 4.3



(b)

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus กับปริมาณสารตัวเติมในสูตรผสมที่ต่างกัน (a) PU-ester และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการปรับปรุงค่า Young's modulus ของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับ Unfilled

| PU-ester นาโนคอมพอลิเมอร์ | | | PU-ether นาโนคอมพอลิเมอร์ | | |
|---------------------------|----------------|---------------|---------------------------|----------------|---------------|
| สารตัวเติม | % Total filler | % Improvement | สารตัวเติม | % Total filler | % Improvement |
| MWCNT | 0.5 | 412 | MWCNT | 0.5 | 378 |
| | 1.5 | 445 | | 1.5 | 438 |
| | 3.0 | 572 | | 3.0 | 501 |
| CB | 0.5 | 354 | CB | 0.5 | 307 |
| | 1.5 | 422 | | 1.5 | 351 |
| | 3.0 | 484 | | 3.0 | 401 |
| อัตราส่วน 1:3 | 0.5 | 296 | อัตราส่วน 1:3 | 0.5 | 368 |
| | 1.5 | 337 | | 1.5 | 372 |
| | 3.0 | 433 | | 3.0 | 457 |
| อัตราส่วน 1:7 | 0.5 | 337 | อัตราส่วน 1:7 | 0.5 | 342 |
| | 1.5 | 349 | | 1.5 | 374 |
| | 3.0 | 430 | | 3.0 | 451 |

เมื่อนำค่า Young's modulus มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณสารตัวเติมของ PU-ester นาโนคอมพอลิเมอร์ ดังแสดงรูปที่ 4.3 (a) พบว่าค่า Young's modulus มีแนวโน้มสูงกว่า UnfilledEs และเมื่อเติมปริมาณของ MWCNT และ CB ที่ 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt มีแนวโน้มของ Modulus เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่า Young's modulus ของสารตัวเติมแบบต่างๆ มาเทียบกับ UnfilledEs พบว่ามี % Improvement ของ MWCNT อยู่ในช่วง 412-572%, CB อยู่ในช่วง 354-484%, อัตราส่วน 1:3 อยู่ในช่วง 296-433% และอัตราส่วน 1:7 อยู่ในช่วง 337-430% และพบว่า ที่ความเข้มข้น 0.5 %wt ทั้งอัตราส่วน 1:7 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วน 1:3 แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นที่ 3.0 %wt กลับพบว่าค่ามอดูลัสของทั้งสองอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน โดย PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอลิเมอร์พบค่า Young's modulus สูงสุดที่ 3EsMWCNT (45.0 ± 0.9 MPa) หากพิจารณาสารตัวเติมแบบผสมของ MWCNT และ CB ที่ 3.0 %wt พบว่าสูตร 3.0Es1:3 มีค่า Young's modulus สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ MWCNT และ CB นาโนคอมพอลิเมอร์ มีแนวโน้มของ Modulus ลดลงประมาณ 21% และ 9% ตามลำดับ

ส่วนรูปที่ 4.3 (b) แสดงค่า Young's modulus ของ PU-ether นาโนคอมพอลิเมอร์พบค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่า UnfilledEth และเมื่อเติมปริมาณของ MWCNT และ CB ที่ 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt มีแนวโน้มของ Modulus เพิ่มขึ้นเหมือนกับที่พบใน PU-ester นาโนคอมพอลิเมอร์ เมื่อนำค่า Young's modulus ของสารตัวเติมแบบต่างๆมาคำนวณเทียบกับ UnfilledEth พบว่ามี % Improvement ของ MWCNT อยู่ในช่วง 378-501%, CB อยู่ในช่วง 307-401%, อัตราส่วน 1:3 อยู่ในช่วง 368-457% และอัตราส่วน 1:7 อยู่ในช่วง 342-451% และพบว่า ที่ความเข้มข้น 0.5 %wt ทั้งอัตราส่วน 1:3 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วน 1:7 แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้น (1.5

และ 3.0 %wt) กลับพบว่าค่ามอดูลัสของทั้งสองอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน โดย PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตพบค่า Young's modulus สูงสุดที่ 3EthMWCNT (41.5 ± 3.4 MPa) หากพิจารณา สารตัวเติมแบบผสมของ MWCNT และ CB ที่ 3.0 %wt พบว่าสูตร 3.0Eth1:3 มีค่า Young's modulus สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ MWCNT นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มของ Modulus ลดลง ประมาณ 7% และเมื่อเปรียบเทียบกับ CB มีแนวโน้มของ Modulus เพิ่มขึ้นประมาณ 11%

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต พบว่าอัตราส่วน 1:3 และ 1:7 ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต มีการเพิ่มขึ้นของ Modulus ที่สูงกว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต เนื่องจาก MWCNT และ CB มีการกระจายตัวในส่วนเดียวกันคือโครงสร้างส่วนนึ่งของ PU-ether ทำให้สามารถเสริมความแข็งแรงได้ดีกว่า PU-ester ที่มีกระจายตัวในโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดย MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนนึ่งและ CB กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

4.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM

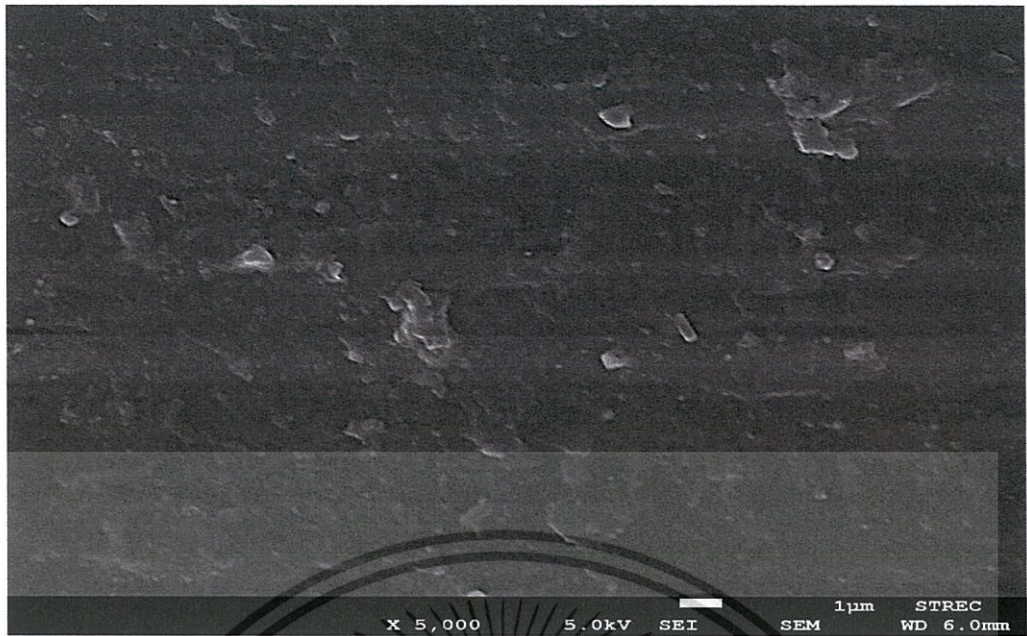
ในการวิจัยนี้ใช้ FESEM เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค MWCNT และ CB ในวัสดุนาโนคอมพอสิต ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.4- 4.12 โดยบริเวณจุดสว่างเป็นรูปท่อ คือ MWCNT และจุดสว่างเป็นรูปอนุภาคทรงกลมคือ CB

เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของ CB ใน PU-ester/CB นาโนคอมพอสิต โดยรูปที่ 4.4 (a) และ (b) เป็นการเตรียมนาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น CB 0.5 และ 3.0 %wt ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าอนุภาค CB ในรูปที่ 4.4 ทั้ง (a) และ (b) มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม มีการกระจายตัวดีและไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerate) ใน PU-ester เมทริกซ์ แม้จะเพิ่มความเข้มข้นของ CB ให้สูงถึง 3 %wt

ในรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการกระจายตัวของ MWCNT ใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ความเข้มข้น MWCNT 0.5 และ 3.0 %wt ดังรูป 4.5 (a) และ (b) ตามลำดับ อนุภาค MWCNT มีลักษณะเป็นรูปท่อ มีการกระจายตัวดี และไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใน PU-ester เมทริกซ์ ทั้งในความเข้มข้น MWCNT 0.5 และ 3.0 %wt โดยผลที่ได้นี้คล้ายคลึงกับนาโนคอมพอสิตของ CB แสดงให้เห็นว่าแม้จะเติม MWCNT หรือ CB ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น แต่ทั้ง MWCNT และ CB ยังคงสามารถกระจายตัวได้ดีใน PU-ester เมทริกซ์

พิจารณาการกระจายตัวของสารตัวเติมผสม MWCNT และ CB ใน PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ในรูป 4.6 (a) และ (b) คือนาโนคอมพอสิตที่ MWCNT:CB อัตราส่วน 1:3 และอัตราส่วน 1:7 ในรูป 4.7 (a) และ (b) ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 3.0 %wt ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าในทุกอนุภาคของ MWCNT และ CB มีการกระจายตัวดีและไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใน PU-ester เมทริกซ์ และแม้จะเพิ่มปริมาณ MWCNT และ CB ลงใน PU-ester/MWCNT/ CB นาโนคอมพอสิต (รูป 4.6 (b) และ รูป 4.7 (b)) ก็ยังคงมีการกระจายตัวที่ดีเหมือนที่พบในรูป 4.6 (a) และ 4.7 (a)

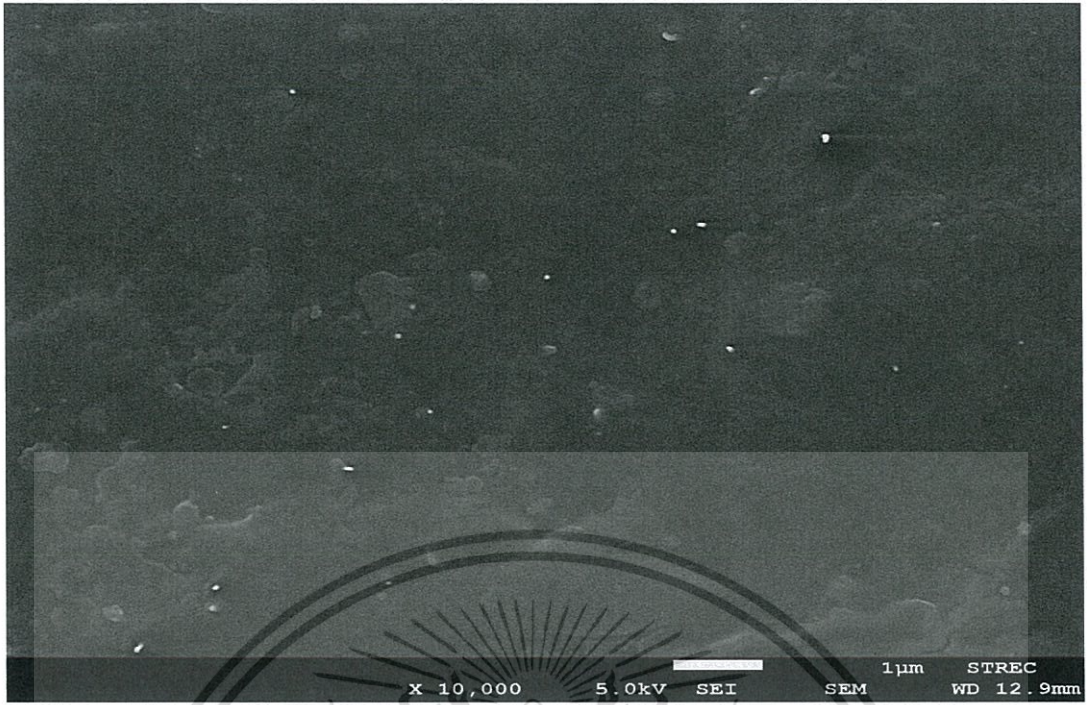
ดังนั้นการกระจายตัวของสารตัวเติมเดี่ยว (MWCNT หรือ CB) และสารตัวเติมผสม (MWCNT และ CB) ใน PU-ester นาโนคอมพอสิต ไม่ว่าจะใช้อัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB และความเข้มข้นใดๆ ทั้ง MWCNT และ CB ก็ยังคงสามารถกระจายตัวได้ดีและไม่พบการเกาะของ CB บน MWCNT ใน PU-ester เมทริกซ์



(b)

รูปที่ 4.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 5000x เท่าของ (a) 0.5EsCB และ (b) 3.0EsCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



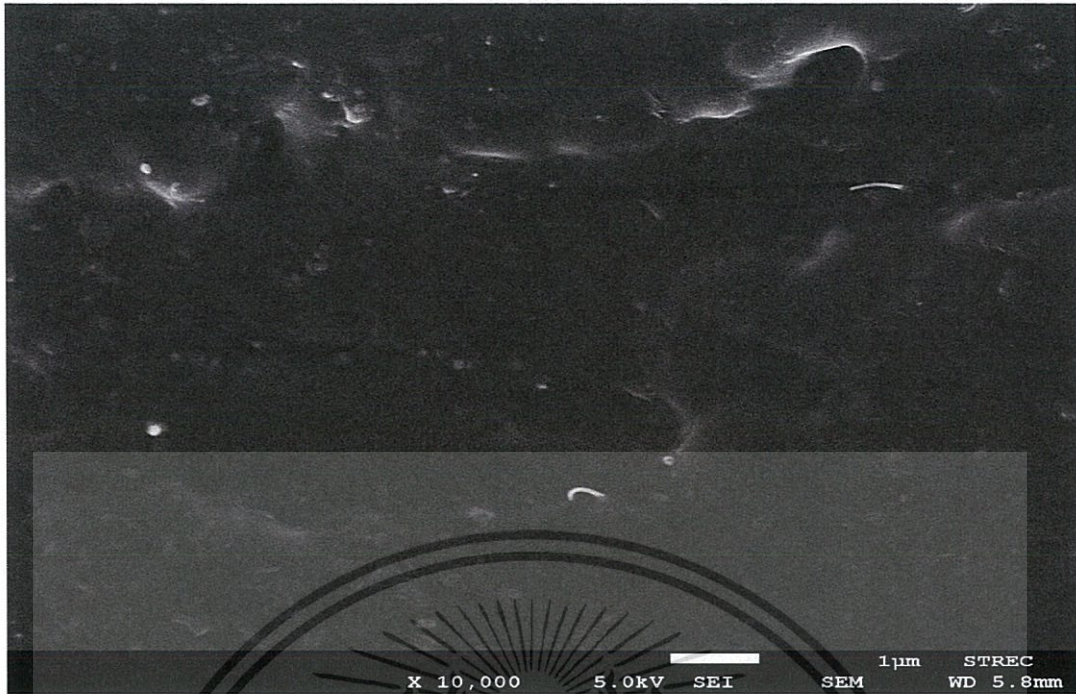
(a)



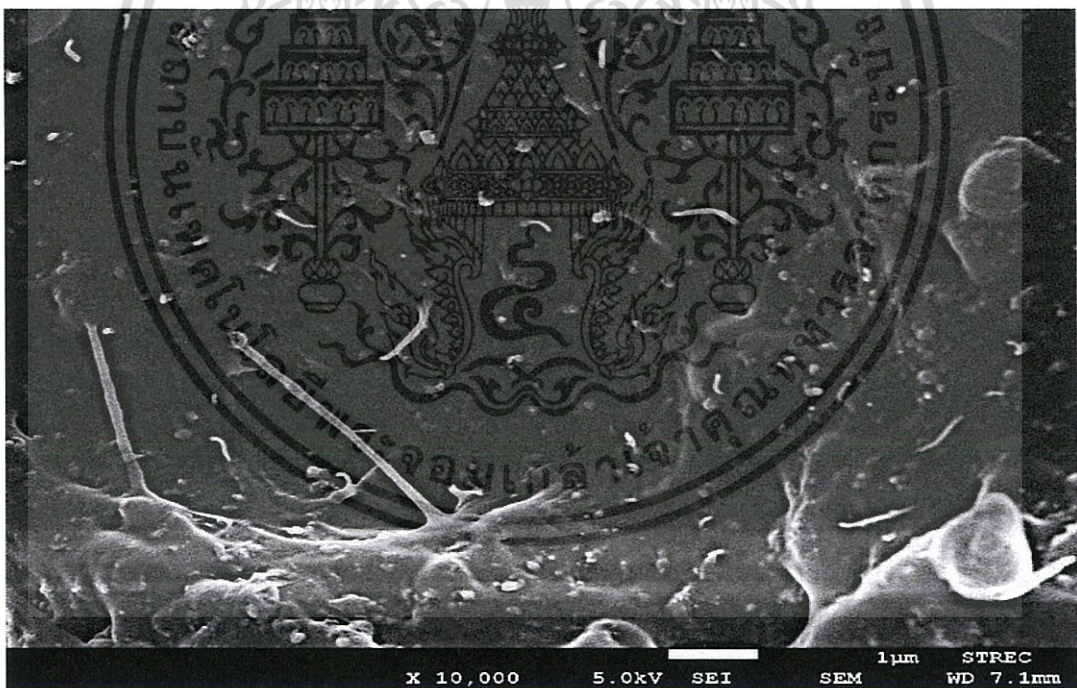
(b)

รูปที่ 4.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5EsMWCNT และ (b) 3.0EsMWCNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



