การศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูริเทนนาโนคอมพอสิต

STUDY OF ANNEALING EFFECT ON PERCOLATION THRESHOLD IN POLYURETHANE NANOCOMPOSITES

ไกรสุวิทย์ จำปามูล
ณัฐกานต์ สุขบั่น
ณัฐทิวา ทองพันทา

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูริเทนนาโนคอมพอสิต

STUDY OF ANNEALING EFFECT ON PERCOLATION THRESHOLD IN POLYURETHANE NANOCOMPOSITES

T149486

ไกรสุวิทย์ จำปามูล
ณัฐกานต์ สุขปั่น
ณัฐทิวา ทองพันทา

b.12884480
i
เลขหมู่
เลขทะเบียน 149486
วัน เดือน ปี 8 มิ.ย. 2561

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF ANNEALING EFFECT ON PERCOLATION THRESHOLD IN POLYURETHANE NANOCOMPOSITES

KRAISUWIT CHUMPAMOOL
NATTHAKAN SUKHPAN
NUTTIWA THONGPUNTHA

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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูริเทนนาโนคอมพอสิต Study of Annealing Effect on Percolation Threshold in Polyurethane Nanocomposites		
ชื่อนักศึกษา	นายไกรสุวิทย์	จำปามูล	รหัสนักศึกษา 56050447
	นางสาวณัฐกานต์	สุขปั่น	รหัสนักศึกษา 56050483
	นางสาวณัฐทิวา	ทองพันทา	รหัสนักศึกษา 56050486
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.เอกรัฐ เดชศรี ประธานกรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูริเทนนาโนคอมพอสิต

ชื่อนักศึกษา นายไกรสุวิทย์ จำปามูล รหัสนักศึกษา 56050447
นางสาวณัฐกานต์ สุขปั่น รหัสนักศึกษา 56050483
นางสาวณัฐทิวา ทองพันทา รหัสนักศึกษา 56050486

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

คณะ วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างพอลิยูริเทน (PU) ที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มแตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) กับคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (MWCNT) โดยศึกษาผลกระทบของช่วงเวลาที่เหมาะสมในการอบอ่อนต่อโครงสร้างและสมบัติการนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยทำการอบอ่อน PU-ester และ PU-ether ที่อุณหภูมิ 100°C และ 80°C ตามลำดับ จากการอบอ่อนพบว่าเวลาในการอบอ่อนที่เหมาะสมของ PU ทั้ง 2 ชนิด คือ 10 ชั่วโมง หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้า (p_c) ของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยทำการทดสอบด้วย DSC, FT-Raman, Universal testing machine, FESEM และ LCR-meter เมื่อทำการวิเคราะห์นาโนคอมพอสิตด้วย Percolation theory พบว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต มีค่า p_c=0.45 และ t exponent = 2.65 ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตมีค่า p_c= 0.30 และ t exponent = 3.71 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับนาโนคอมพอสิตที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อนพบว่าใน PU-ester นาโนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแต่ p_c และ t exponent มีค่าใกล้เคียงเดิม จึงสรุปได้ว่าการอบอ่อนสำหรับ PU-ester ไม่ได้ส่งผลต่อจุดนำไฟฟ้าและโครงข่ายนำไฟฟ้า แต่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า สำหรับ PU-ether นาโนคอมพอสิต มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า p_c และ t exponent มีค่าต่ำลงจึงสรุปได้ว่าการอบอ่อนสำหรับ PU-ether ส่งผลต่อจุดนำไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้า

คำสำคัญ: การอบอ่อน คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น จุดนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้า นาโนคอมพอสิต พอลิยูริเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of Annealing Effect on Percolation Threshold in Polyurethane Nanocomposites		
Students	Mr.Kraisuwit	Chumpamool	Student ID 56050447
	Miss Natthakan	Sukhpan	Student ID 56050483
	Miss Nuttiwa	Thongpuntha	Student ID 56050486
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2016		
Advisor	Dr. Kittimon Jirakittidul		

Abstract

In this research, nanocomposites between polyurethane (PU) with two different soft segments (polyester (PU-ester) and polyether (PU-ether)) with multiwall carbon nanotube (MWCNT) were prepared. The appropriate annealing time affecting structure and conductivity of PU/MWCNT nanocomposites was studied. PU-ester and PU-ether nanocomposites were annealed at 100°C and 80°C, respectively. The appropriate time was found at 10 hours for both PU nanocomposites. After that, the effects of annealing on percolation threshold (p_c) in polyurethane nanocomposites were determined. Their properties were tested by DSC, FT-Raman, Universal Testing Machine, FESEM and LCR meter. In order to study the electrical conductivity of nanocomposites the percolation theory was applied PU-ester nanocomposites found p_c = 0.45 and t exponent = 2.65 PU-ether nanocomposites found p_c=0.30 and t exponent = 3.71. Comparing to no annealing PU-ester nanocomposite, it was found an increase in conductivity and comparable p_c and t exponent after annealing nanocomposites. Therefore, annealing for PU-ester did not affect to p_c and conductive network but affected conductivity. In contrast, annealing PU-ether nanocomposites found conductivity increased, p_c and t exponent decreased. It was concluded that annealing PU-ether affected p_c, conductive network and conductivity.

Keywords: Annealing, Multiwall Carbon Nanotube, Percolation Threshold, Conductivity, Polyurethane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ซึ่งให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงงานพิเศษนี้ อีกทั้งยังให้กำลังใจและการดูแลอย่างดีจนทำให้โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เอกรัฐ เดชศรี และดร.ชวาลย์ศรีวงษ์ ที่เข้าร่วมเป็นคณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพื่อนำไปแก้ไขโครงงานพิเศษให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีและเจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทดลอง

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ Field Emission Scanning Microscope (FESEM), Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Fourier Transform Raman Spectrometer (FT-Raman)

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาของข้าพเจ้าทั้งสามคนที่ได้ให้การสนับสนุนโอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจจนทำให้โครงงานพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษและคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณกลุ่มของข้าพเจ้าเองที่ให้การร่วมมือและตั้งใจช่วยกันทำให้โครงงานพิเศษเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าทั้งสามคนขออภัยเป็นอย่างสูงและข้าพเจ้าหวังว่าโครงงานพิเศษเล่มนี้คงมีประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยสำหรับผู้ที่สนใจ

ไกรสุวิทย์ จำปามูล
ณัฐกานต์ สุขปั่น
ณัฐทิวา ทองพันทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญตาราง..... ช
สารบัญรูป..... ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6
2.1 วัสดุนาโนคอมพอสิต..... 6
2.1.1 ความหมายของวัสดุนาโนคอมพอสิต..... 6
2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต..... 7
2.1.3 การเตรียมนาโนคอมพอสิต..... 8
2.2 พอลิยูริเทน..... 9
2.2.1 โครงสร้างของพอลิยูริเทน..... 9
2.2.2 ปฏิกิริยาพื้นฐาน..... 14
2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์..... 15
2.3.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์..... 16
2.3.2 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์..... 17
2.3.3 การใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในปัจจุบัน..... 17
2.4 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า..... 18
2.4.1 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต..... 18
2.4.2 กลไกการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมพอสิต..... 19
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมพอสิต..... 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง..... 21
2.5.1 ผลกระทบของการเตรียมคอมพอสิตต่อจุดนำไฟฟ้า..... 21
2.5.2 ผลกระทบของการอบอ่อนต่อชนิดของสารตัวเติมกลุ่มคาร์บอน..... 22
2.5.3 ผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกล..... 23
2.5.4 ผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนต่อสมบัตินำไฟฟ้า..... 24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 26
3.1 แผนการดำเนินงาน..... 26
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์..... 26
3.3 วิธีการทดลอง..... 27
3.3.1 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต..... 27
3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต..... 28
3.3.3 กระบวนการอบอ่อน..... 28
3.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิต..... 29
3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC..... 29
3.4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-Raman..... 30
3.4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง UTM..... 30
3.4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FESEM..... 31
3.4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter..... 32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล..... 34
4.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อน..... 34
4.1.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC..... 34
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค FT-Raman.. 38
4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง UTM..... 41
4.1.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FESEM..... 46
4.1.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter..... 48
4.2 ผลการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 52
4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC..... 52
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง UTM..... 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FESEM.....62
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter.....64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 70
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 70
5.2 ข้อเสนอแนะ 71
เอกสารอ้างอิง..... 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตางรางที่ **หน้า**

2.1 ลักษณะโครงสร้างของ Isocyanateแต่ละชนิด..... 12

3.1 สภาวะที่ใช้ในการอบอ่อน..... 29

4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-Ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 35

4.2 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-Ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต.....36

4.3 ค่า D-band และ G-band ของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านและ ไม่ผ่านการอบอ่อน..... 40

4.4 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่เวลาการอบอ่อน แตกต่างกัน.....41

4.5 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่เวลาการอบอ่อน แตกต่างกัน.....41

4.6 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-Ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT แตกต่างกัน.....53

4.7 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ETHER/MWCNTนาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณ MWCNT แตกต่างกัน.....53

4.8 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughnessของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน และผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง..... 57

4.9 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน และผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง..... 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมพอสิต.....1
1.2 การเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า.....2
1.3 สมการการเกิดพอลิยูริเทน.....3
1.4 โครงสร้างโมเลกุลของ Polyether polyolและ Polyester polyol.....3
1.5 โครงสร้างของ CNT.....3
2.1 องค์ประกอบของเนื้อหลักและเฟสที่กระจายของวัสดุคอมพอสิต.....6
2.2 แบบร่างของตัวเติมขนาดนาโน.....7
2.3 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูริเทน.....9
2.4 โครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งของพอลิยูริเทน.....10
2.5 ปฏิกิริยาการเกิด Polyether polyol.....10
2.6 ปฏิกิริยาการเกิด Polyester polyol.....11
2.7 ปฏิกิริยาการเกิด Urethane.....15
2.8 โครงสร้างการจัดเรียงอะตอมแบบต่างๆของธาตุคาร์บอน.....15
2.9 การม้วนของแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน.....16
2.10 ความแตกต่างระหว่าง SWCNT และ MWCNT.....16
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Critical exponent (t) กับ Percolation threshold (p_c) ของ Carbon-based ผสมกับ organics, Metal-oxide TFRs และ Granular metals..19
2.12 Percolation S-Curve.....20
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Electrical conductivity (σ) กับสัดส่วนโดยปริมาณ (φ) ของ MWCNT จากงานวิจัยของ Lisunovaและคณะ.....21
2.14 ผลของสารตัวเติมกลุ่มคาร์บอนและการอบอ่อนต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิพอพิลีนคอมพอสิตจากงานวิจัยของ Cristhianและ Humberto 22
2.15 ภาพ SEM ของ (a) Graphite (G), (b) Graphene oxide (GO) และ (c) Thermally reducedgrapheneoxide (TrGO) จากงานวิจัยของ Cristhianและ Humberto..... 23
2.16 WAXD patterns ของ (a) เส้นใยนาโน PCL, (b) เส้นใยนาโน PCL ที่เคลือบด้วยยางซิลิโคน, และ (c) เส้นใยนาโน PCL เคลือบด้วยยางซิลิโคนที่ผ่านการอบอ่อนจากงานวิจัยของ Ko และคณะ.....24
2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต จากงานวิจัยของดาราวรรณ ลิ่มถิ่น และคณะ.....24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต จากงานวิจัยของดาราวรรณ ลิ่มถิ่น และคณะ..... 25

3.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)..... 27

3.2 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด..... 28

3.3 มาตรฐานชิ้นงานทดสอบ ASTM D638 Type IV..... 31

3.4 เครื่อง LCR meter..... 32

3.5 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบทางไฟฟ้า..... 33

4.1 กราฟ DSC (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต และ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 35

4.2 กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) T_{MMTB}และ (b) $\Delta H_{(MMT)}$..... 37

4.3 กราฟ DSC แสดงค่า $T_{g(HS)}$ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 37

4.4 FT-Raman spectra ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการ Normalized..... 39

4.5 FT-Raman spectra ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการ Normalized..... 40

4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 42

4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 43

4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับเวลาในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 44

4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Toughness กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.10 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt (a) Es-No anneal (b) Es-10 และ (c) Es-12.....46

4.11 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt (a) Et-No anneal (b) Et-10 และ (c) Et-16.....47

4.12 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x20000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง (a) 0.5-Esและ (b) 0.5-Et..... 48

4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เวลาในการอบอ่อนต่างกัน..... 49

4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เวลาในการอบอ่อนต่างกัน..... 49

4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ester/ MWCNT นาโนคอมพอสิต.....50

4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ether/ MWCNT นาโนคอมพอสิต.....51

4.17 กราฟ DSC(a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต และ (b) PU-ether/MWCNT..... 52

4.18 กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) T_{MMTA} (b) T_{MMTB}และ (c) $\Delta H_{(MMT)}$..... 55

4.19 กราฟ DSC ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) $T_{g(MP)}$ และ (b) T_{MMT2}..... 56