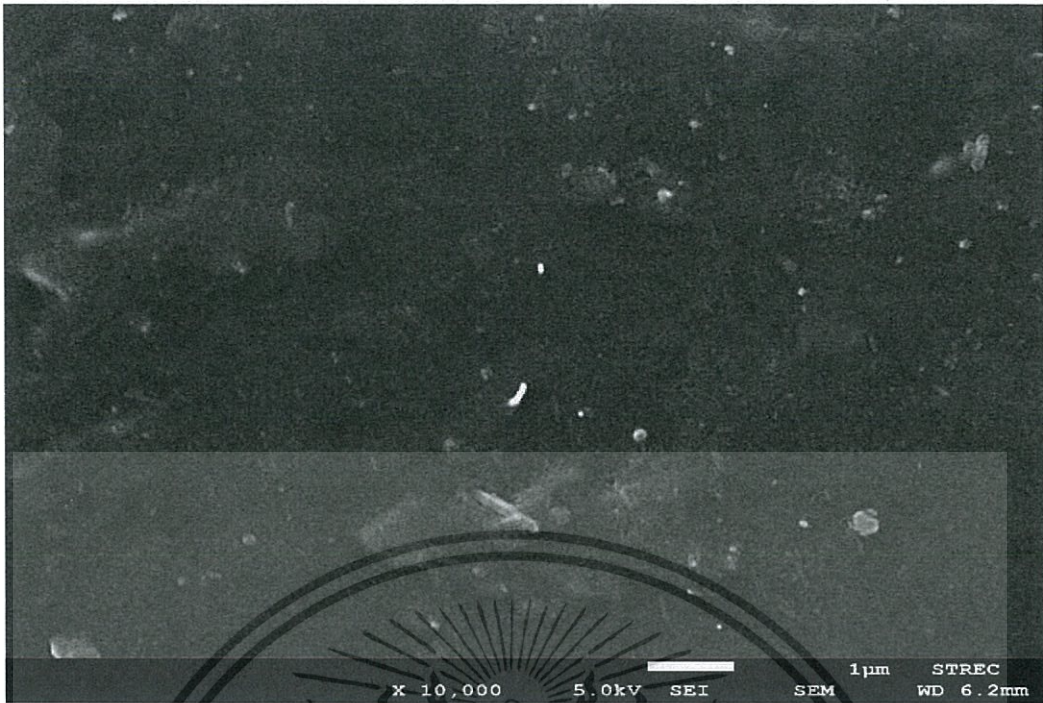
(a)



(b)

รูปที่ 4.6 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Es1:3 และ (b) 3.0Es1:3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.7 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Es1:7 และ (b) 3.0Es1:7

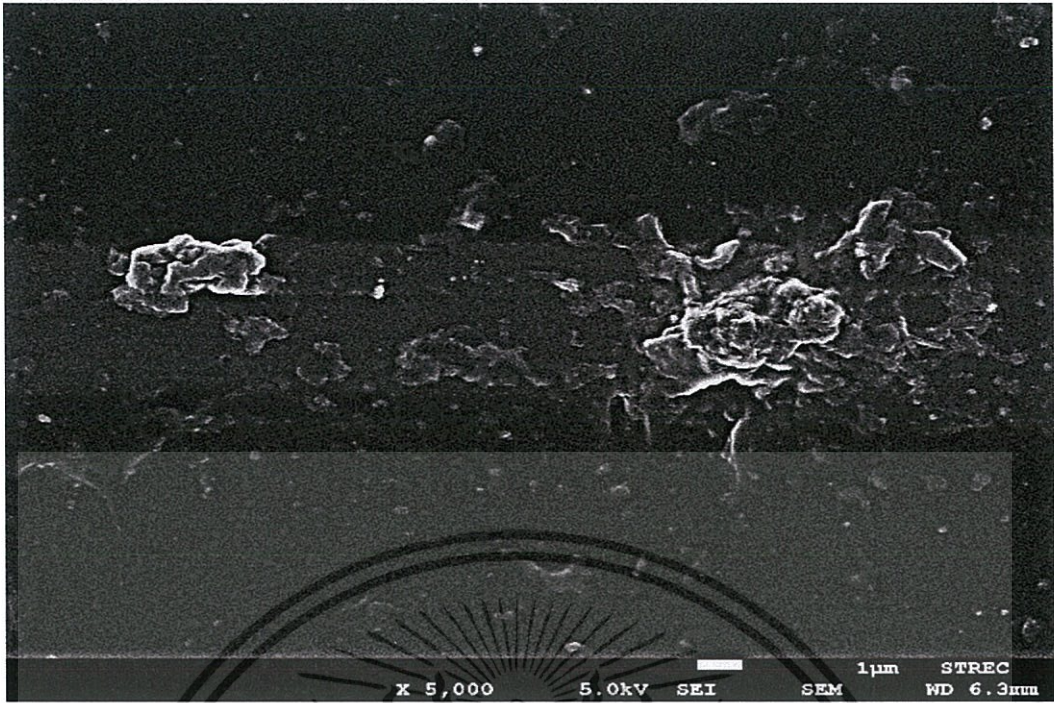
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ CB ใน PU-ether/CB นาโนคอมพอสิต โดยรูป 4.8 (a) และ (b) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่ความเข้มข้น CB 0.5 และ 3.0 %wt ตามลำดับ พบว่าแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของ CB อนุภาคทรงกลมของ CB ยังคงกระจายตัวดีและไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ใน PU-ether เมทริกซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก PU-ester นาโนคอมพอสิตก่อนหน้านี้

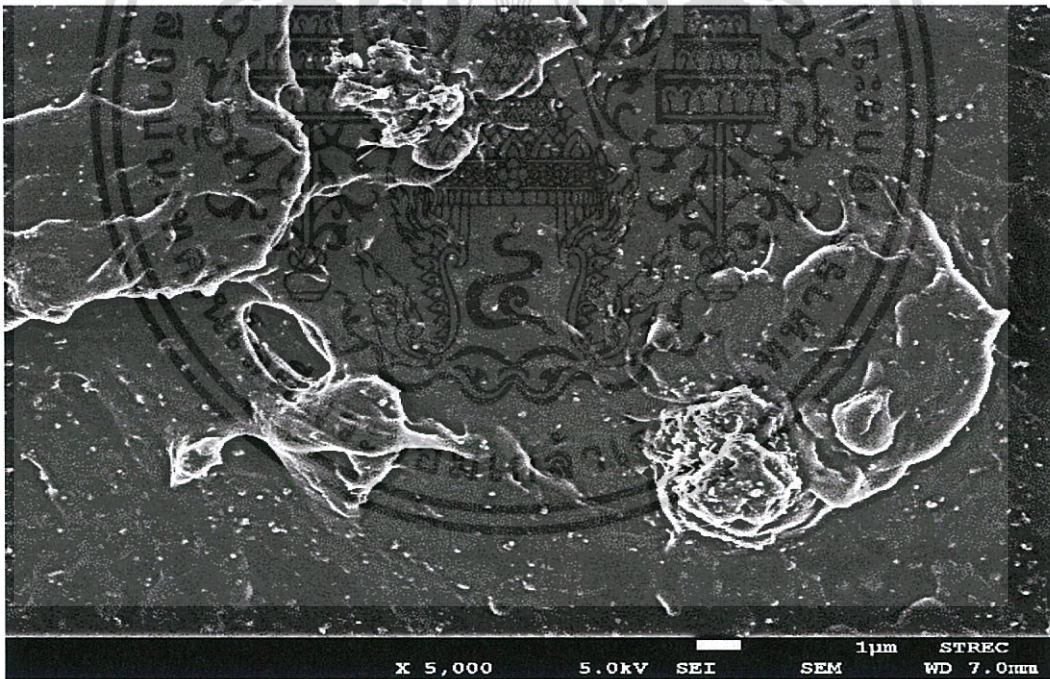
จากการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT ในตัวอย่าง PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต รูป 4.9 (a) และ (b) เป็นนาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น MWCNT 0.5 และ 3.0 %wt ตามลำดับ พบว่าอนุภาค MWCNT รูปทรงท่อ มีการกระจายตัวดี และไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใน PU-ether เมทริกซ์ แม้จะเติม MWCNT หรือ CB ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น แต่ทั้ง MWCNT และ CB ยังคงกระจายตัวได้ดีใน PU-ether เมทริกซ์ ซึ่งคล้ายคลึงกับผลที่เกิดขึ้นใน PU-ester นาโนคอมพอสิตเช่นกัน

ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในตัวอย่าง PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต โดยรูป 4.10 และ 4.11 เป็นการเตรียมคอมพอสิต ซึ่งรูป (a) และ (b) คือที่ความเข้มข้น 0.5 และ 3.0 %wt ตามลำดับ ที่ MWCNT:CB อัตราส่วน 1:3 และ 1:7 ตามลำดับ การเติมสารตัวเติมผสมที่ 0.5 %wt ในรูป 4.10 (a) และ 4.11 (a) พบว่าอนุภาค MWCNT และ CB มีการกระจายตัวดีและไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใน PU-ether เมทริกซ์ และในรูป 4.10 (b) และ 4.11 (b) สังเกตเห็นว่าแม้จะเพิ่มปริมาณ MWCNT และ CB ลงใน PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ผลที่ได้ยังคงเป็นเช่นเดียวกับ รูป 4.10 (a) และ 4.11 (a) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก PU-ester นาโนคอมพอสิตก่อนหน้านี้ ที่ถึงแม้ว่าอัตราส่วนของ MWCNT:CB และความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลงแต่อนุภาคของ MWCNT และ CB มีการกระจายตัวดีและไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใน PU-ether เมทริกซ์

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 (a) และ (b) ที่กำลังขยาย (50000x) เพื่อเปรียบเทียบความเข้ากันได้กับ PU เมทริกซ์จะพบว่าเมื่อทำการดัดยัด PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 3.0 %wt ในรูป 4.11 (a) สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ MWCNT มีส่วนที่ยื่นออกมาจากพื้นผิวเมทริกซ์มากกว่ารูป 4.12 (b) ที่มีอนุภาคของ MWCNT ยื่นออกมาจากพื้นผิว PU-ether เมทริกซ์เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต มีความสามารถในการส่งผ่านแรง (Stress transfer) ได้มากกว่า PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความทนแรงดึงที่ 3.0Es1:3 มีค่า % improvement ความทนแรงดึงเมื่อเทียบกับ Pu ที่ไม่มีสารตัวเติมมากกว่า 3.0Eh1:3 (39% และ 10% ตามลำดับ)



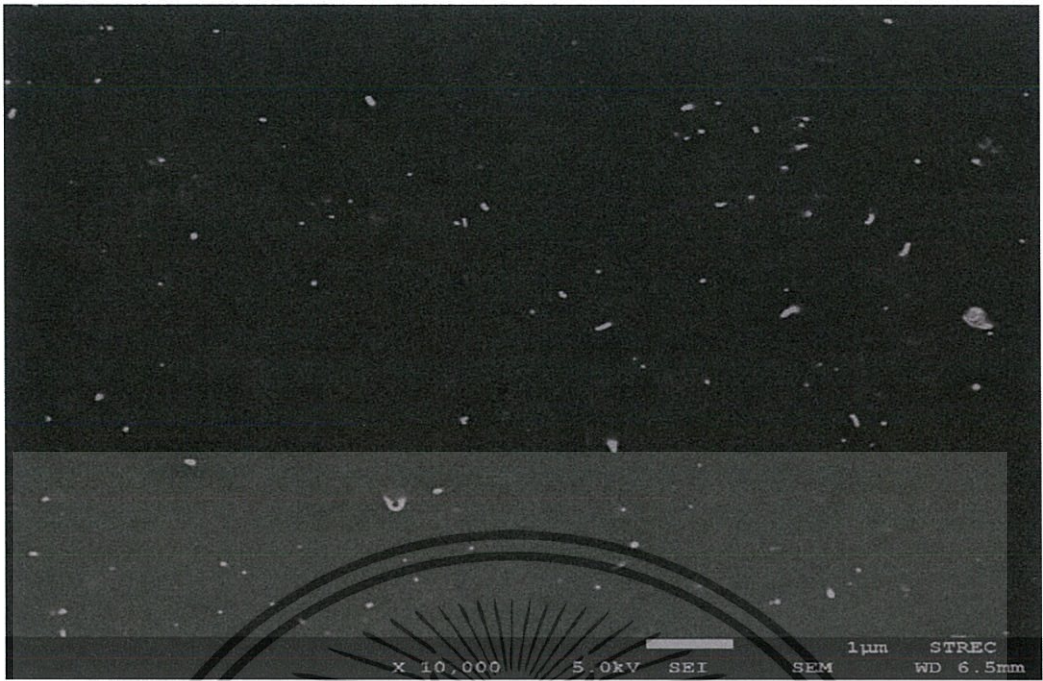
(a)



(b)

รูปที่ 4.8 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 5000x เท่าของ (a) 0.5EthCB และ (b) 3.0EthCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.9 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5EthMWCNT และ (b) 3.0EthMWCNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



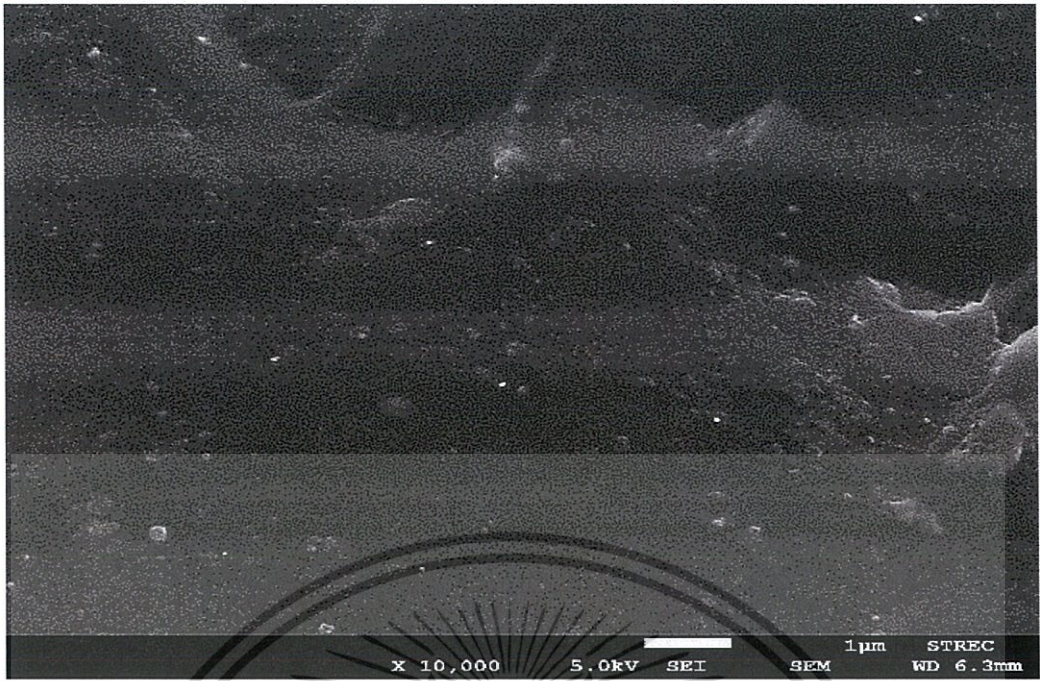
(a)



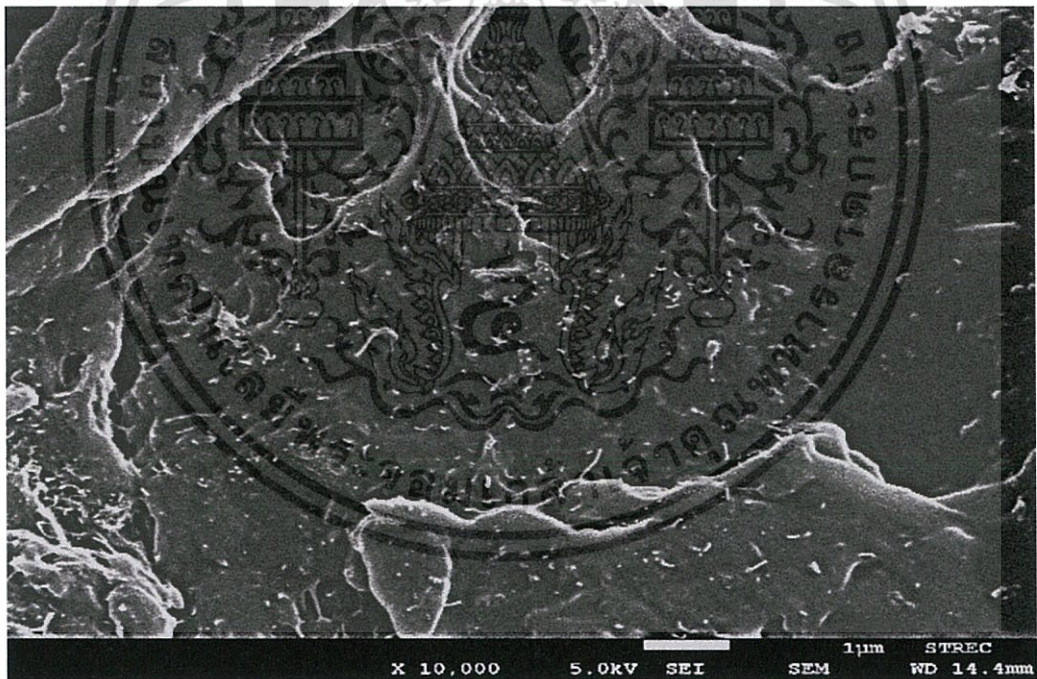
(b)

รูปที่ 4.10 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Eth1:3 และ (b) 3.0Eth1:3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.11 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x เท่าของ (a) 0.5Eth1:7 และ (b) 3.0Eth1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



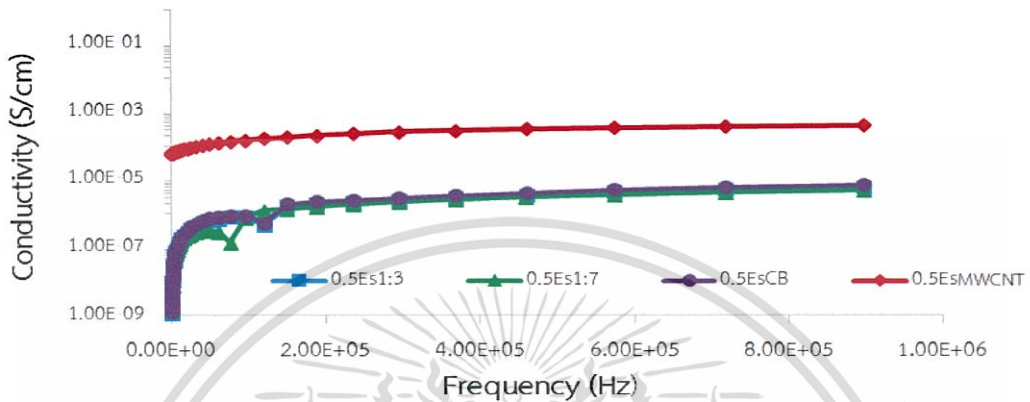
(b)