4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 58

4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 59

4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 60

4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Toughness กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.24 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) 0.3-Es (b) 0.5-Es และ (c) 5.0-Es..... 62
4.25 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) 0.3-Et (b) 0.5-Et และ (c) 5.0-Et..... 63
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 64
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 65
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 66
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 66
4.30 การวิเคราะห์หาจุดนำไฟฟ้าด้วย Percolation theory ใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 67
4.31 การวิเคราะห์หาจุดนำไฟฟ้าด้วย Percolation theory ใน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต..... 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
CMCs	Ceramic Matrix Composites
CNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์
DSC	Differential Scanning Calorimeter
ECPCs	Electrically conductive polymer composites
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope
FT-Raman	Fourier Transform Raman Spectrometer
$\Delta H_{(MMT)}$	พลังงานที่ใช้ในการเกิด microphase mixing
MMCs	Metal Matrix Composites
MWCNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น
p	ความเข้มข้นของสารตัวเติม
p_c	ความเข้มข้นของจุดที่เกิดการนำไฟฟ้า (Percolation threshold)
PMCs	Polymer Matrix Composites
PU	พอลิยูริเทน
PU-ester	Polyurethane ที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มเป็น Polyester
PU-ether	Polyurethane ที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มเป็น Polyether
PU/MWCNT	Polyurethane Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposite
SWCNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว
t	เลขชี้กำลังวิกฤต (Critical exponent)
$T_{g(MP)}$	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็งที่ผสมกัน
$T_{g(HS)}$	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนแข็ง
$T_{g(SS)}$	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่ม
T_{MMT}	อุณหภูมิการเกิด microphase mixing
UTM	Universal Testing Machine
σ_0	ค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติม
σ_c	ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต
φ	Volume fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

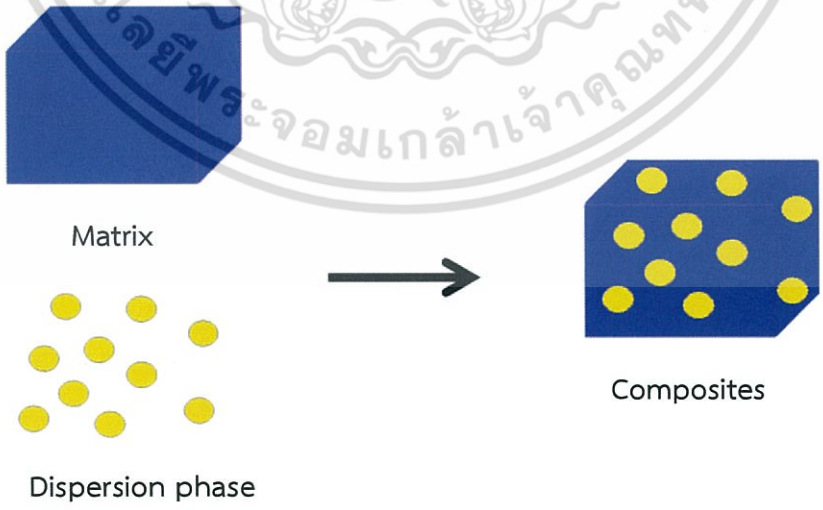
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบอย่างน้อย 2 ชนิดมาผสมรวมกัน โดยที่วัสดุทั้งสองชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน เมื่อผสมรวมกันแล้วจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น วัสดุคอมโพสิตมีการพัฒนามากขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้งานที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่นเส้นใยเสริมแรงคอมพอสิตจะถูกนำมาใช้แทนวัสดุจำพวกโลหะและโลหะผสม เนื่องจากมีความแข็งแรงมากกว่าและน้ำหนักเบากว่า หรือการทำพอลิเมอร์คอมพอสิตเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้นวัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก [1] ดังแสดงในรูปที่ 1.1

1. วัฏภาคที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) คือ ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ (Metrix) ทำหน้าที่ช่วยห่อหุ้มและยึดสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกันโดยมากแล้วเมทริกซ์มักเป็นวัสดุที่มีความเหนียวสูง แต่มีความแข็งแรงและมีค่ามอดุลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง

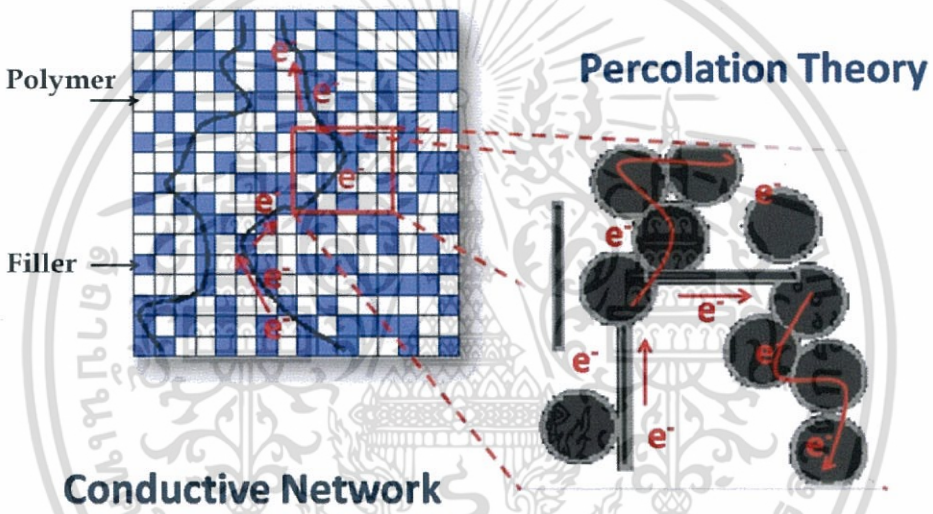
2. วัฏภาคที่ไม่ต่อเนื่อง (Non-continuous phase) คือ สารเสริมแรง (Reinforcement) เป็นส่วนที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ทำหน้าที่ให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือบางครั้งอาจเรียกว่า สารตัวเติม (Filler) ใส่เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติการนำไฟฟ้าหรือใส่เพื่อลดต้นทุนในการผลิต



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

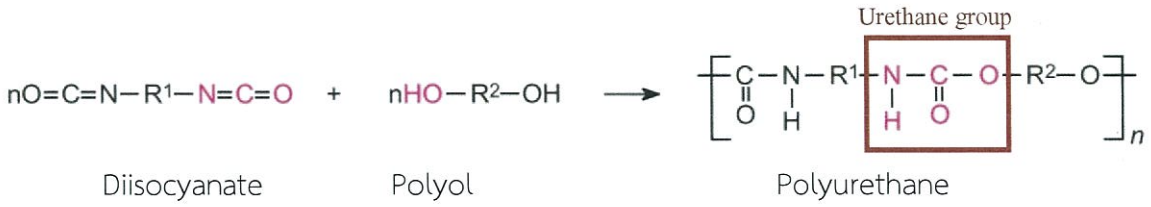
โดยทั่วไปแล้ววัสดุพอลิเมอร์มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นการทำให้พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้จะทำโดยการเติมสารตัวเติมที่มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้า (Electrically conductive fillers) ลงไปผสมกับพอลิเมอร์ ตัวอย่างสารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้า ได้แก่ ผงเขม่าดำ แกรไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ เส้นใยคาร์บอนและผงโลหะเป็นต้นเมื่อสารตัวเติมเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดการเรียงตัวเป็นโครงตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า (Conductive network) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ตลอดทั่วทั้งเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยปริมาณของสารตัวเติมที่ผสมลงไปในเมทริกซ์ต้องมีปริมาณเกินกว่าสัดส่วนวิกฤติ (Critical volume fraction) ที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (The percolation threoshold) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุคอมพอลิตเปลี่ยนจากความเป็นฉนวนไฟฟ้าเป็นวัสดุนำไฟฟ้า [2]