รูปที่ 4.12 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 50000x เท่าของ (a) $3.0E_s1:3$ และ (b) $3.0E_{th}1:3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

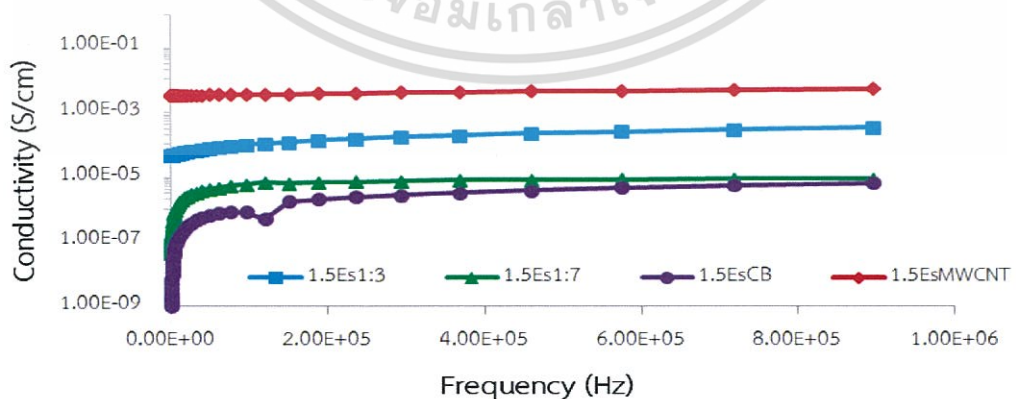
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter

การศึกษาค่านำไฟฟ้าของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต โดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่ 20 ถึง 1×10^6 Hz แล้วนำมาคำนวณให้เป็นค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิต การเติมสารตัวเติมในสูตรต่างๆ ในปริมาณความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt แสดงค่าดังรูปกราฟที่ 4.13-4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 0.5 %wt

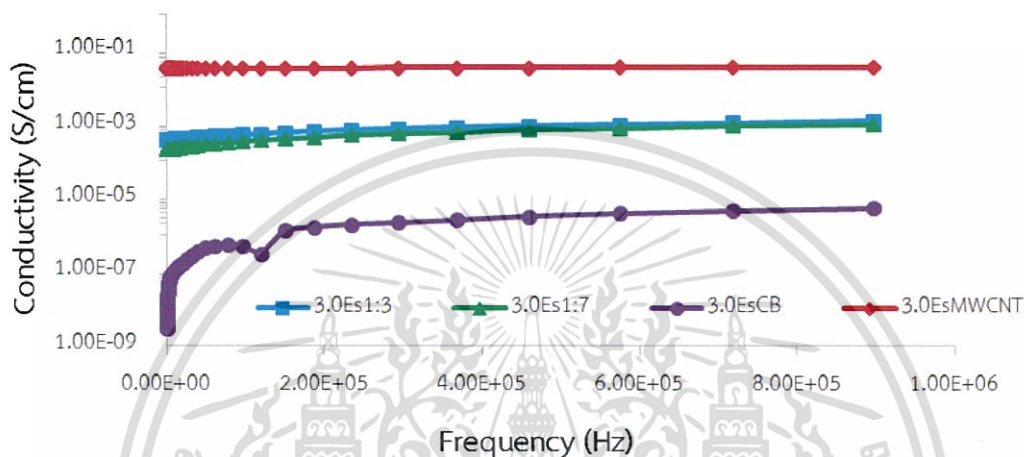
ในรูปที่ 4.13 แสดงกราฟค่านำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิต ในสูตร 0.5 %wt ที่เติมสารตัวเติมแบบต่างๆ พบว่าสูตร 0.5EsCB ที่เป็นการเติม CB อย่างเดียว สูตร 0.5Es1:3 ที่เติม MWCNT:CB อัตราส่วน 1:3 และสูตร 0.5Es1:7 ที่เติม MWCNT:CB อัตราส่วน 1:7 ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และจะเริ่มมีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz ขึ้นไป ส่วนสูตร 0.5EsMWCNT ซึ่งเป็นการเติม MWCNT อย่างเดียว ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz ค่านำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความถี่ หลังจากนั้นก็มีค่านำไฟฟ้าที่คงที่



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 1.5 %wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

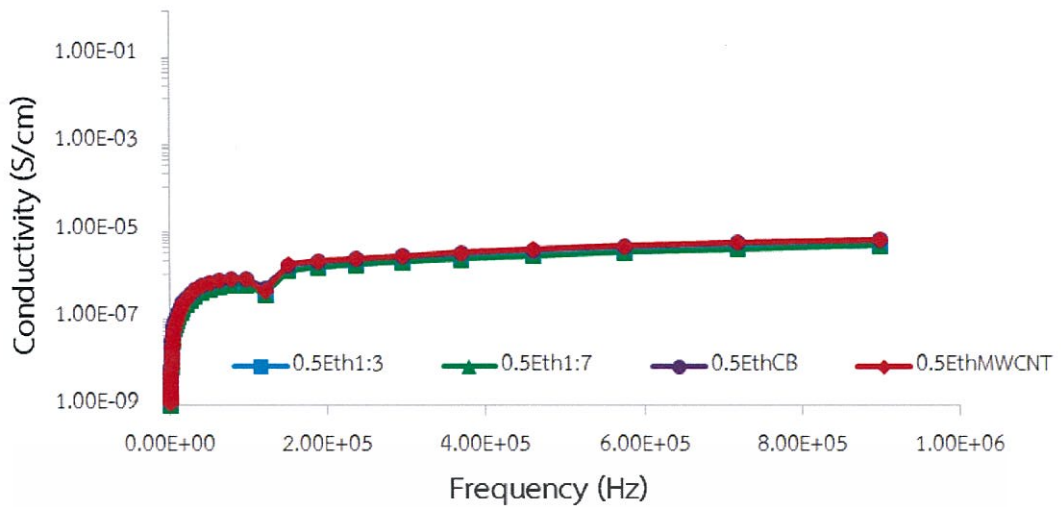
เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิตในสูตร 1.5 %wt ในรูปที่ 4.14 ที่เติม MWCNT:CB อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสูตร 1.5Es1:7 และสูตร 1.5EsCB ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะพบค่าการนำไฟฟ้าที่คงที่ ในขณะที่สูตร 1.5Es1:3 ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความถี่เพียงเล็กน้อยและพบค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าคงที่เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้น ส่วนสูตร 1.5EsMWCNT พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 3.0 %wt

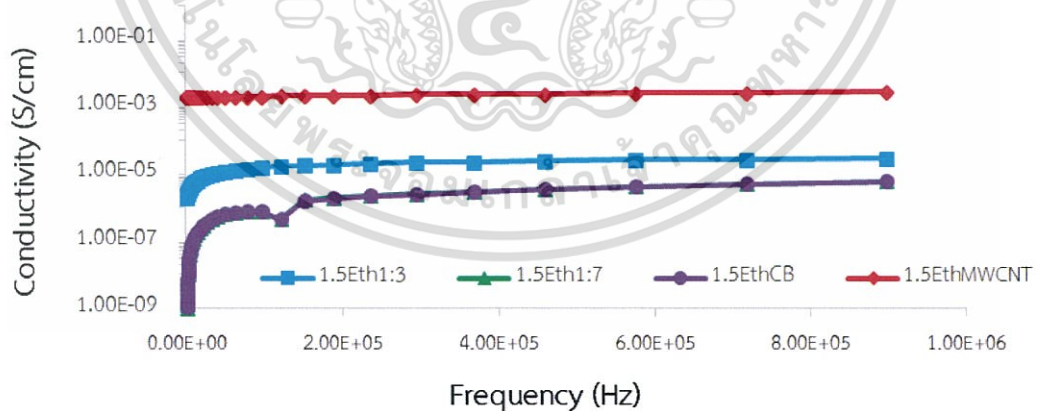
เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่ความเข้มข้น 3.0 %wt ในรูปที่ 4.15 พบว่าสูตร 3.0EsCB ค่าการนำไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ยังคงมีรูปแบบเดิมเหมือนสูตรความเข้มข้น 0.5 และ 1.5 %wt ในขณะที่สูตร 3.0Es1:3 และสูตร 3.0Es1:7 พบลักษณะกราฟที่คล้ายคลึงกัน คือ ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความถี่เล็กน้อยและเริ่มมีค่าการนำไฟฟ้าคงที่หลังจากนั้น ส่วนสูตร 3.0EsMWCNT พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา

ค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่มีการเติมสารตัวเติมในสูตรต่างๆ ในปริมาณความเข้มข้น 0.5, 1.5 และ 3.0 %wt แสดงค่าดังรูปกราฟที่ 4.16-4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิตที่มีความเข้มข้น 0.5 %wt

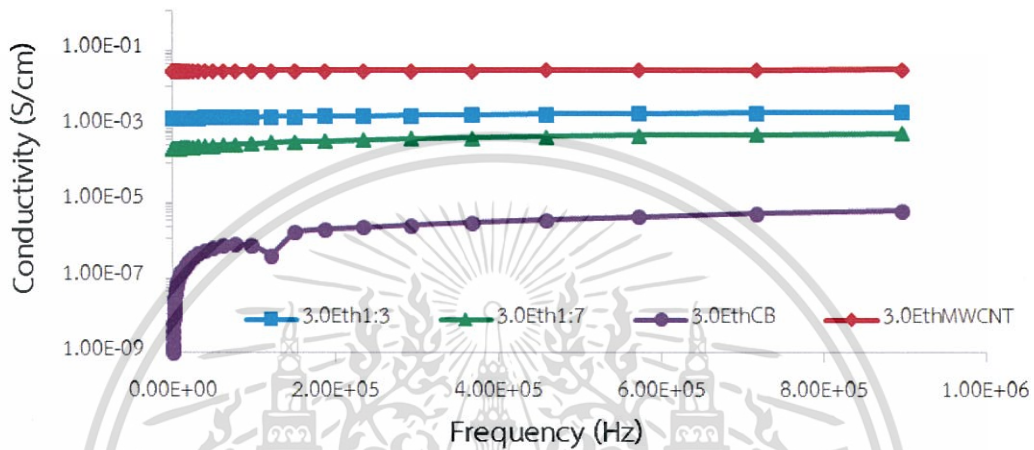
จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิต ปริมาณความเข้มข้น 0.5 %wt ที่เติมสารตัวเติมแบบต่างๆ พบว่าสูตร 0.5Eth1:3 ที่เติม MWCNT:CB อัตราส่วน 1:3 สูตร 0.5Eth1:7 ที่เติม MWCNT:CB อัตราส่วน 1:7 สูตร 0.5EthCB ที่เป็นการเติม CB อย่างเดียว และสูตร 0.5EthMWCNT ซึ่งเป็นการเติม MWCNT อย่างเดียว ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และเริ่มมีค่าการนำไฟฟ้าคงที่หลังจากนั้น



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิตที่มีความเข้มข้น 1.5 %wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

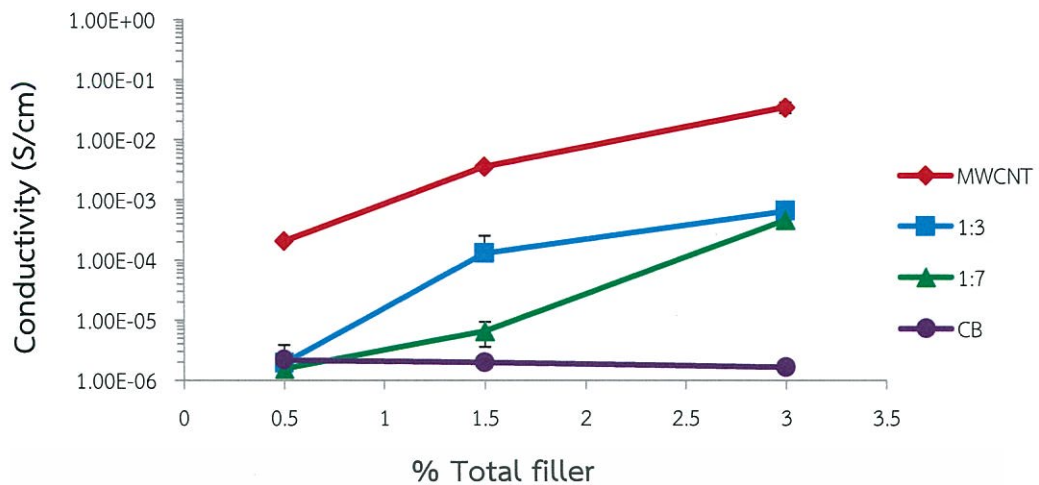
เมื่อพิจารณากราฟค่านำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ความเข้มข้น 1.5 %wt ในรูปที่ 4.17 ที่เติม MWCNT:CB อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสูตร 1.5EthCB และสูตร 1.5Eth1:7 ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นและเริ่มมีค่าการนำไฟฟ้าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ในขณะที่สูตร 1.5Eth1:3 ที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 1.88×10^5 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความถี่เล็กน้อย แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นพบค่านำไฟฟ้ามีค่าคงที่ ส่วนสูตร 1.5EsMWCNT พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิตที่ความเข้มข้น 3.0 %wt

เมื่อพิจารณากราฟค่านำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ความเข้มข้น 3.0 %wt ในรูปที่ 4.18 เมื่อเติมสารตัวเติมแบบต่างๆ พบว่าสูตร 3.0EthCB ค่านำไฟฟ้าที่ตรวจพบยังคงมีรูปแบบเดิมเหมือนสูตรความเข้มข้น 0.5 และ 1.5 %wt ในขณะที่สูตร 3.0Eth1:7, 3.0Eth1:3 และ 3.0EthMWCNT พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา

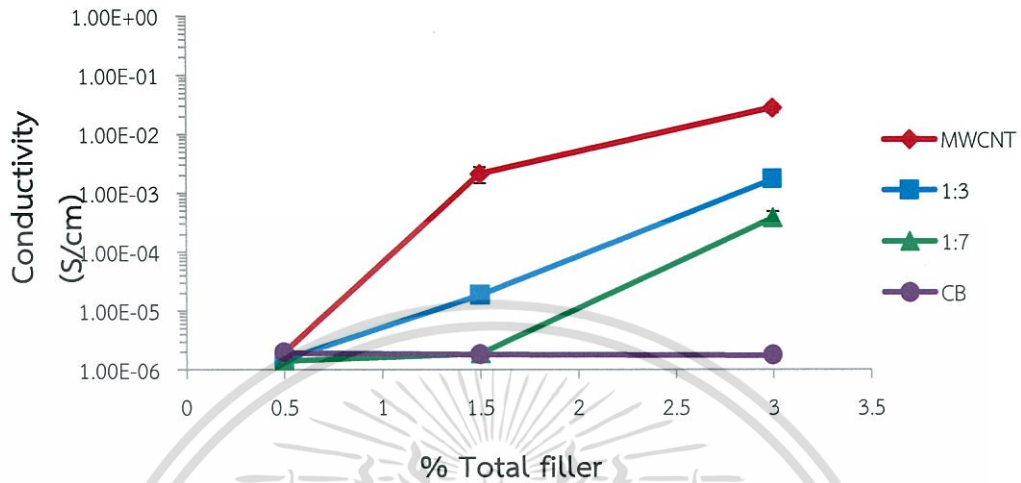
จากข้อมูลและกราฟที่กล่าวมา จึงได้พิจารณากำหนดค่านำไฟฟ้าที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่ทุกสูตรมีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ เพื่อนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณรวมของสารตัวเติมที่เติมลงใน PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณรวมของสารตัวเติมที่เติมลงใน PU-ester นาโนคอมพอสิตที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz

ในรูปที่ 4.19 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิตในสูตรต่างๆ ที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz สังเกตได้ว่าในสูตรที่เติมสารตัวเติมเดี่ยว MWCNT มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดในทุกปริมาณรวมของสารตัวเติมและมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเติม CB ลงไปผสมในอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 และ 1:7 ที่ปริมาณรวมของสารตัวเติม 0.5 %wt จะมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติมเป็น 1.5 และ 3 %wt อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่ดีของ MWCNT ส่วนอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:7 จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติมเป็น 1.5 %wt แต่จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงเทียบเท่า อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 เมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติมเป็น 3.0 %wt แม้จะมีสัดส่วน MWCNT ที่แตกต่างกัน เนื่องจากการอิมตัวของค่าการนำไฟฟ้าที่สารตัวเติมปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Andreoli และคณะ [42] ที่พบว่าเมื่อเติมสารตัวเติมปริมาณสูง ค่าการนำไฟฟ้าของ MWCNT คอมพอสิต จะมีค่าคงที่และมีค่าใกล้เคียงกับ CB คอมพอสิต ซึ่งจำเป็นต้องเติม CB ความเข้มข้น 8.7 %wt ขึ้นไป จึงจะทำให้ CB คอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับ MWCNT คอมพอสิตที่ความเข้มข้น 5.4 %wt ส่วนในงานวิจัยนี้ สูตรที่เติมสารตัวเติมเดี่ยว CB มีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ในทุกๆปริมาณรวมของสารตัวเติม เนื่องจากตามธรรมชาติ CB มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ โดยใน PU-ester นาโนคอมพอสิตแบบสารตัวเติมผสม สูตรที่นำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 3.0Es1:3 โดยให้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.27×10^{-3} S/cm ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 3 magnitude (227 เท่า) เมื่อเทียบกับ 3.0EsCB และมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง 1 magnitude (1 เท่า) เมื่อเทียบกับ 3.0EsMWCNT แต่เมื่อพิจารณาในด้านการลดต้นทุน สามารถเลือกใช้สูตร 3.0Es1:7 ได้ ซึ่งให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดใกล้เคียงกับสูตร 3.0Es1:3 เนื่องจาก MWCNT และ CB ที่เติมลงใน PU-ester นาโน

คอมพอสิต กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างที่ต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB ไม่มีผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้า เมื่อมีการเติมสารตัวเติมปริมาณสูง



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณรวมของสารตัวเติมที่เติมลงใน PU-ether นาโนคอมพอสิตที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz

เมื่อศึกษาการนำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิตในสูตรต่างๆ ที่ความถี่ 1.88×10^5 Hz ดังในรูป 4.20 สังเกตได้ว่าในสูตรที่เติมสารตัวเติมเดียว MWCNT มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดในทุกปริมาณรวมของสารตัวเติมและเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MWCNT ที่เติมลงไป ซึ่งคล้ายคลึงกับที่พบใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ส่วนสูตรที่เติมสารตัวเติมเดียว CB มีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ในทุกๆปริมาณรวมของสารตัวเติม เช่นเดียวกับที่พบใน PU-ester/CB นาโนคอมพอสิต ในขณะที่เมื่อเติม CB ลงไปผสมในอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 และ 1:7 ที่ปริมาณรวมของสารตัวเติม 0.5 %wt จะมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติมเป็น 1.5 %wt อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่ดีของ MWCNT ในขณะที่อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:7 จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติมเป็น 1.5 %wt และสูตรสารตัวเติมผสมทั้ง 2 อัตราส่วนจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติมเป็น 3.0 %wt และจะพบความแตกต่างระหว่างสัดส่วนที่ 1:3 และ 1:7 ที่ลดลง เนื่องจาก MWCNT และ CB เกิด Synergistic effect ต่อกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [44] โดยใน PU-ester นาโนคอมพอสิตแบบสารตัวเติมผสม สูตรที่นำไฟฟ้าดีที่สุดคือ 3.0Eth1:3 โดยให้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.23×10^{-3} S/cm ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 3 magnitude (404 เท่า) เมื่อเทียบกับ 3.0EthCB และมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง 1 magnitude (1 เท่า) เมื่อเทียบกับ 3.0EthMWCNT และจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB มีผลกระทบต่อค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไฟฟ้าในทุกปริมาณความเข้มข้นของสารตัวเติม ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก MWCNT และ CB ที่เติมลงใน PU-ether นาโนคอมพอสิต กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนเดียวกันนั่นเอง

เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของ PU นาโนคอมพอสิต ที่เติมสารตัวเติมแบบผสม พบว่ามีค่าสูงกว่า PU/CB นาโนคอมพอสิต ที่มีการเติม CB เพียงอย่างเดียว บ่งชี้ให้เห็นว่า CB ที่ผสมลงในนาโนคอมพอสิตสามารถสร้างโครงข่ายเชื่อมโยงร่วมกันกับ MWCNT เกิดเป็นเส้นทางการนำไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของสารตัวเติมผสม พบว่าสูตร MWCNT:CB ที่ 1:3 จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของสูตรสารตัวเติมผสมอัตราส่วน 1:3 กับสูตรสารตัวเติมเดี่ยว CB ของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต จะพบว่า PU-ether นาโนคอมพอสิต มีค่าการนำไฟฟ้า (สูงขึ้น 404 เท่า) สูงกว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต (สูงขึ้น 227 เท่า) ซึ่งสอดคล้องกับผลของ DSC ที่บ่งชี้ว่า PU-ether มี MWCNT และ CB กระจายอยู่ในโครงสร้างส่วนนี้เหมือนกัน สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสายโซ่ในส่วนแข็ง ส่งผลให้เกิดการสร้างเส้นทางการนำไฟฟ้าในส่วนนี้ได้ดี อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลจาก UTM ที่ PU-ether นาโนคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลดีกว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตัวเติมเดี่ยว (MWCNT หรือ CB) และสารตัวเติมผสม (MWCNT และ CB) ต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน และการนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิต รวมถึงเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนึ่งที่แตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) จากผลการศึกษาของเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเติม MWCNT และ CB จะทำให้ PU เมทริกซ์ทั้งสองชนิดให้เกิด Microphase separation มากขึ้น โดยใน PU-ether นาโนคอมพอสิต MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนเดียวกันคือโครงสร้างส่วนนึ่ง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT และ CB จะไม่เกิดการรบกวนผลึกในโครงสร้างส่วนแข็ง ส่วน PU-ester นาโนคอมพอสิต พบว่า MWCNT กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนนึ่งและ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนแข็ง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT ไม่เกิดการรบกวนผลึกในโครงสร้างของส่วนแข็ง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CB ทำให้ความเป็นผลึกในโครงสร้างส่วนแข็งลดลง เนื่องจาก CB ไปขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเติม MWCNT และ CB ทำให้เกิดการแยกฟิสิกของ T_{MMT} ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น (T_{MMT1} และ T_{MMT2}) โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นแสดงถึงความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เพิ่มมากขึ้นและโครงสร้างที่เรียงชิดติดกัน

ส่วนด้านสมบัติเชิงกลของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นรวมสารตัวเติม โดยสูตรสารตัวเติมเดี่ยว 3.0EsMWCNT และ 3.0EthMWCNT มีค่า Young's modulus สูงที่สุด ส่วนสูตรสารตัวเติมผสม 3.0Es1:3 และ 3.0Eth1:3 มีค่า Young's modulus สูงที่สุด และเมื่อนำสูตรสารตัวเติมผสมที่อัตราส่วน 1:3 มาเปรียบเทียบกับ UnfilledEs และ UnfilledEth พบว่ามี % improvement อยู่ในช่วง 296-433, 368-457 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการทดแทน MWCNT และ CB ที่ความเข้มข้น 3.0 %wt ในอัตราส่วน 1:3 ของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิตพบว่า MWCNT มี % improvement ลดลงประมาณ 21% และ CB มี % improvement ลดลงประมาณ 9% ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตพบว่า MWCNT มี % improvement ลดลงประมาณ 7% และ CB มี % improvement เพิ่มขึ้นประมาณ 11% ซึ่ง PU-ether นาโนคอมพอสิตมีแนวโน้ม % improvement มากกว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต เนื่องจาก PU-ether นาโนคอมพอสิต มีการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในโครงสร้างส่วนเดียวกัน ทำให้สามารถเสริมความแข็งแรงได้มากกว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่มีการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยสามารถศึกษาการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ได้ด้วยเทคนิค FESEM พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT กับ CB และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน แต่สารตัวเติมทั้งสองชนิดยังคงกระจายตัวและเข้ากันได้ดีใน PU เมทริกซ์ และพบว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต มีความสามารถในการส่งผ่านแรง (Stress transfer) ได้มากกว่า PU-ether นาโนคอมพอสิต เนื่องจากเมื่อให้แรงดึงกับนาโนคอมพอสิต พบว่ารอยดึงของ MWCNT ใน Pu-ester นาโนคอมพอสิตมีขนาดยาวกว่า Pu-ether นาโนคอมพอสิต อีกทั้ง MWCNT สามารถยึดเกาะกับ Pu-ester นาโนคอมพอสิตได้ดีกว่า PU-ether นาโน

คอมพอสิต ส่งผลให้ Pu-ester นาโนคอมพอสิตมีค่า Tensile strength สูงกว่า Pu-ether นาโนคอมพอสิต

เมื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ให้ค่านำไฟฟ้าสูงที่สุด ตามด้วย PU/MWCNT/CB และ PU/CB นาโนคอมพอสิต โดยค่าการนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT และ PU/MWCNT/CB มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติม ส่วน PU/CB นาโนคอมพอสิต ให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุดและมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณรวมของสารตัวเติมจนถึง 3%wt จึงมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต พบว่ามีค่าสูงกว่า PU/CB นาโนคอมพอสิต ทำให้ทราบว่า MWCNT และ CB ที่ผสมลงในนาโนคอมพอสิตมีความสามารถในการสร้างโครงข่ายเชื่อมโยงแบบไม่เกาะกัน นำมาซึ่งเส้นทางการนำไฟฟ้า (Conductive pathway) ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาสูตรสารตัวเติมผสมอัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB ที่ 1:3 ปริมาณความเข้มข้น 3 %wt ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดทั้งใน PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต ซึ่งมีความเป็นนาโนคอมพอสิตกึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor) โดย PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 1.27×10^{-3} S/cm และ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 2.23×10^{-3} S/cm ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 227 เท่า และ 404 เท่าตามลำดับ เมื่อเทียบกับการเติม CB ที่ 3 %wt เพียงอย่างเดียว โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบการนำไฟฟ้าของ PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิต พบว่าใน PU-ether นาโนคอมพอสิต อัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB มีผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้าในทุกปริมาณความเข้มข้นของสารตัวเติม เนื่องจาก MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนนิ่มเหมือนกันและมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า PU-ester นาโนคอมพอสิตซึ่งอัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB ไม่มีผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้าเมื่อมีการเติมสารตัวเติมปริมาณสูง (3 %wt) เนื่องจาก MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างคนละส่วนกัน โดย MWCNT กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนนิ่ม และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนแข็ง ดังที่กล่าวมาในผลการทดสอบ DSC

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเติมสารตัวเติมเดี่ยวและสารตัวเติมผสมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมพอสิต โดยมีปัจจัยดังต่อไปนี้ ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ปริมาณของคาร์บอนแบล็ค และอัตราส่วนความเข้มข้นของนาโนทิวบ์และคาร์บอนแบล็ค ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสุทธิของสารตัวเติมที่เท่ากัน สามารถสรุปข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย ได้แก่

1. ศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนนาโนทิวบ์และคาร์บอนแบล็คในพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิคาร์บอนเนต อีพ็อกซี เป็นต้น
2. ศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับสารตัวเติมระดับนาโนชนิดอื่น เช่น แกรไฟต์ ผงโลหะ เป็นต้น
3. ศึกษาปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้นของสารตัวเติมเดี่ยวและสารตัวเติมผสมระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับคาร์บอนแบล็ค
4. ศึกษาการขึ้นรูปแผ่นนาโนคอมพอสิต โดยไม่เกิดฟองอากาศบนชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] หลุทภักดิ์ กীরติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตร. 2552. “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ.” *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*. 22(70) : 18-32.
- [2] Cairns, D. 2009. “Composite Materials for Aircraft Structures.” Department of Mechanical and Industrial Engineering Montana State University.
- [3] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2010. **Composites**. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services>.
- [4] Clingerman, M.L. 1998. “Development and Modelling of Electrically Conductive Composite Materials.” Ph.D. dissertation in Chemical Engineering, Michigan Technological University.
- [5] Yeetsorn Rungsima, Fowler Michael and Tzoganakis Costas. 2011. “A Review of Thermoplastic Composites for Bipolar Plate Materials in PEM Fuel Cells.” *Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry*. 6 : 318-330.
- [6] Wang Linda. 2006. **Polyurethane Foam**. [Online]. Available : <https://pubs.acs.org/cen/whatstuff/84/8402foam.html>.
- [7] Yoochang Hi-tech. 2018. **Polyurethane**. [Online]. Available : <http://www.ybsworld.com/home/en/polyurethan>.
- [8] เบญจพร หนูคล้าย. 2551. “วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและตัวเติมนาโนเป็นตัวตรวจรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์.” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*.
- [9] สถาพร คำหอม. 2015. **Carbon nanotube**. [Online]. Available : <https://www.rsu.ac.th/engineer/chem/news>.
- [10] Zannotti Marco, Giovannetti Rita, D'Amato Chiara Anna, Rommozzi Elena. 2016. “Spectroscopic studies of porphyrin functionalized multiwalled carbon nanotubes and their interaction with TiO₂ nanoparticles surface.” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 153 : 22-29.
- [11] Sadyraliev Diyar. 2018. **Carbon Black History & Properties**. [Online]. Available : <https://nanografi.com/blog/carbon-black-history-properties>.
- [12] นิชนันท์ โตมีงี, ประภาพร แสงอรุณ, และพัชัญญ์กัญญ์ วิเศษสุวรรณ. 2016. “การศึกษาการเติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิยูริเทนนาโนคอมพอสิต.” *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [13] ปัทมาพร พ่วงงามพันธุ์. 2557. “การสังเคราะห์พอลิยูริเทนที่มี Diacetylene Unit โดยมีพอลิเอธิลีนเทอเรพเทอเรตพอลิออลเป็นสารขยายสายโซ่.” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

- [14] Norbert Adam, Geza Avar, Herbert Blankenheim, Wolfgang Friederichs, Manfred Giersig, Eckehard Weigand, Michael Halfmann, Friedrich-Wilhelm Wittbecker, Donald+Richard Larimer, Udo Maier Sven, Meyer-Ahrens, Karl-Ludwig Noble and Hans-Georg Wussow. 2005. "Polyurethanes." *Polymers and Plastics*. 2 : 1-56.
- [15] สีนินาฏ ไทยบุญรอด. 2551. "การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตรพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [16] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2018. **นาโนเทคโนโลยีจากระบบธรรมชาติสู่การสังเคราะห์.** [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-8.html>
- [17] ศิริกาญญา ทองมี. 2013. "การผลิตและสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน." *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 5(10) : 97-109.
- [18] A. K. Geim and K S. Novoselov. 2007. "The Rise of Graphene." *Nature Materials*. 6 : 183-191.
- [19] Ganesh, E.N. 2013. "Single walled and Multi walled Carbon Nanotubes Structure, Synthesis and Application." *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 13(2) : 2278-3075.
- [20] Rochester Institute of Technology. 2018. **Nano-fiber concrete.** [Online]. Available : <http://baoteachingcet.com/3.html>
- [21] Alexandra Vyatskikh. 2015. "Transparent and conductive hybrid graphene/carbon nanotube films." Degree of Master of Science Skolkovo Institute of Science and Technology.
- [22] อภิชาติ ตำนวิทยากุล. 2553. "ท่อนาโนคาร์บอน วัสดุในอนาคต." *เทคโนโลยีวัสดุ*. 6 : 13-18.
- [23] ฐิยาพร ปานสง. 2555. "การเติมท่อนาโนคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในกาวยางต่างๆ." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [24] Nanosafety database. 2018. **Carbonnanotubes.** [Online]. Available : <http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/eri/nanodatabase/info2>.
- [25] Federal Ministry of Education and Research. 2018. **Carbon Black.** [Online]. Available : <https://www.nanopartikel.info/en/nanoinfo/materials/carbon-black/material-information>.
- [26] อธิพิล แจ้งชัด. 2545. **คู่มือประกอบการสอนเทคโนโลยียาง.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