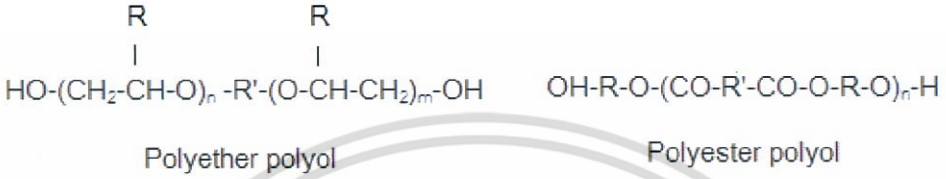
รูปที่ 1.2 การเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า [2]

ในงานวิจัยนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้คือ พอลิยูริเทน (Polyurethane, PU) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลดี ความแข็งแรงสูง จัดเป็นพลาสติกวิศวกรรม (Engineering plastic) ซึ่งมีทั้งชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิยูริเทนเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชั่นแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ของไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) และไดออลหรือพอลิออล (Diol orPolyol) สมการการเกิดพอลิยูริเทนแสดงในรูปที่ 1.3 โดยสามารถเลือกใช้หมู่ไฮโดรคาร์บอนของไดไอโซไซยาเนตและของพอลิออลได้หลายชนิด โดยเฉพาะพอลิออลสามารถใช้โครงสร้างที่เป็นพอลิเอสเทอร์ (Polyester) หรือพอลิอีเทอร์ (Polyether) ทำให้ได้พอลิยูริเทนที่มีสมบัติต่างกันโดยพอลิเอสเทอร์มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดีมีเสถียรภาพทางความร้อนและมีความต้านทานต่อน้ำมัน ส่วนพอลิอีเทอร์สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ต้านทานต่อการดูดน้ำ ทำให้สามารถใช้งานได้ดีในที่ที่มีความชื้นสูงได้ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

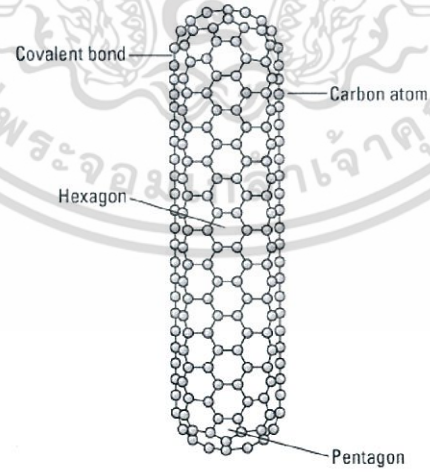


รูปที่ 1.3 สมการการเกิดพอลิยูริเทน [4]



รูปที่ 1.4 โครงสร้างโมเลกุลของ Polyether polyol และ Polyester polyol [5]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟีนให้มีรูปร่างเป็นท่อ(แผ่นกราฟีนมีโครงสร้างวงแหวนหกเหลี่ยมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันในระนาบเดียวกันคล้ายรังผึ้ง) ส่วนปลายท่อของ CNT ปิดด้วยครึ่งทรงกลมของฟลูเลอรีน (ฟลูเลอรีนคือ อะตอมคาร์บอน C_{60} เรียงต่อกันเป็นตาข่ายทรงกลมมีลักษณะเป็น Buckyball) ลักษณะโครงสร้างของ CNT แสดงดังรูปที่ 1.5 และเนื่องจากอะตอมในโครงสร้างของ CNT จะอยู่ที่พื้นผิวทั้งหมดจึงส่งผลให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง เพราะอะตอมที่พื้นผิวสามารถสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวได้ทุกอะตอม [7]



รูปที่ 1.5 โครงสร้างของ CNT [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ CNT อยู่ในระดับนาโนเมตรและมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตร CNT จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า จึงทำให้ CNT มีคุณสมบัติที่แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา นอกจากนี้แล้ว CNT ยังมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญอย่างมากคือ ความสามารถในการเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า อีกทั้งยังมีสมบัตินำความร้อนที่ดีอีกด้วย [7]

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิตระหว่างพอลิยูริเทน (Polyuretane, PU) กับ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube, MWCNT) ที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว ซึ่งกระบวนการอบอ่อนเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) โดยกระบวนการอบอ่อนจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์จึงอาจส่งผลให้ CNT เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวและอาจเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างร่างแห่ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นจนนำไปสู่การเพิ่มสมบัติด้านการนำไฟฟ้าได้ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนต่อจุดที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตและศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ MWCNT หลังผ่านการอบอ่อนใน PU เมทริกซ์ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนิ่มที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต
2. ตรวจหาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตหลังผ่านกระบวนการอบอ่อนใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนิ่มที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PU/MWCNT นาโนคอมโพสิต รวมถึงวิธีการเตรียมคอมพอสิตแบบหลอมเหลว (Melt mixing) และปัจจัยที่ส่งผลต่อจุดนำไฟฟ้าของ CNT ในวัสดุนาโนคอมพอสิต
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการอบอ่อน (Annealing) ที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติอื่นๆ
3. เตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่าง PU และ MWCNT โดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่อง Internal mixer โดยใช้ PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนิ่มต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

เอกสารนี้มีการที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขึ้นรูปชิ้นงานนาโนคอมพอสิตโดยกระบวนการกดอัดด้วยเครื่อง Compression molding

5. ทำการอบอ่อน PU/MWCNT ที่ช่วงเวลาและอุณหภูมิต่างกัน คือ PU-ester/MWCNT ใช้อุณหภูมิอบอ่อนที่ 100°C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมงและ PU-ether/MWCNT ใช้อุณหภูมิอบอ่อนที่ 80°C เป็นเวลา 8, 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมง

6. หาจุดนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการอบอ่อนและศึกษาสมบัติของนาโนคอมพอสิตหลังการอบอ่อนที่สภาวะต่างๆ เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าการนำไฟฟ้า

7. ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ศึกษาโครงสร้างของนาโนคอมพอสิคด้วยเทคนิค FT-Raman ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ดูลักษณะการกระจายตัวของ MWCNT ในพอลิยูริเทนด้วยเทคนิค FESEM และทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลกระทบของเวลาที่เหมาะสมในการอบอ่อนของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้า

2. ทราบถึงผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนต่อสัดส่วนวิกฤตและโครงร่างตาข่ายของจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต

3. ทราบถึงผลกระทบของโครงสร้างส่วนนิ่มที่ต่างกันใน PU ต่อการเกิดจุดนำไฟฟ้าใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตหลังผ่านกระบวนการอบอ่อน

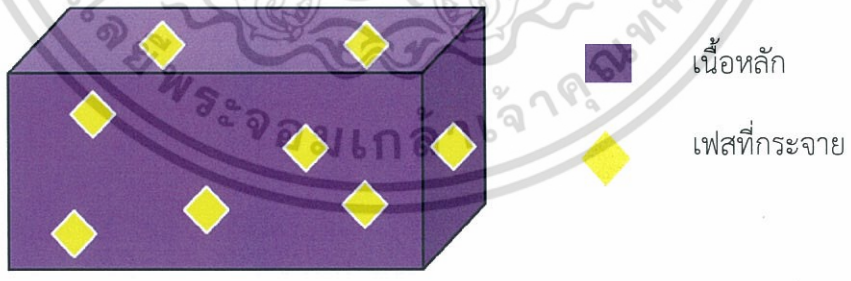
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุนาโนคอมพอสิต

2.1.1 ความหมายของวัสดุนาโนคอมพอสิต

วัสดุผสมหรือวัสดุคอมพอสิต (Composite Materials) หมายถึงวัสดุที่เกิดจากการนำวัสดุมากกว่าสองชนิดที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันมาผสมหรือมารวมกันเหตุผลของการทำวัสดุผสมขึ้นมาก็เพื่อที่จะสร้างสมบัติบางอย่างที่วัสดุเดิมมีขีดจำกัดอยู่ เช่น ความแข็งแรง น้ำหนัก สมรรถนะที่อุณหภูมิสูง ความต้านทานการกัดกร่อน และการนำไฟฟ้า เป็นต้น วัสดุที่ผสมขึ้นมาจะเป็นวัสดุที่รวมสมบัติเด่นของแต่ละวัสดุเข้าด้วยกันโดยที่ส่วนประกอบที่นำมาผสมกันนั้นอาจมีรูปร่างและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกเป็นเฟสที่เห็นได้ชัดคือเฟสแรกเรียกว่า เนื้อหลัก (Matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและอีกเฟสหนึ่งเรียกว่าเฟสที่กระจายหรือวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) จะกระจายอยู่ในเนื้อของวัสดุเนื้อหลัก ดังรูปที่ 2.1 วัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ ส่วนวัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนดในขณะที่วัสดุเสริมแรงจะเป็นตัวช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น [8]

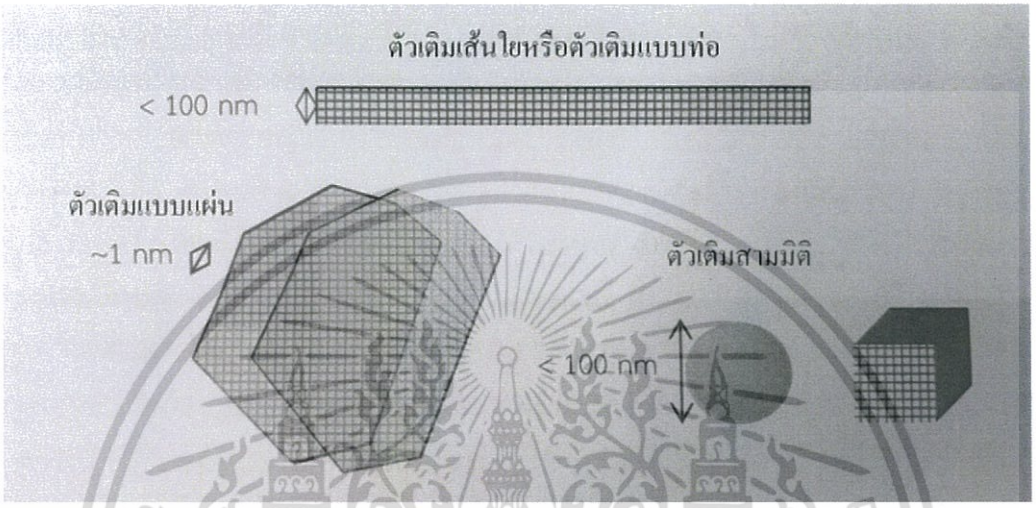


รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเนื้อหลักและเฟสที่กระจายของวัสดุคอมพอสิต

โดยทั่วไปแล้วการศึกษาสารประกอบนาโนคอมพอสิตจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาวัตถุที่เป็นพหุเฟส (Multiphase Material) ซึ่งมีมิติด้านหนึ่งน้อยกว่า 100 นาโนเมตร สารประกอบนาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้ทำหน้าที่ได้หลากหลาย การประกอบกันเป็นสารประกอบมีลักษณะเด่นที่เห็นได้ชัดก็คือการมีสมบัติต่างจากไปจากวัสดุเดิม เช่น การนำไฟฟ้าและตัวนำความร้อน เป็นต้น สารตัวเติมขนาดนาโนเมตรมีหลายรูปร่างและหลายขนาด เมื่อแยกกลุ่มนาโนแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ตัวเติมเส้นใยหรือตัวเติมแบบท่อ ตัวเติมแบบแผ่นและตัวเติมสามมิติ [10] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบร่างของตัวเติมขนาดนาโน [10]

2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิต สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลัก [9] ดังนี้

1. พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer Matrix Composites, PMCs) เป็นวัสดุที่ใช้พลาสติกชนิดเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกเป็นเมทริกซ์ที่ประสานวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันพอลิเมอร์ที่ใช้งานในวัสดุคอมพอสิตมีข้อจำกัดของการใช้งานที่อุณหภูมิสูงโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงกว่า 150-200 $^{\circ}$C แต่พอลิเมอร์มีจุดเด่นคือมีความหนาแน่นต่ำจึงทำให้ผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์มีน้ำหนักเบา ทนการสึกกร่อนจากสิ่งแวดล้อมและสภาพอากาศได้ดีกว่าโลหะและอลูมิเนียมซึ่งเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับความชื้นและอากาศอีกทั้งยังประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะ เป็นต้น การนำพอลิเมอร์คอมพอสิตไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบันยังคงมีค่าใช้จ่ายสูงอยู่มากอย่างไรก็ตามวัสดุนี้ได้เข้ามามีบทบาทในการสร้างผลิตภัณฑ์ชิ้นงานที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและคุณภาพสูงหลายสาขา ได้แก่อากาศยาน รถยนต์ รถบรรทุก ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับงานอุตสาหกรรม รวมไปถึงโครงสร้างใหญ่ๆ เช่น เรือและงานก่อสร้าง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โลหะคอมพอสิต (Metal Matrix Composites, MMCs) เป็นวัสดุคอมพอสิตชนิดใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ได้แก่ อลูมิเนียม ไททาเนียม แมกนีเซียม เหล็ก แบริเลียมเป็นต้น เนื่องจากโลหะจัดเป็นวัสดุที่มีความแข็ง (Hardness) ทนแรงดึงอยู่ในเกณฑ์สูงและทนต่อความร้อนสูงโลหะสามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับพลาสติกในกลุ่มแรกแต่โลหะมีความสามารถต่อต้านการเปลี่ยนรูปร่างขณะใช้งานได้ต่ำ เนื้อโลหะสึกกร่อนง่าย เมื่อพิจารณาน้ำหนักของโลหะในลักษณะของความหนาแน่นจะเห็นได้ว่าโลหะมีน้ำหนักมากและแพงกว่าเมื่อเทียบกับพลาสติก การทำวัสดุคอมพอสิตประเภทนี้เน้นประโยชน์การใช้งานที่ต้องการสมรรถนะสูงมากและเพิ่มขีดความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิต

3. เซรามิกคอมพอสิต (Ceramic Matrix Composites, CMCs) วัสดุคอมพอสิตขึ้นรูปด้วยเมทริกซ์ที่เป็นเซรามิก มีความแข็งและสมบัติเด่นในด้านการทนความร้อน ทนการกัดกร่อนจากสภาพอากาศและจากสารเคมี สมบัติเหล่านี้ของเซรามิกเด่นกว่าสมบัติของเมทริกซ์ในสองกลุ่มแรกที่กล่าวมาแต่เซรามิกมีความแข็งเปราะมากกว่าวัสดุปกติทั่วไปและแตกหักง่าย ชิ้นงานจากเซรามิกคอมพอสิตจึงนิยมนำมาใช้ทำวัสดุทนการสึกหรอ สารเคมีและความร้อน เช่น ชุดกรองสำหรับแก๊สร้อน เตาเผาเป็นต้น

2.1.3 การเตรียมนาโนคอมพอสิต

วิธีการเตรียมนาโนคอมพอสิตมี3วิธี คือ การเตรียมแบบสารละลาย (Solution Mixing), การเตรียมแบบ In Situ Polymerization และการเตรียมแบบหลอมเหลว (Melt Mixing) [11]

1. การเตรียมแบบสารละลายเป็นการนำอนุภาคนาโนใส่ในตัวทำละลายและผสมกับสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้แรงเฉือนในการผสม หลังจากที่ผสมเรียบร้อยแล้วทำการระเหยตัวทำละลายออกจะได้นาโนคอมพอสิต ข้อจำกัดของการเตรียมแบบวิธีนี้คือ พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องละลายในตัวทำละลาย

2. การเตรียมแบบ In Situ Polymerization เป็นการนำอนุภาคนาโนมาผสมกับมอนอเมอร์และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชั่นหลังจากนั้นจะได้นาโนคอมพอสิตการเตรียมวิธีนี้เหมาะสำหรับพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำและมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำซึ่งไม่สามารถเตรียมได้ด้วยการเตรียมแบบสารละลายและการเตรียมแบบหลอมเหลว

3. การเตรียมแบบหลอมเหลวเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมนาโนคอมพอสิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ ซึ่งการเตรียมแบบหลอมเหลวเป็นการผสมกันระหว่างอนุภาคนาโนและพอลิเมอร์โดยการให้ความร้อนและแรงเฉือนผ่านเครื่องมือผสม เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พอลิยูริเทน

พอลิยูริเทน (Polyurethane, PU) เป็น block copolymer ที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง Diisocyanate, Polyol และ Chain extender พอลิยูริเทนมีทั้งชนิดที่เป็นเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต พอลิยูริเทนเป็นพลาสติกที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดชนิดหนึ่งเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีตั้งแต่อ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น จนถึงเป็นโฟมชนิดแข็ง พอลิยูริเทนสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้หลากหลาย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตรงตามความต้องการในการใช้งาน พอลิยูริเทนแบ่งออกตามการใช้งานเป็น 3 กลุ่ม [12] คือ

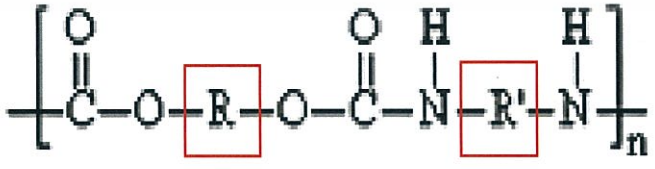
1. พอลิยูริเทนชนิดยืดหยุ่น (Flexible polyurethane foam) นิยมใช้ทำเบาะเฟอร์นิเจอร์และใช้รองพื้นพรม

2. พอลิยูริเทนชนิดแข็ง (Flexible polyurethane foam) มีคุณสมบัติเด่นๆคือเป็นฉนวนที่ดี นิยมใช้ทำปีกเครื่องบิน ท้องเรือ ภาชนะเก็บของร้อนและเย็นเพื่อให้เกิดความแข็งแรงและเป็นฉนวนความร้อน

3. พอลิยูริเทนอีลาสโตเมอร์ (Semirigid polyurethane foam polyurethane elastomer) สามารถทนต่อแรงเสียดทานได้ดีมาก มีความยืดหยุ่นดีใช้ทำยางรถยนต์และพื้นรองเท้า นอกจากนี้อีลาสโตเมอร์ยังสามารถนำไปใช้ทำเป็นอีลาสติกไฟเบอร์ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ไหมเย็บแผลและชุดว่ายน้ำได้อีกด้วย

2.2.1 โครงสร้างของพอลิยูริเทน

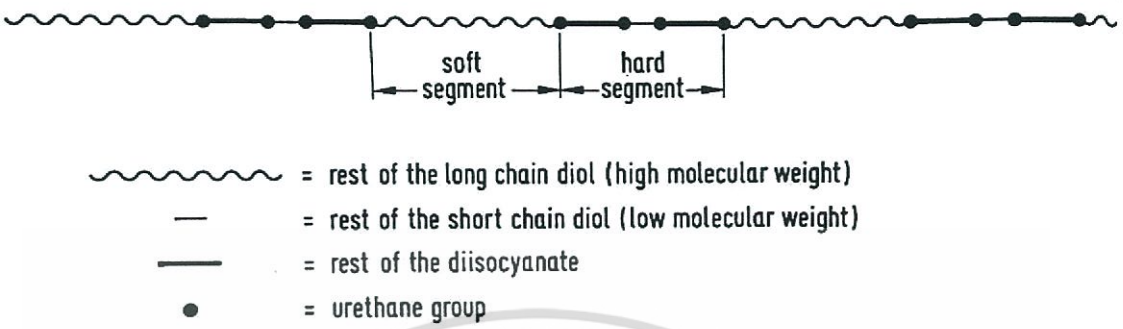
ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูริเทนและความแตกต่างของชนิดพอลิยูริเทนนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของหมู่อัลคิล (R และ R' ดังแสดงในรูปที่ 2.3) นอกจากนี้แล้วหมู่อัลคิลยังสามารถใช้เป็นกลุ่มที่บ่งบอกแนวโน้มสมบัติของพอลิยูริเทนได้ [5]