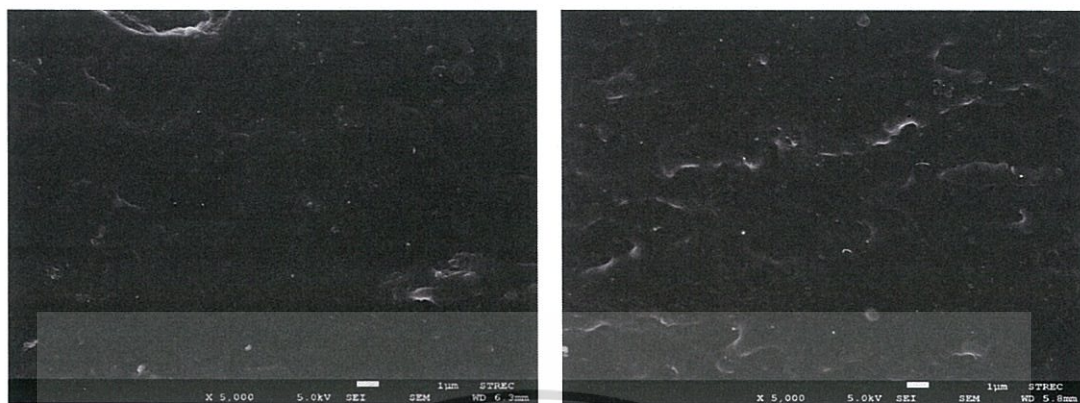
- [27] Monolith. 2018. **What is carbon black.** [Online]. Available : <http://monolithmaterials.com/innovative-technology/what-is-carbon-black>.
- [28] Premix. 2018. **Conductive carbon black.** [Online]. Available : <https://www.premixgroup.com/product-cats/conductive-compounds/conductive-carbon-black>.
- [29] นายประกิต ประทีปะเสน. 2556. “คาร์บอนแบล็ค.” หน้า 14. ใน รายงานข้อมูลแบบแสดงรายการข้อมูลประจำปีบริษัท ไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ
- [30] Mitsubishi chemical. 2006. **Application Examples of Carbon Black.** [Online]. Available : <http://www.carbonblack.jp/en/cb/youto.html>.
- [31] วรจกมล วารีสน้อยเจริญ. 2553. “การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในโภชนเภสัชภัณฑ์.” *คลินิกอาหารและโภชนาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. 4(2) : 77- 82.
- [32] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล. 2561. **นาโนเทคโนโลยีจากระบบธรรมชาติสู่การสังเคราะห์.** [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-11.html>.
- [33] วิภู ศรีสืบสาย. 2555. “ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความต้านทานแรงดึงและการประทุของไฟฟ้าสถิตของพลาสติก PC/ABS ที่ผสมเขม่าดำ.” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- [34] Olfa Kanou, Müller Christian, Benchirouf Abderahman Abdulkadir Sanli, Dinh Trong Nghia, Ammar Al-Hamry, Lei Bu, Gerlach Carina and Bouhamed Ayda. 2014. “Flexible Carbon Nanotube Films for High Performance Strain Sensors.” *Polymeric Micro Sensors and Actuators*. 14(6) : 10042-10071.
- [35] Russo, P. Acierno, D. Marletta, G. and Destri, G. “Tensile properties, thermal and morphological analysis of thermoplastic polyurethan films reinforced with multiwalled carbon nanotube.” *European Polymer Journal*. 49(2013) : 3315-3164.
- [36] Hoang Anh Son. 2011. “Electrical conductivity and electromagnetic interferenceshieldingcharacteristics of Multiwalled carbon nanotube filled polyurethane composite films.” *Nanoscience and Nanotechnology*. 2 : 1-5.
- [37] Huang Jinrui, Mao Cui, Zhu Yutian, Jiang Wei, Yang Xiaodong. 2014. “Control of carbon nanotubes at the interface of a co-continuous immiscible polymer blend to fabricate conductive composites with ultralow percolation.” *Carbon*. 73 : 267-274.
- [38] Marhoon Ismail Ibrahim. 2017. “Mechanical and Physical properties of polyurethane composites reinforced with carbon black N990 particles.” *Journal of Scientific &Technology*. 6 : 225-228.
- [39] Zhang qing-hua, Chen Da-jun. 2004. “Percolation threshold and morphology of composites of conducting carbon black/polypropylene/EVA.” *Journal of*
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Materials science.* 39 : 1751-1757.
- [40] Ramoˆa S´ilvia DAS, Barra Guilherme MO, Oliveira Ricardo VB, Cossad Mateus Oliveira Ma´rciaGde and Soaresd Bluma G. 2012. “Electrical, rheological and electromagnetic interference shielding properties of thermoplastic polyurethane/carbon nanotube composites.” *Society of ChemicalIndustry.* 62 : 1477–1484.
- [41] Andreoli Enrico, Liao Kang-Shyang, Cricini Adriano, Zhang Xin, Soffiatti Renzo, Byrne Hugh J, Byrne Seamus A. 2014. “Carbon black instead of multiwall carbon nanotubes for achieving comparable high electrical conductivities in polyurethane-based coatings.” *Thin Solid Films.* 550 : 558–563.
- [42] Potschke Petra, Arnaldo Muhammad Hans Radosch Hans-joachim. 2012. “Percolation behavior and mechanical properties of polycarbonate composites filled with carbon black/carbon nanotube systems.” *Polymer.* 57 : 204-211.
- [43] Zhang. S. M., Lin L., Deng H., Gao X., Bilotti E., Peijs T., Zhang Q., Fu Q. 2012. “Synergistic effect in conductive networks constructed with carbon nanofillers in different dimensions.” *Express Polymer Letters.* 6(2) : 159–168.
- [44] Ma Peng-Cheng, Liu Ming-Yang, Zhang Hao, Wang Sheng-Qi, Wang Rui, Wang Kai, Wong Yiu-Kei, Tang Ben-Zhong, Hong Soon-Hyung, Paik Kyung-Wook, and kim Jang-Kyo. 2009. “Enhanced electrical conductivity of nanocomposites containing hybrid fillers of carbon nanotubes and carbon Black.” *Applied Materials & Interfaces.* 1(5) : 1090–1096.
- [45] Netzsch. 2018. **Differential scanning calorimeter (DSC).** [Online]. Available : <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/differential-scanning-calorimetry>.
- [46] ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2018. **Universal Testing Machine.** [Online]. Available : <https://www.strec.chula.ac.th>.
- [47] Dumbbell.co.LTD. 2018. **Super Dumbbell Cutters Available List of Corresponding Standards.** [Online]. Available : https://www.hitachi-hightech.com/eu/product_detail/?pn=em-regulus&version.
- [48] ศูนย์วิศวกรรมวัสดุคุณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเกษตรศาสตร์ 2018. **Universal Testing Machine.** [Online]. Available : <https://www.mic.eng.ku.ac.th>.
- [49] Hitachi High-Technologies. 2018. **Field EmissionScanning Electron Microscope.** [Online]. Available : <https://www.hitachi-hightech.com/eu>.
- [50] บริษัท เทคโนโลยี เทสต์ ซิสเต็ม 2018. **LCR Meter.** [Online]. Available : <https://www.technotestsystem.com>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



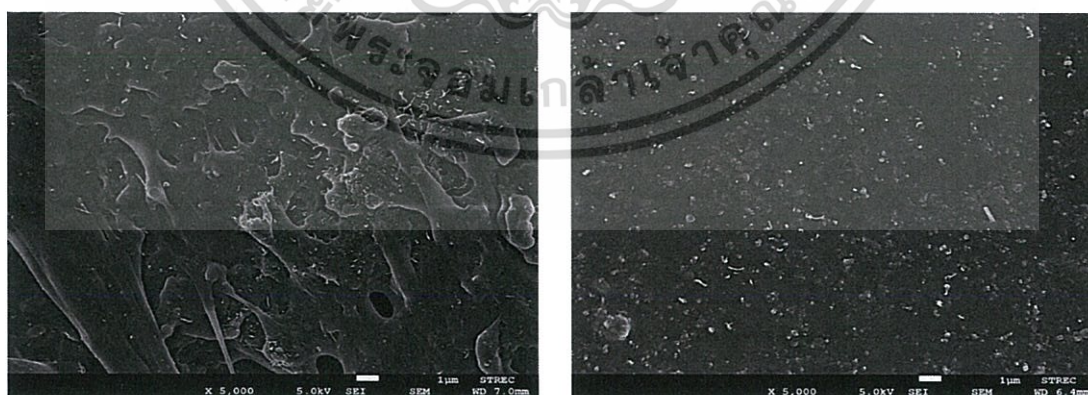
(a)

(b)



(c)

(d)

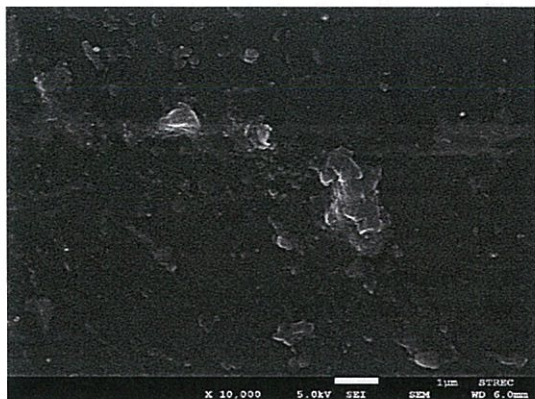


(e)

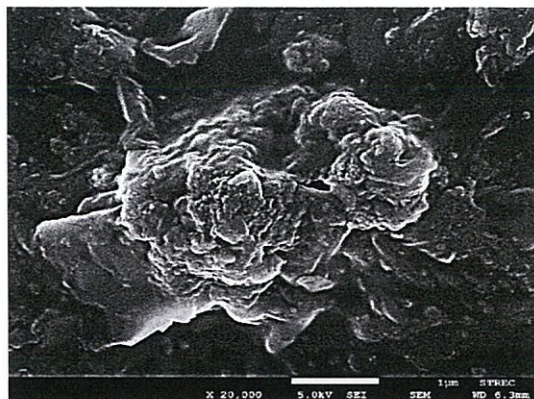
(f)

รูปที่ ก.1 ภาพ FESEM ของพื้นผิวที่แตกหักที่กำลังขยาย $\times 5000$ ของสูตร (a) 0.5EsMWCNT, (b) 0.5Es1:3, (c) 0.5Es1:7, (d) 3.0EsMWCNT, (e) 3.0Es1:3 และ (f) 3.05Es1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



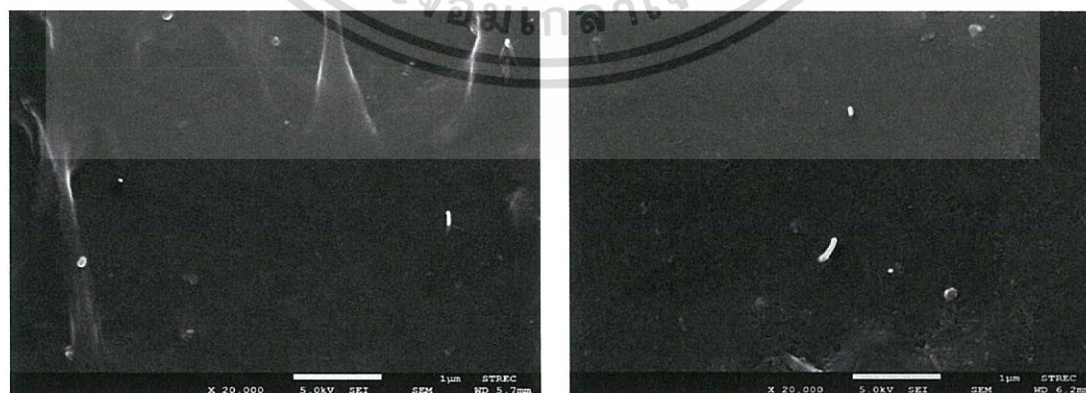
(b)

รูปที่ ก.2 ภาพ FESEM ของพื้นผิวที่แตกหักที่กำลังขยาย x10000 ของสูตร (a) 0.5EsCB และ (b) 3.0EsCB



(a)

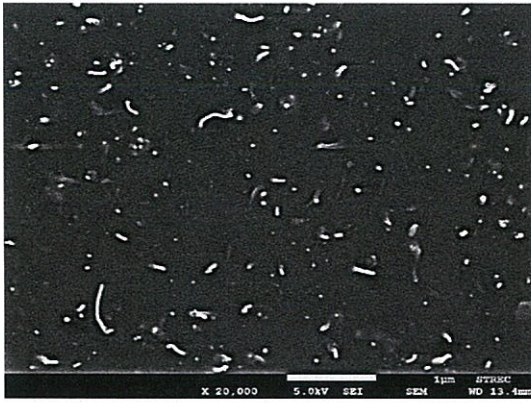
(b)



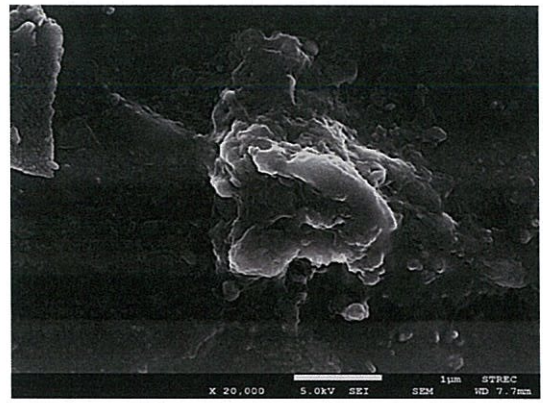
(c)

(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e)



(f)



(g)



(h)

รูปที่ ก.3 ภาพ FESEM ของพื้นผิวที่แตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ ของสูตร (a) 0.5EsMWCNT, (b) 0.5EsCB, (c) 0.5Es1:3, (d) 0.5Es1:7, (e) 3.0EsMWCNT, (f) 3.0EsCB, (g) 3.0Es1:3 และ (h) 3.0Es1:7



(a)

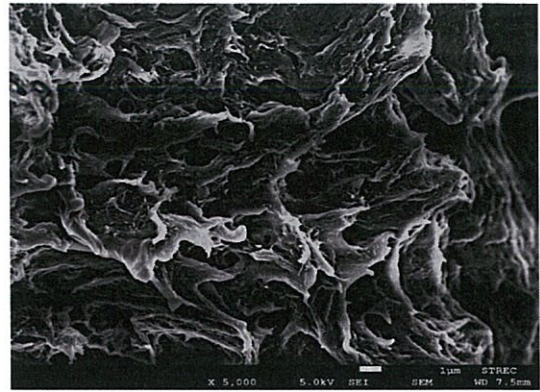


(b)

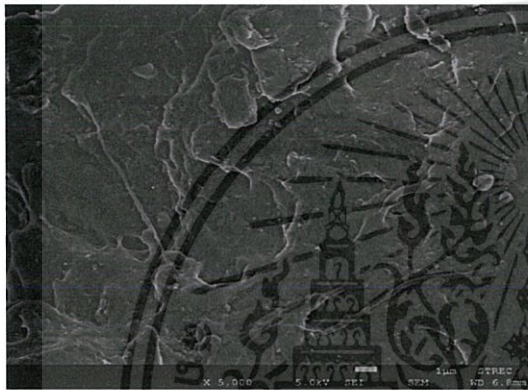
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



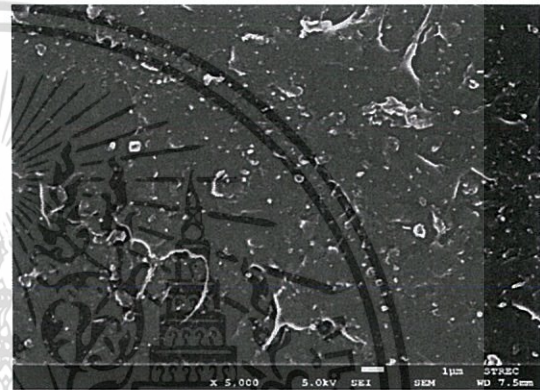
(c)



(d)

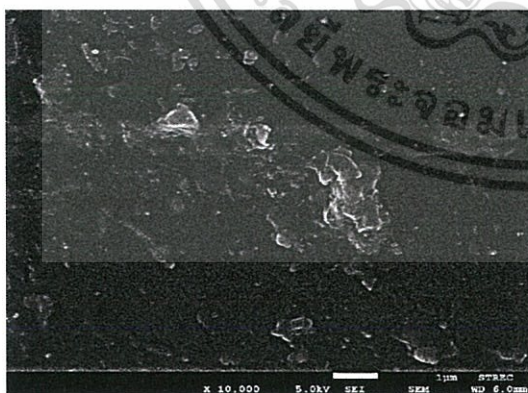


(e)

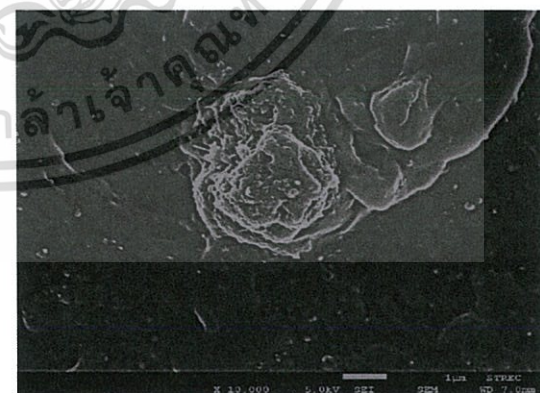


(f)

รูปที่ ก.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 5000x ของสูตร (a) 0.5EthMWCNT, (b) 0.5Eth1:3, (c) 0.5Eth1:7, (d) 3.0EthMWCNT, (e) 3.0Eth1:3 และ (f) 3.0Eth1:7



(a)



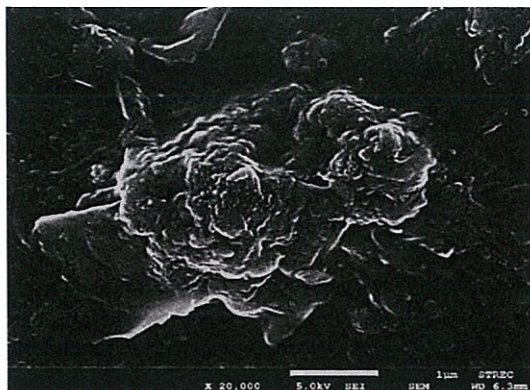
(b)

รูปที่ ก.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 10000x ของสูตร (a) 0.5EthCB และ (b) 3.0EthCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)



(d)

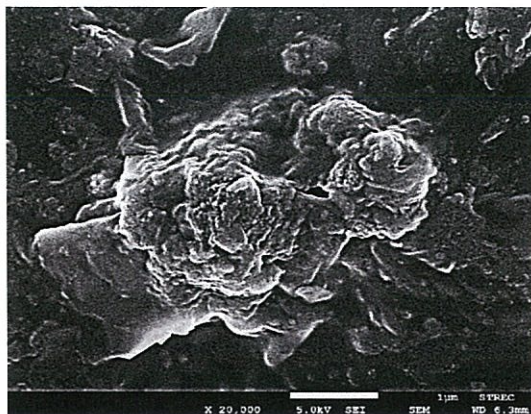


(e)



(f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g)

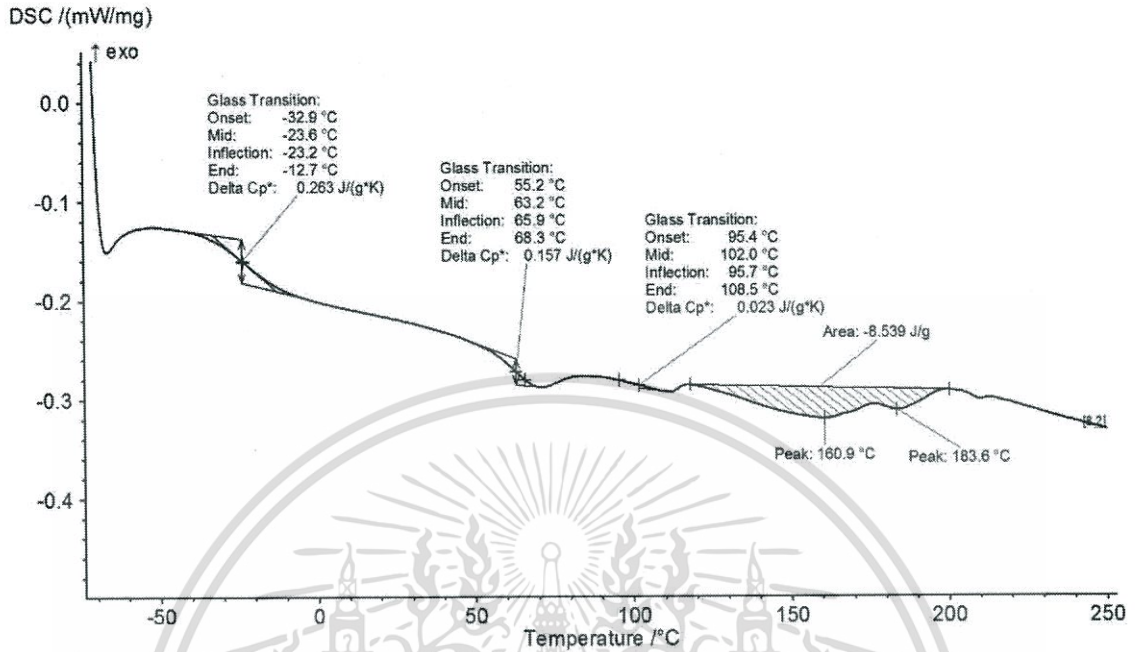
(h)

รูปที่ ก.6 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 20000x ของสูตร (a) 0.5EthMWCNT, (b) 0.5EthCB, (c) 0.5Eth1:3, (d) 0.5Eth1:7, (e) 3.0EthMWCNT, (f) 3.0EthCB (g) 3.0Eth1:3 และ (h) 3.0Eth1:7

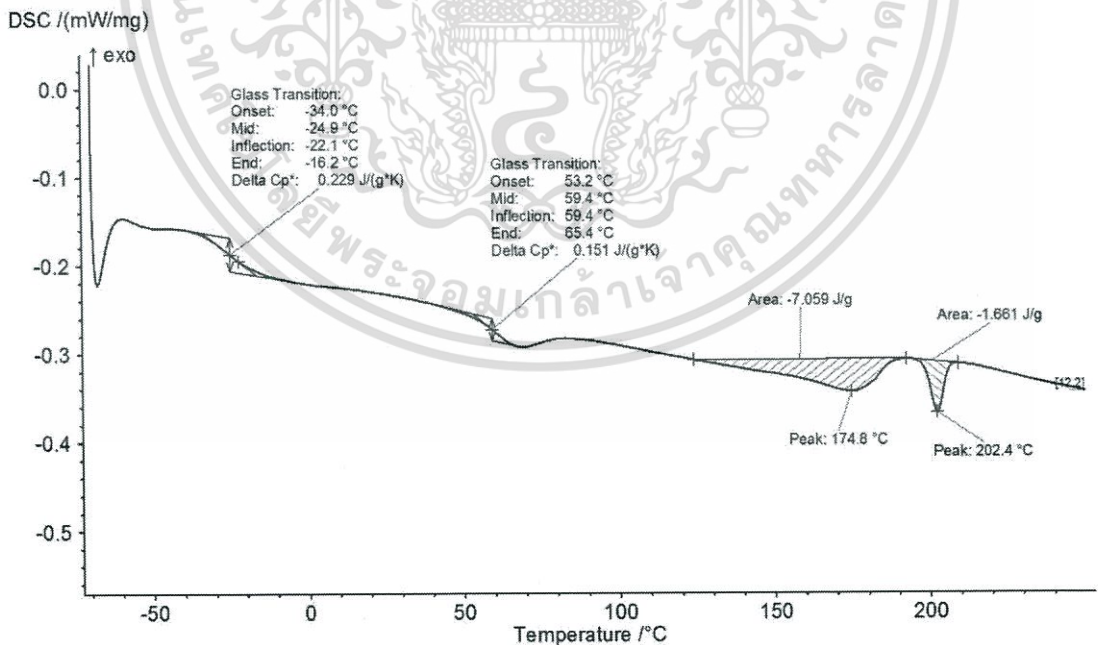


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

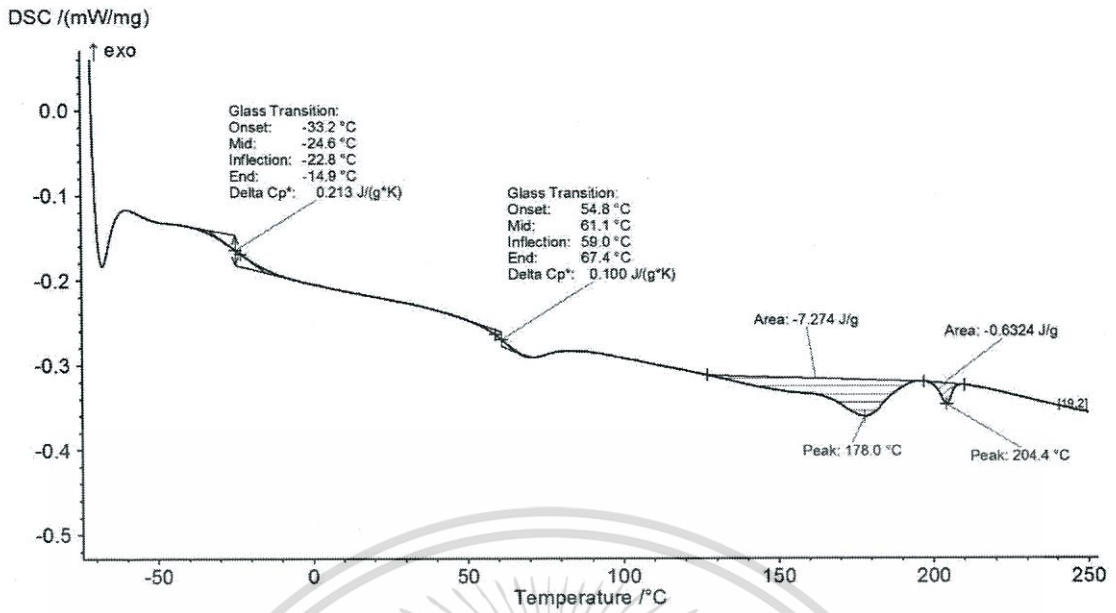


รูปที่ ข.1 กราฟ DSC ของ 0.5EsMWCNT

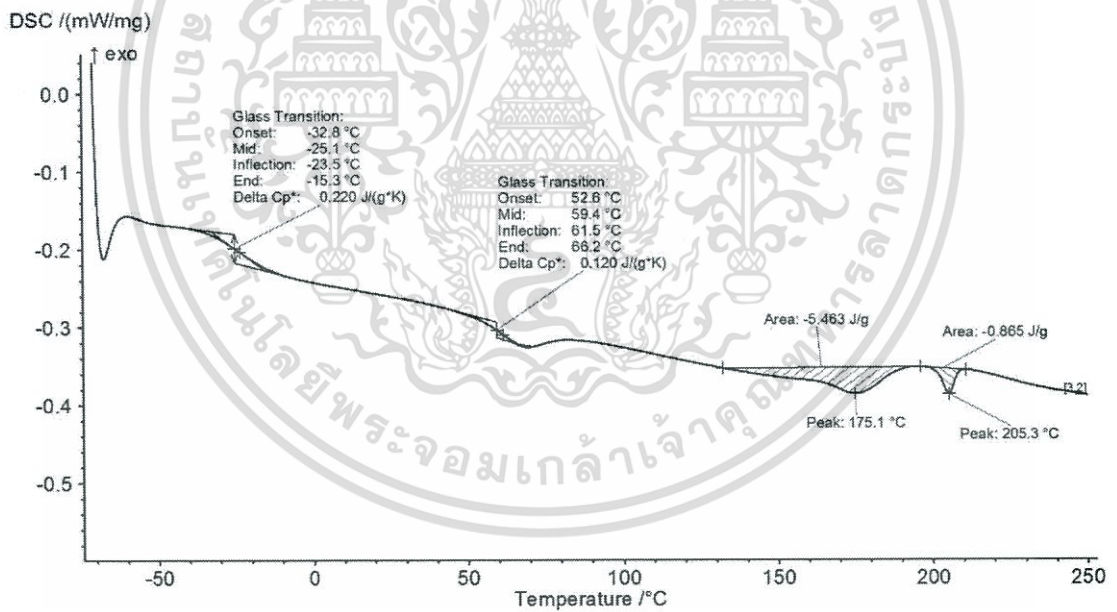


รูปที่ ข.2 กราฟ DSC ของ 1.5EsMWCNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

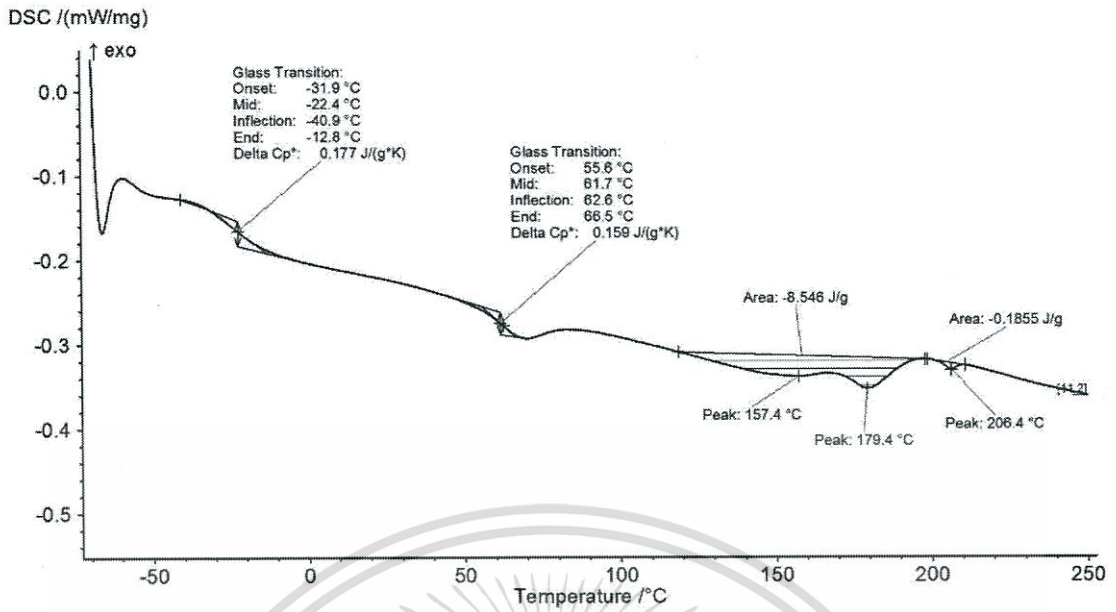


รูปที่ ข.3 กราฟ DSC ของ 3.0EsMWCNT

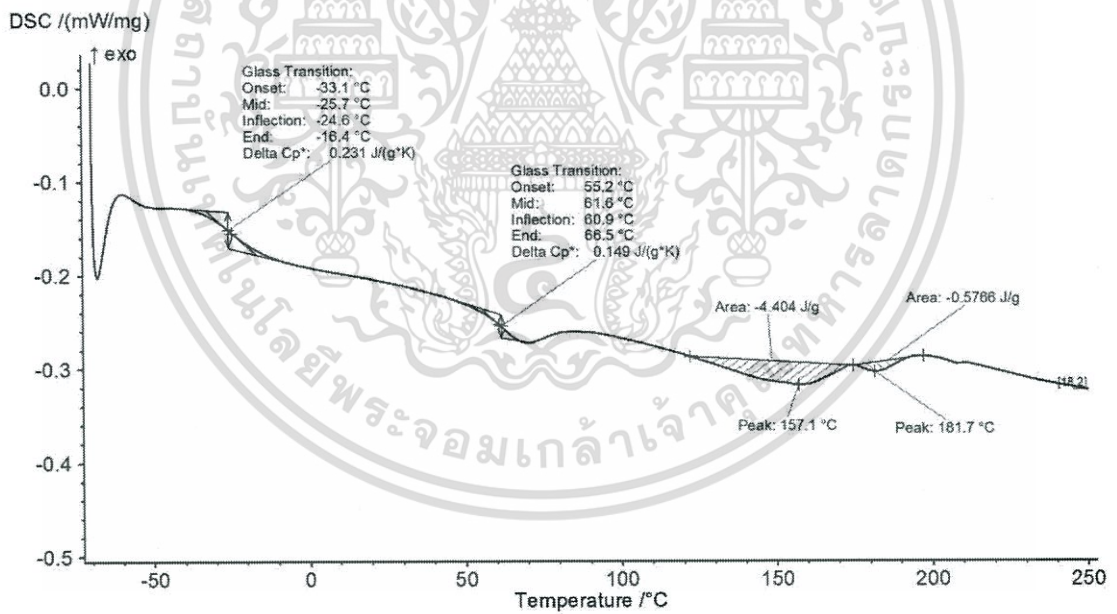


รูปที่ ข.4 กราฟ DSC ของ 0.5EsCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

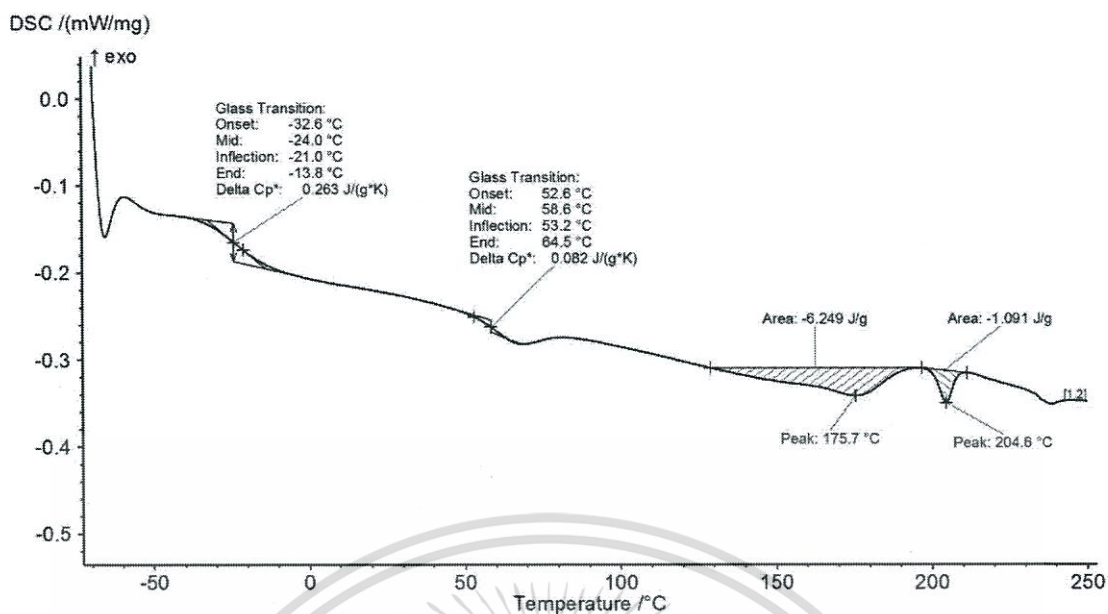


รูปที่ ข.5 กราฟ DSC ของ 1.5EsCB

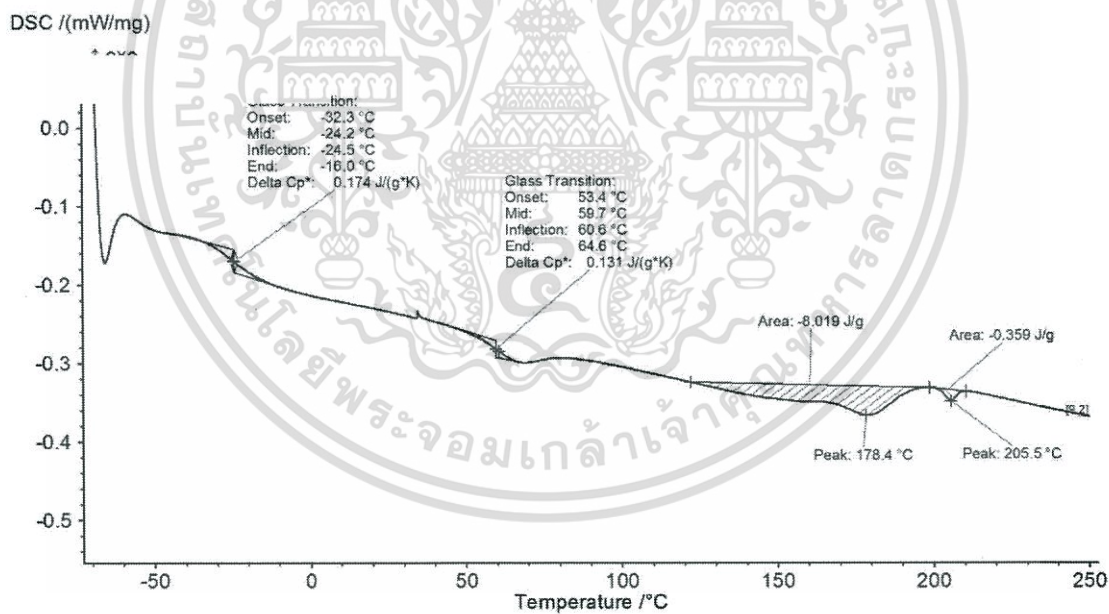


รูปที่ ข.6 กราฟ DSC ของ 3.0EsCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