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูริเทน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของพอลิยูริเทนพื้นฐานทั่วไปของหน่วยซ้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ โครงสร้างส่วนนิ่ม (Soft segment) และโครงสร้างส่วนแข็ง (Hard segment) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



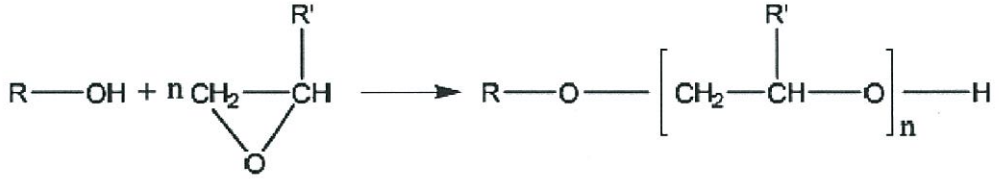
รูปที่ 2.4 โครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งของพอลิยูริเทน [13]

2.2.1.1 โครงสร้างส่วนนิ่ม

โครงสร้างส่วนนิ่มเป็นส่วนอสัณฐาน (Amorphous phase) ที่ให้ความยืดหยุ่นสูงมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ประกอบด้วยส่วนของ Polyol ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับหมู่ Isocyanate เกิดเป็นพันธะยูริเทนขึ้น โดยส่วนมากนิยมใช้ Polyether polyol และ Polyester polyol ตัวอย่างชนิดของ Polyol มีดังต่อไปนี้ [13]

1. Polyether polyol

Polyether polyolได้จากปฏิกิริยาระหว่าง Hydroxyl group กับ Cyclic ether โดยหมู่ไฮรอกซิลที่ใช้ ได้แก่ Ethylene glycal (EG), 1,2-propane diol(PG), และ Bisphenol A (BPA) เป็นต้น และ Cyclic ether ที่ใช้ได้แก่ Propylene oxide (PO), Ethylene oxide (EO) และ Butylene oxide เป็นต้น โดย ethylene oxide เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะเกิดหมู่ Primary hydroxyl จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ Isocyanateเกิดเป็น PU ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Propylene oxide ที่ให้หมู่ secondary hydroxyl ดังสมการในรูปที่ 2.5



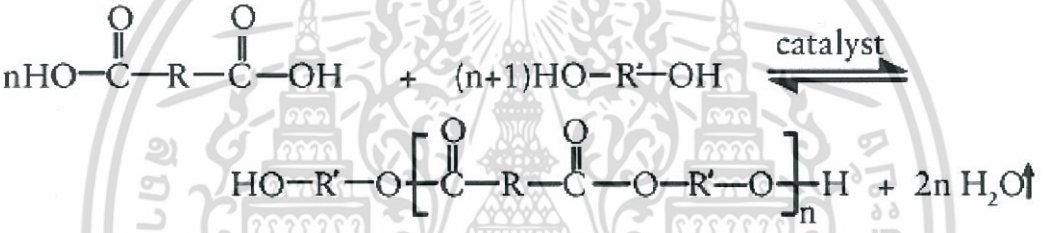
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเกิด Polyether polyol [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเด่นทางเคมีของ Polyether polyol ที่ส่งผลต่อพอลิยูริเทนคือ สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ต้านทานการดูดน้ำ (Hydrolytic stability) ทำให้สามารถใช้งานได้ดีในที่ที่มีความชื้นสูง เนื่องจากส่วนที่ไม่มีขั้วของ Polyether แต่มีข้อเสียคือเกิดการเสื่อมสภาพโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อสัมผัสกับความร้อนและออกซิเจนในอากาศ

2. Polyester polyol

Polyester polyol ได้จากกระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง Di/trifunctionalpolyol กับ Dicarboxylic acid หรือ Acid anhydride โดย Polyol ที่ใช้ทั่วไปคือ Ethylene glycol, 1,2-propanediol, 1,4-butanediol, 1,6-hexanediol, Neopentyl glycol และ Glycerol ส่วน Dibasic acid ที่ใช้ทั่วไปคือ Succinic acid, Glutaric acid, Adipic acid และ Phtharic acid ดังสมการในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเกิด Polyester polyol [15]

โครงสร้างของ Polyester polyol แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้โดยโครงสร้างแบบ Aliphatic Polyesters เป็นโครงสร้างเส้นตรงปลายเปิดได้จากปฏิกิริยาระหว่าง Dibasic acid เช่น Dipic acid, Phthalic acid และ Sebaci acid กับ Glycol เช่น Ethyleneglycol, Propylene glycol, Diethylene glycol, 1,4-butanediol และ 1,6-hexanediol นอกจากนี้ยังได้จากปฏิกิริยาการเปิดวงของ Caprolactone ได้อีกด้วย ซึ่งโครงสร้างจะมีความหนืดสูง มีค่าหมู่ฟังก์ชันต่ำและควบคุมปฏิกิริยาการเกิดได้ยาก ส่วนโครงสร้างแบบ Aromatic polyesters เป็นโครงสร้างแบบวงปิดพันธะเดี่ยวสลับพันธะคู่ได้จากปฏิกิริยา Trans-esterification ของ Polyethylene terephthalate (PET) ที่นำไปใช้ในโฟมพอริยูริเทนชนิดแข็ง

สมบัติเด่นทางเคมีของ Polyether polyol ที่ส่งผลต่อพอลิยูริเทนคือมีสมบัติเชิงกลดี เช่นความทนทานต่อการขัดถู ทนทานต่อความร้อนและน้ำมัน แต่ข้อเสียคือไม่เหมาะสำหรับใช้ในบริเวณที่มีความชื้นสูงและการสัมผัสกับน้ำ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Polycarbonate polyol

Polycarbonatepolyol ได้จากปฏิกิริยา Transesterification ของ Dimethyl carbonate (DMC) หรือ Diphenylcarbonate (DPC) กับ Glycol สมบัติเด่นทางเคมีของ Polycarbonatepolyol ที่ส่งผลต่อพอลิยูริเทนคือ มีความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้สูง