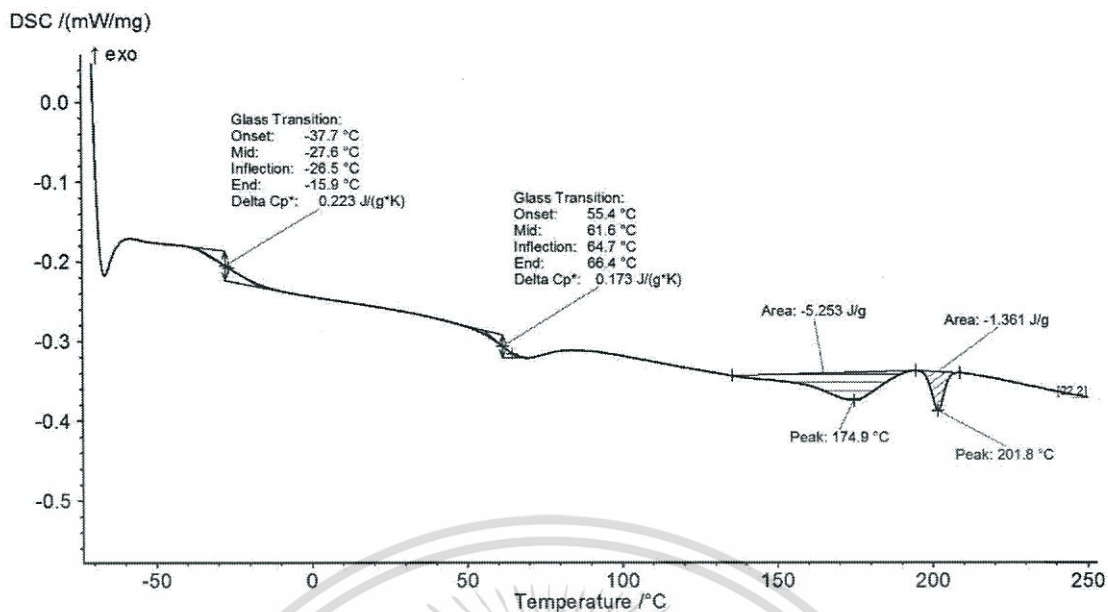


รูปที่ ข.7 กราฟ DSC ของ 0.5Es1:3

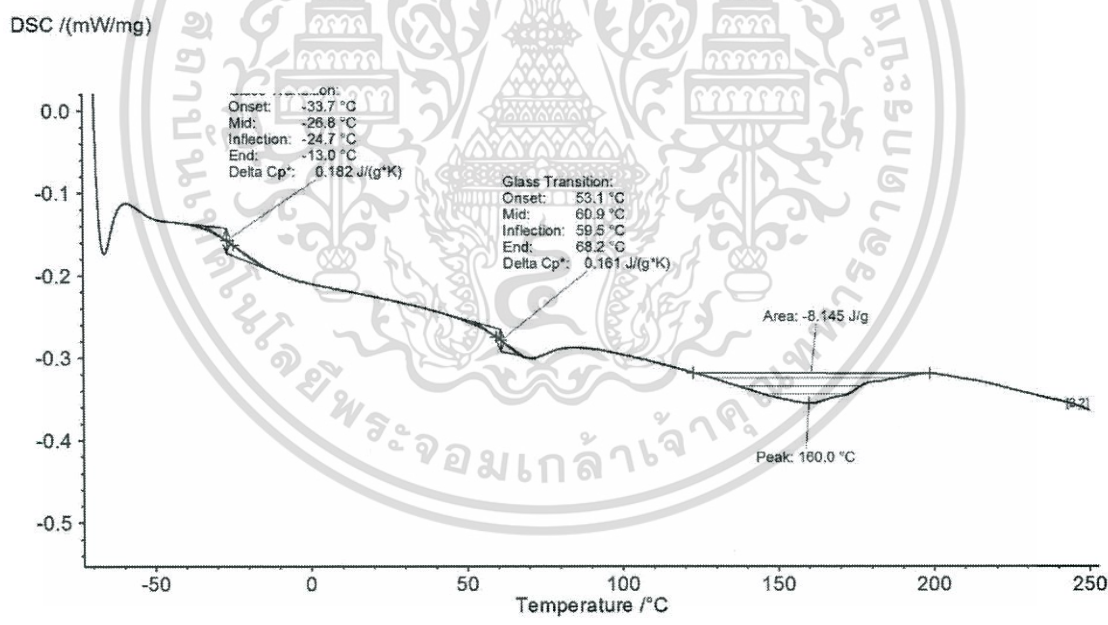


รูปที่ ข.8 กราฟ DSC ของ 1.5Es1:3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

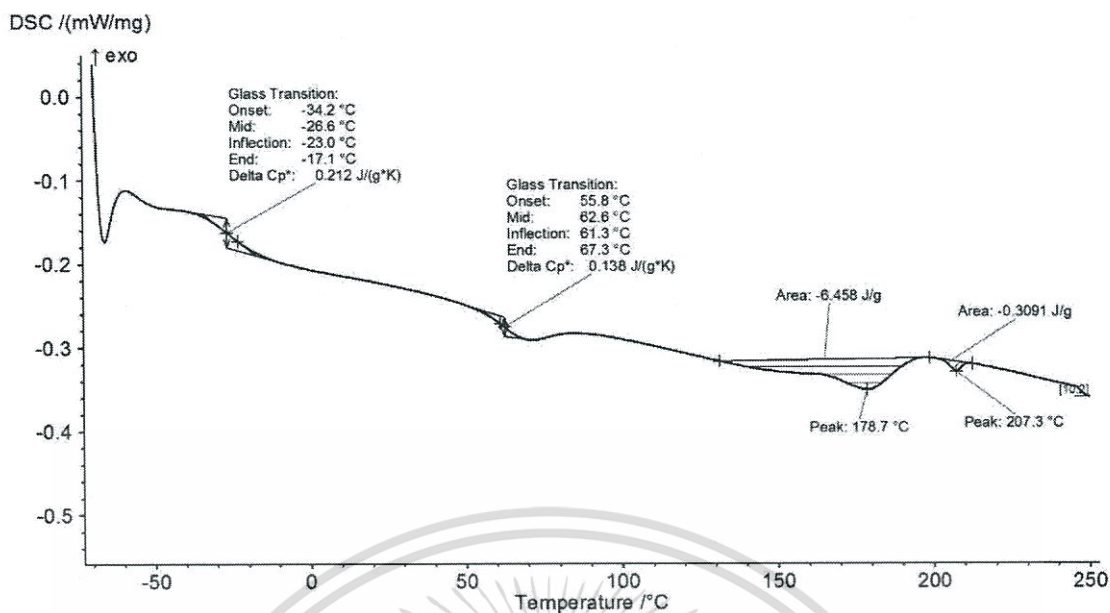


รูปที่ ข.9 กราฟ DSC ของ 3Es1:3

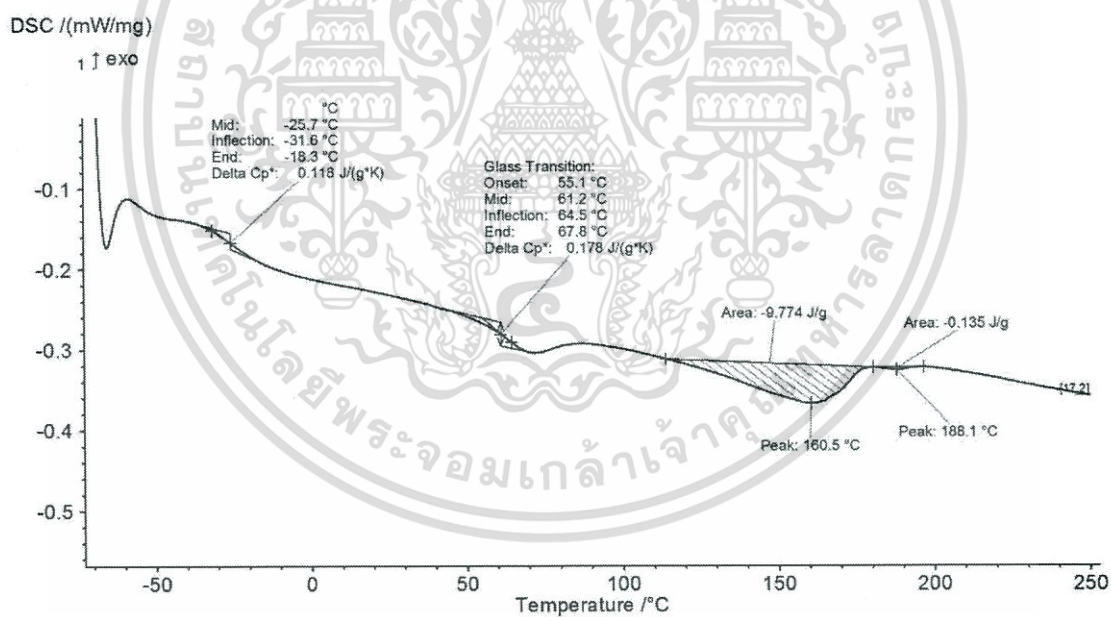


รูปที่ ข.10 กราฟ DSC ของ 0.5Es1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

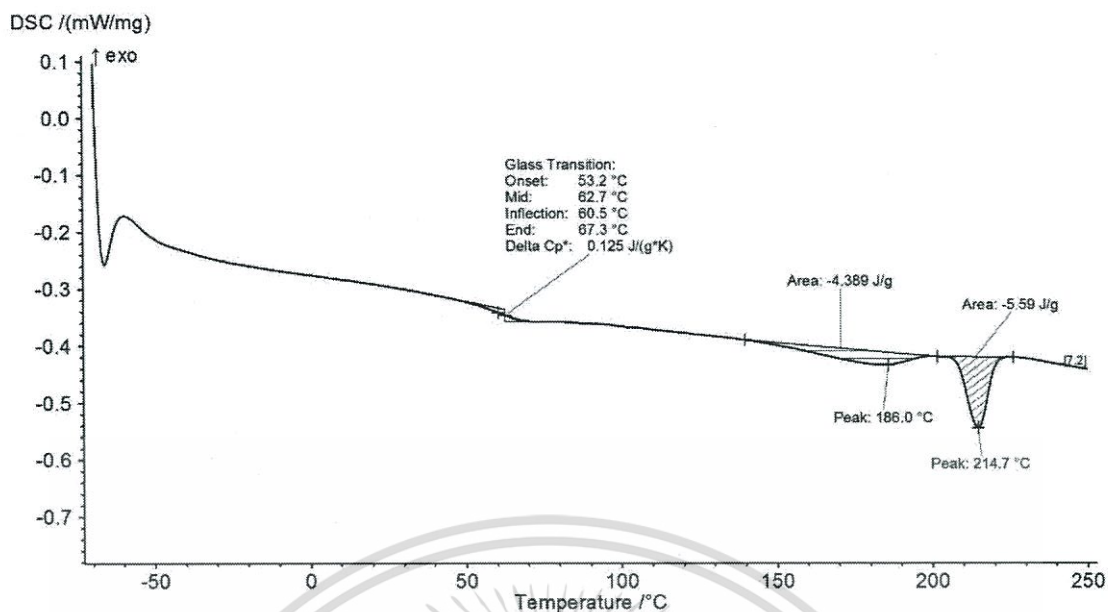


รูปที่ ข.11 กราฟ DSC ของ 1.5Es1:7

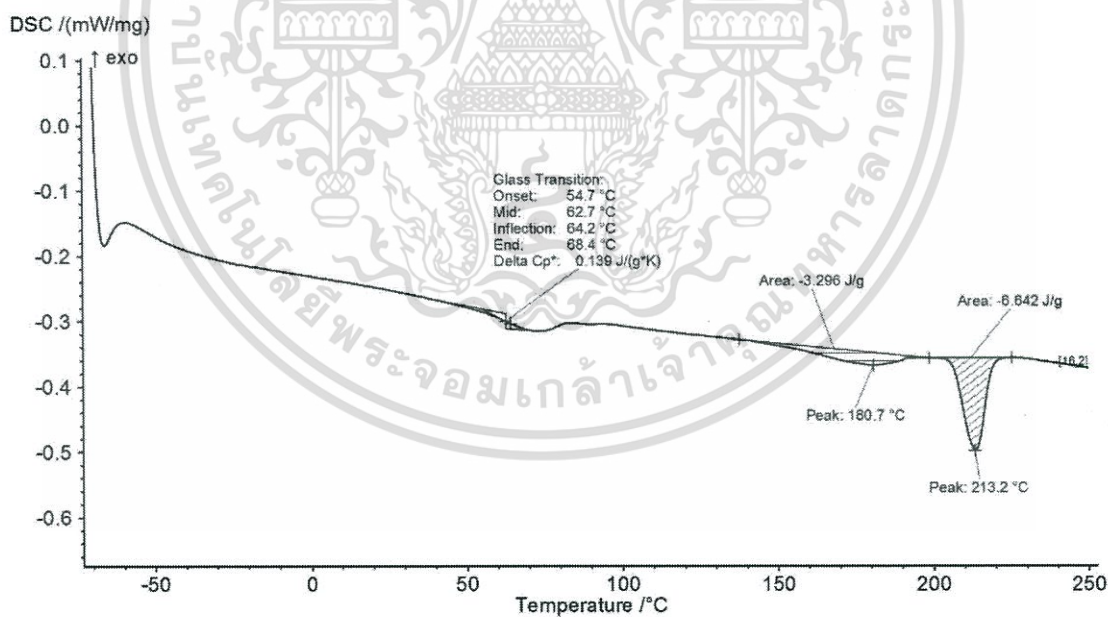


รูปที่ ข.12 กราฟ DSC ของ 3Es1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

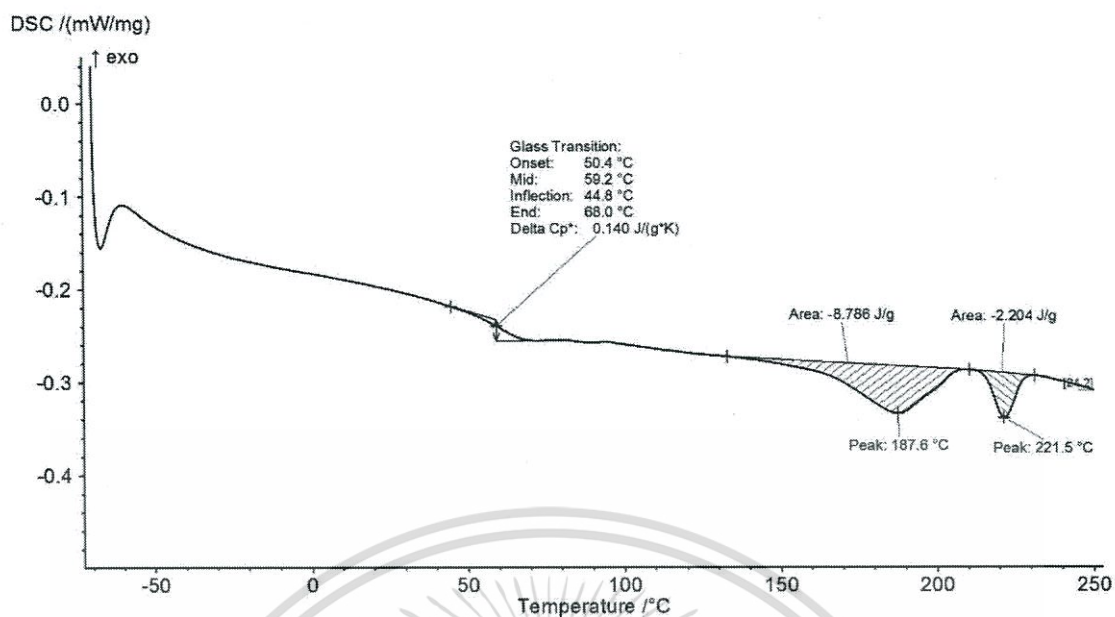


รูปที่ ข.13 กราฟ DSC ของ 0.5EthMWCNT

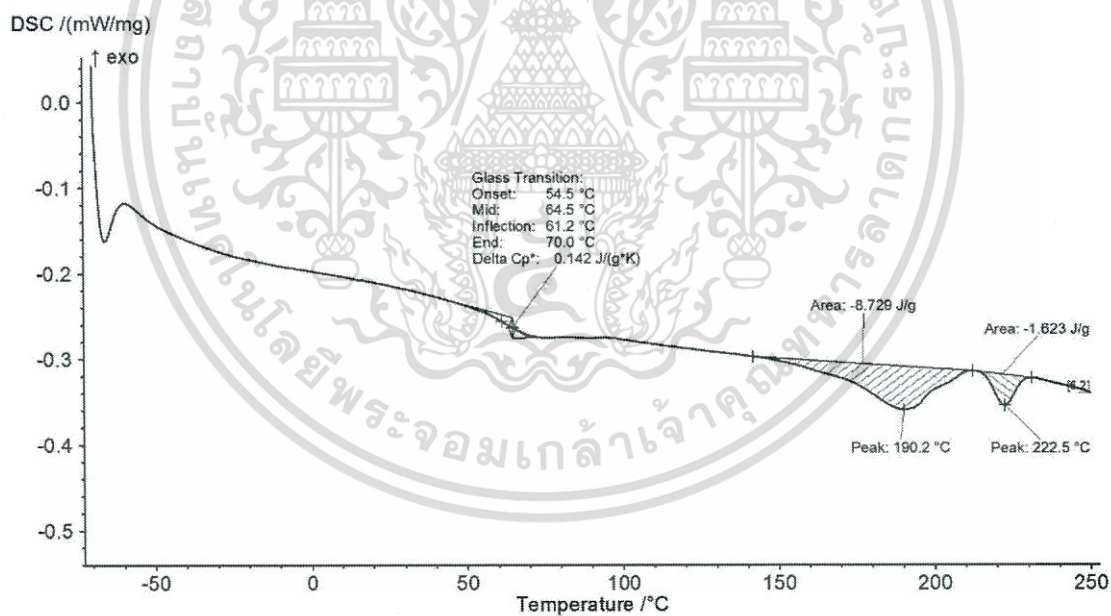


รูปที่ ข.14 กราฟ DSC ของ 1.5EthMWCNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

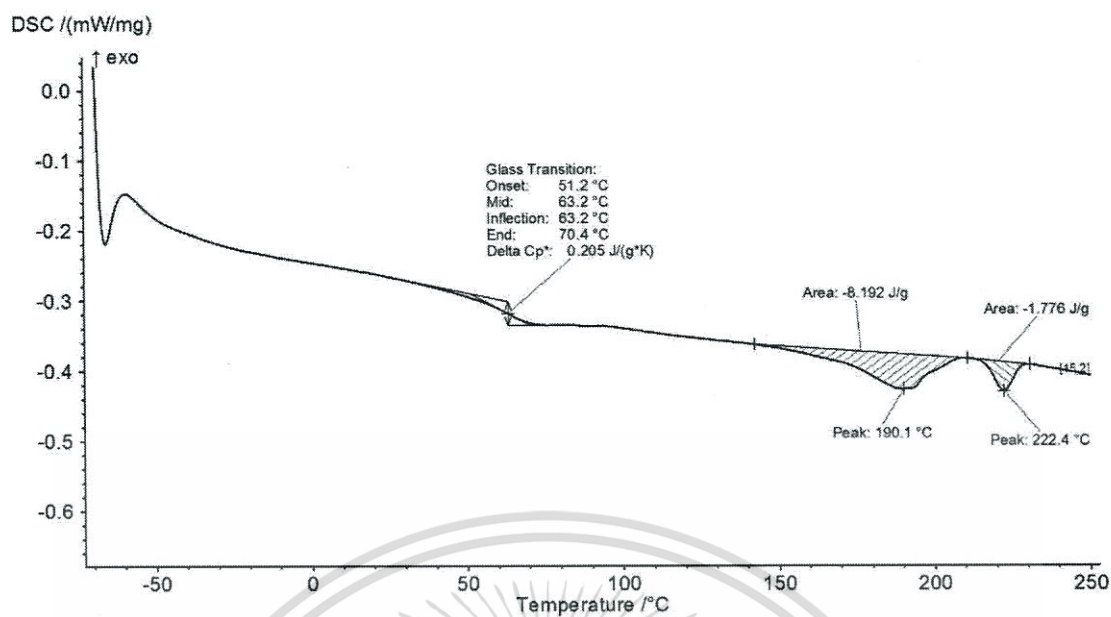


รูปที่ ข.15 กราฟ DSC ของ 3.0EthMWCNT

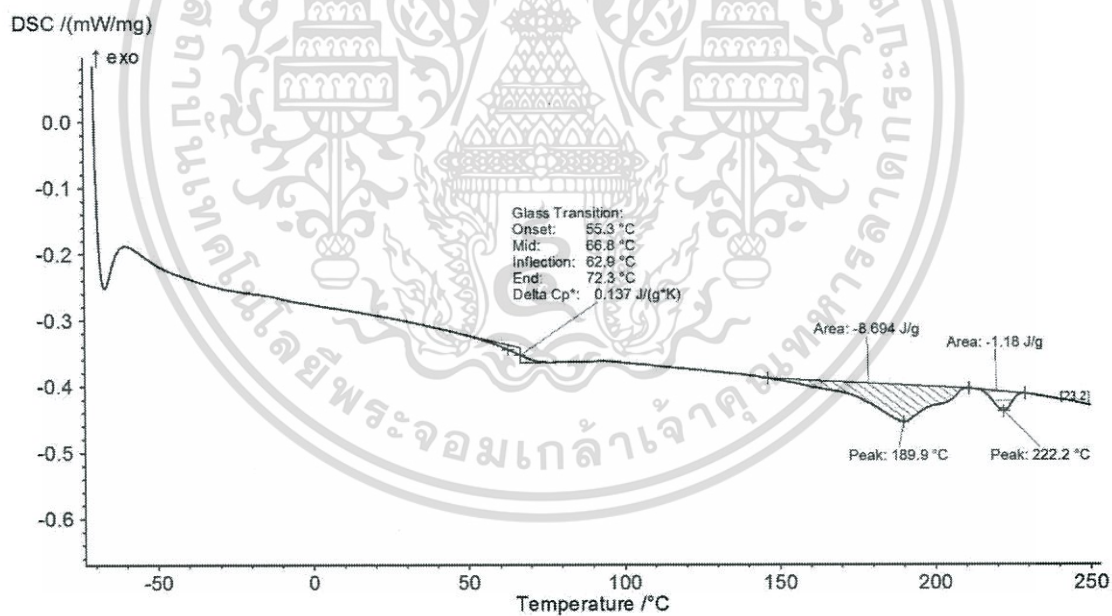


รูปที่ ข.16 กราฟ DSC ของ 0.5EthCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

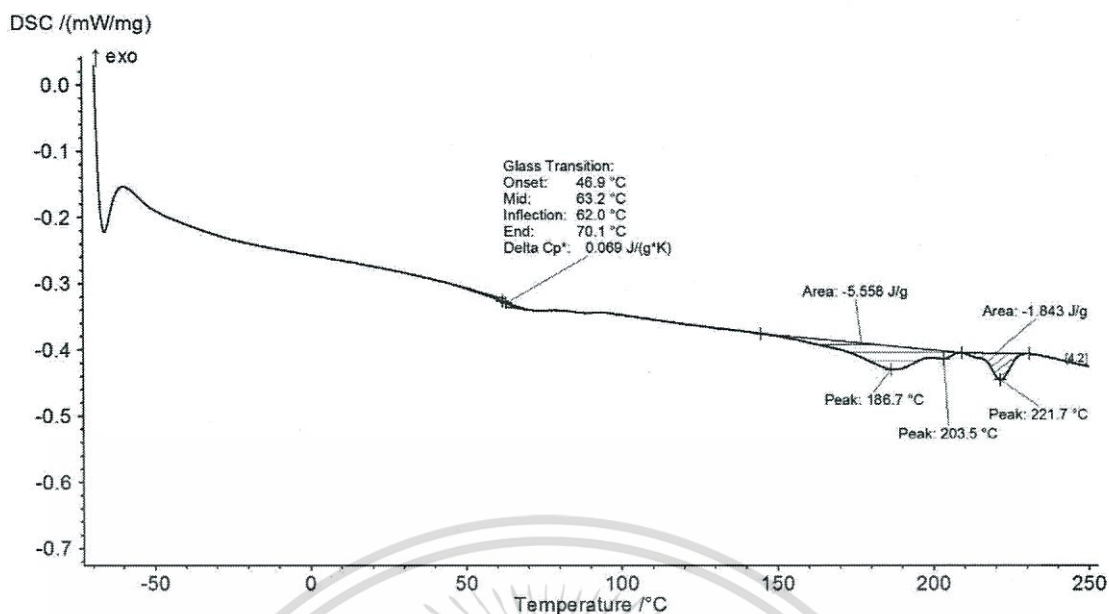


รูปที่ ข.17 กราฟ DSC ของ 1.5EthCB

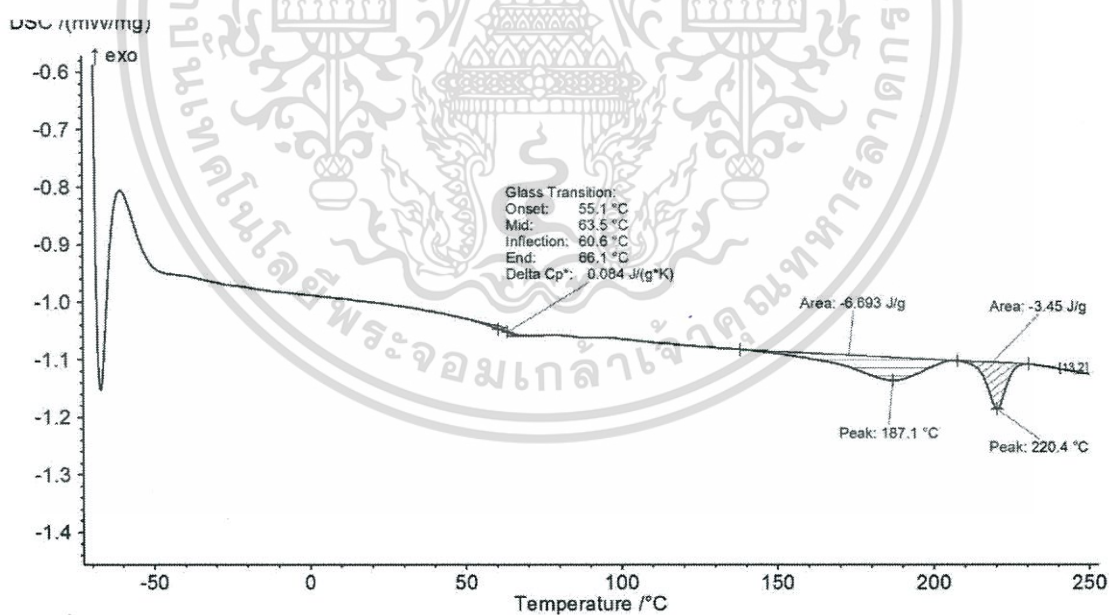


รูปที่ ข.18 กราฟ DSC ของ 3.0EthCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

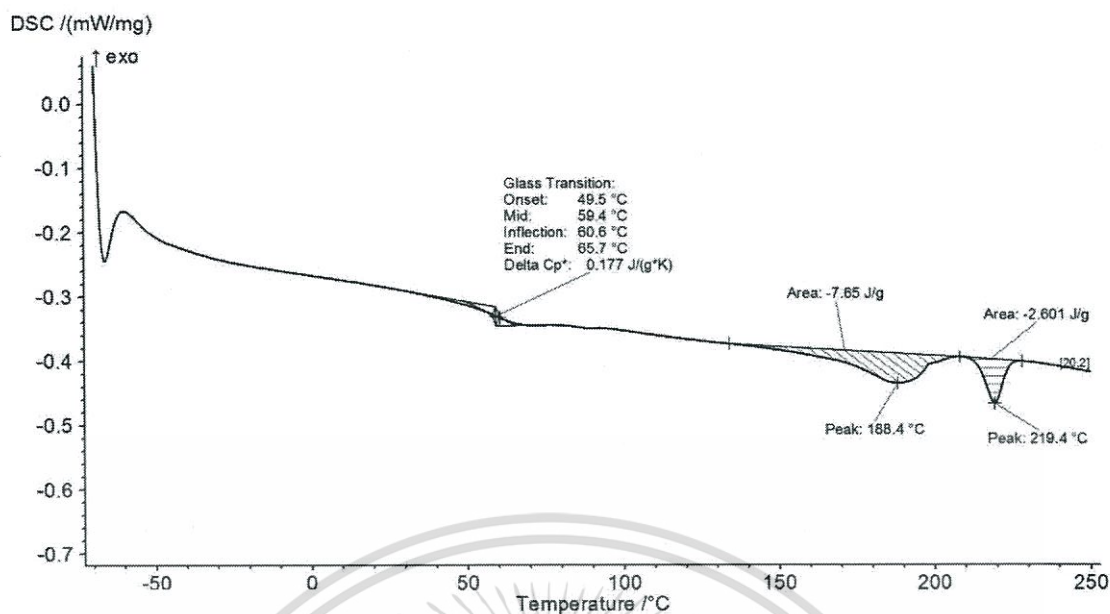


รูปที่ ข.19 กราฟ DSC ของ 0.5Eth1:3

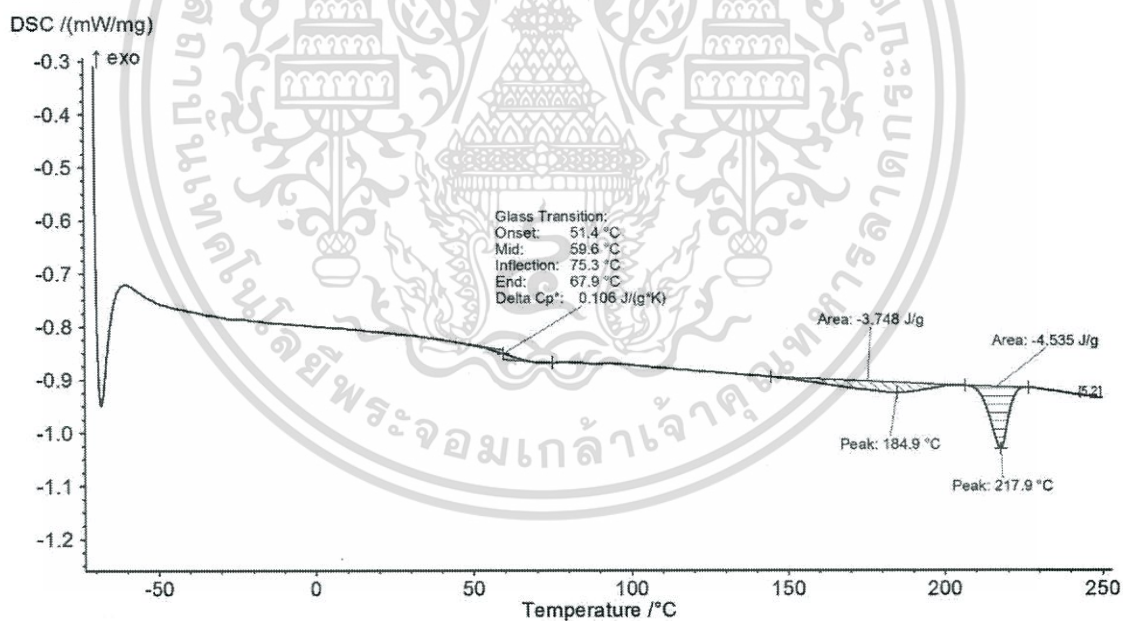


รูปที่ ข.20 กราฟ DSC ของ 1.5Eth1:3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

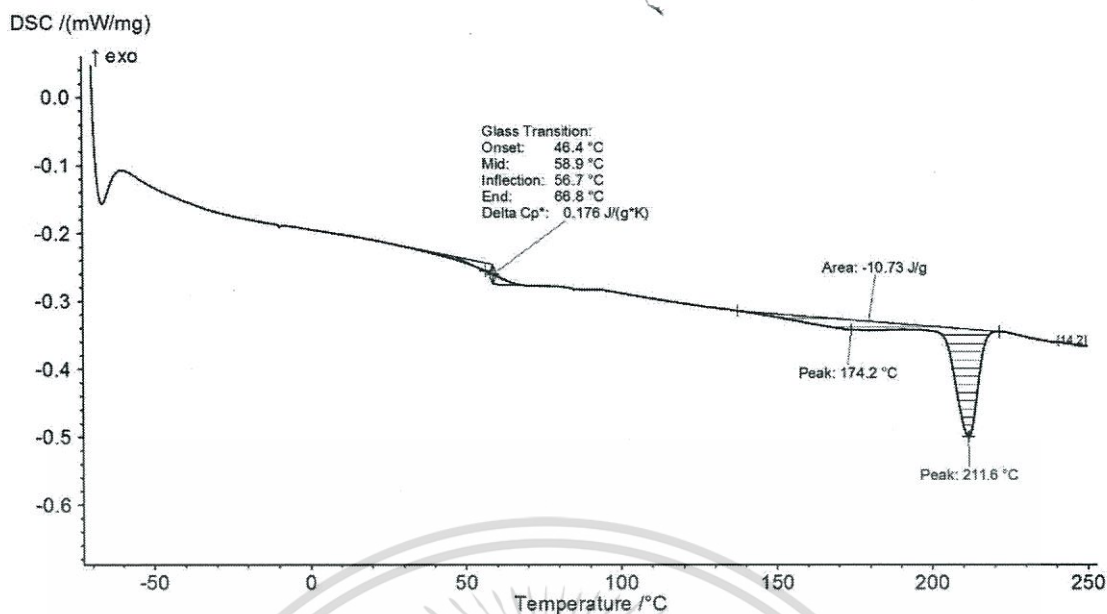


รูปที่ ข.21 กราฟ DSC ของ 3.0Eth1:3

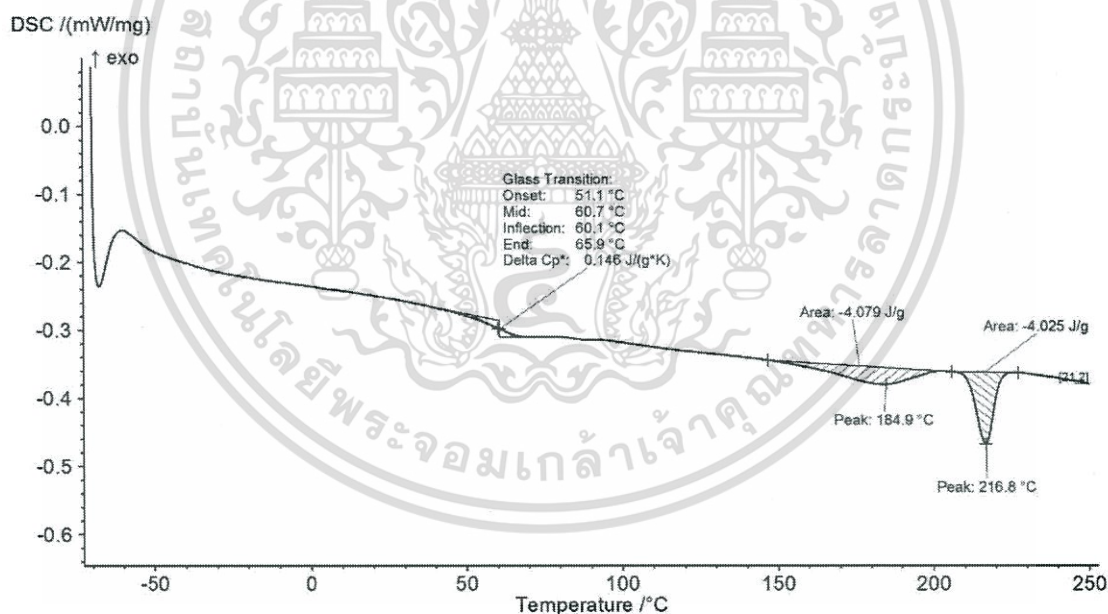


รูปที่ ข.22 กราฟ DSC ของ 0.5Eth1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.23 กราฟ DSC ของ 1.5Eth1:7



รูปที่ ข.24 กราฟ DSC ของ 3.0Eth1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 20 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า นางสาวนัฐกานต์ สุจิตพงศ์ รหัสประจำตัว 57050432
นางสาวเบญจมาภรณ์ รัตนพันธุ์ศรี รหัสประจำตัว 57050448
นางสาววรรณกานต์ อริยวณิชย์ รหัสประจำตัว 57050500

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครง งานพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การศึกษาการเติมสารตัวเติมผสมกลุ่มคาร์บอนในพอลิยูรีเทนนาโนคอมพอสิต

ชื่อภาษาอังกฤษ Study Of Carbon Fillers Combination/Polyurethanes Nanocomposites

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.19 %

ลงชื่อ.....นัฐกานต์ สุจิตพงศ์..... ลงชื่อ.....เบญจมาภรณ์ รัตนพันธุ์ศรี..... ลงชื่อ.....วรรณกานต์ อริยวณิชย์.....
(นางสาวนัฐกานต์ สุจิตพงศ์) (นางสาวเบญจมาภรณ์ รัตนพันธุ์ศรี) (นางสาววรรณกานต์ อริยวณิชย์)
นักศึกษา นักศึกษา นักศึกษา

ข้าพเจ้า ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุสย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....กิตติมนต์ จิระกิตติดุสย์.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้