4. Other polyol

Polyol อื่นๆ ที่สังเคราะห์โดยใช้ Oligomer ที่มีหมู่ฟังก์ชัน –OH, –SH, –COOH และ –NHR ตัวอย่าง Polyol อื่นๆ ได้แก่ Acryric, Polythioether, Polytetramethyleneglycolether, Polyacetal, polyamide, Alkyl resin และ Polysiloxanepolyol เป็นต้น รวมทั้งที่เป็น Polymer polyol(Filled polyol) ได้แก่ Graft polyether polyols, PHD polymer polyols (Polyurea dispersions), Polyisocyanatepolyaddition (PIPA) polymer polyols, เป็นต้น [15]

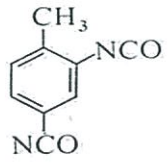
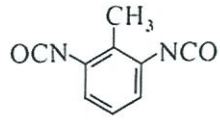
2.2.1.2 โครงสร้างส่วนแข็ง

โครงสร้างส่วนแข็งเป็นส่วนผลึก (Crystallinephase) ให้ความแข็งแรงสูงประกอบด้วยส่วนของ Diisosyanate และ chain extender

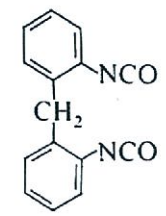
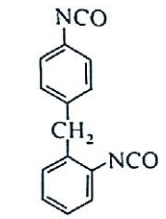
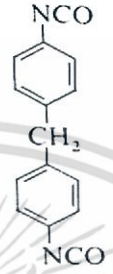
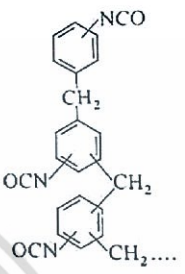
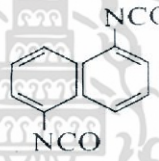
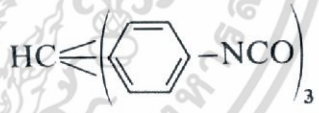
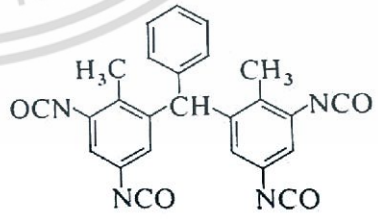
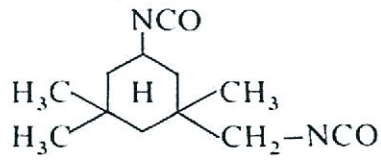
1. Diisocyanate

Isocyanate ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูริเทนมีหลายชนิด คือ Aromatic, Aliphatic และ Cycloaliphatic isocyanate ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่ต่างกันทำให้ได้พอลิยูริเทนที่มีสมบัติแตกต่างกัน โดยโครงสร้างแบบ Aromaticisocyanate นิยมใช้มากกว่า เนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ Hydroxyl และให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เช่น มีความแข็งแรงสูง แต่โครงสร้างแบบ Aliphatic isocyanate จะให้สมบัติพิเศษคือ ไม่เปลี่ยนสีเมื่อโดนแสงแดด ทำให้นิยมนำไปใช้ในงานจำพวกสารเคลือบผิวหรือสีชนิดของ Isocyanate ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.1

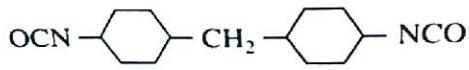
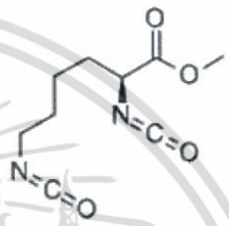
ตารางที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของ Isocyanate แต่ละชนิด

Aromatic diisocyanate	โครงสร้างโมเลกุล
1). Toluenediisocyanate (TDI) มี 2 isomer คือ 2,4-TDI isomer และ 2,6-TDI isomer	 2,4-TDI isomer  2,6-TDI isomer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2). Diphenylmethanediisocyanate (MDI) มี 4 isomer คือ 2,2-MDI, 2,4-MDI, 4,4-MDI และ Polymeric-MDI	 2,2-MDI  2,4-MDI  4,4-MDI  Polymeric-MDI
3). Naphthalene-1,5-diisocyanate (NDI)	
4). 4,4',4''-triisocyanato-triphenylmethane	
5). Tetraisocyanate	
Cycloaliphatic diisocyanate	**โครงสร้างโมเลกุล**
1). 1-isocyanato-3-isocyanatomethyl-3,5,5-trimethyl cyclohexane (isophoronediisocyanate, IPDI)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2). 4,4'-diisocyanato dicyclohexylmethane (hydrogenated MDI, H_{12} MDI)	
Aliphatic diisocyanate	**โครงสร้างโมเลกุล**
1). 1,6-hexamethylene diisocyanate (HDI)	$OCN-(CH_2)_6-NCO$
2). Lysine ester diisocyanate	 Methyl Ester L-Lysine Diisocyanate

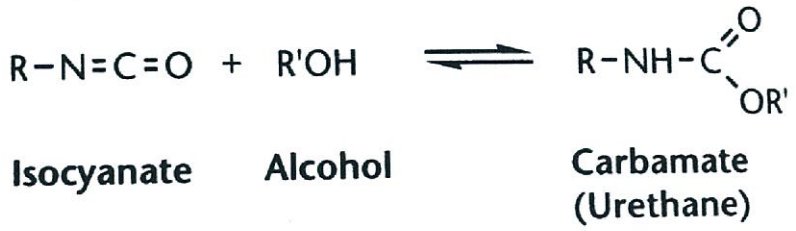
2. Chain extender

Chain extender เป็นสารที่มีหมู่ Hydroxyl เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Ethylene glycol, 1,4-butanediol, 1,6-hexanedio และ Hydroquinone bis(2-hydroxyethyl) ether เป็นต้นหรือสารที่มีหมู่ Amine เป็นองค์ประกอบได้แก่ 1-amino-3-aminomethy-3,5,5-trimethylcyclohexane (Isophoronediamine) สารเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยากับ Isocyanate จะเกิดพันธะยูริเทนในโครงสร้างของพอลิยูริเทนโดยทำหน้าที่เชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของพอลิยูริเทนให้เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่พันธะไฮโดรเจนและทำให้พอลิยูริเทนทนทานต่อความร้อนและสารเคมีมากขึ้น [16]

2.2.2 ปฏิกิริยาพื้นฐาน

การสังเคราะห์พอลิยูริเทนถูกค้นพบโดย Otto Bayer [17] ด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นจากการการทำปฏิกิริยาระหว่าง Isocyanate กับ Alcohol ได้เป็น Carbamate หรือที่เรียกว่า Urethane ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) และเป็นปฏิกิริยาผันกลับ (Reversible reaction) ดังสมการในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

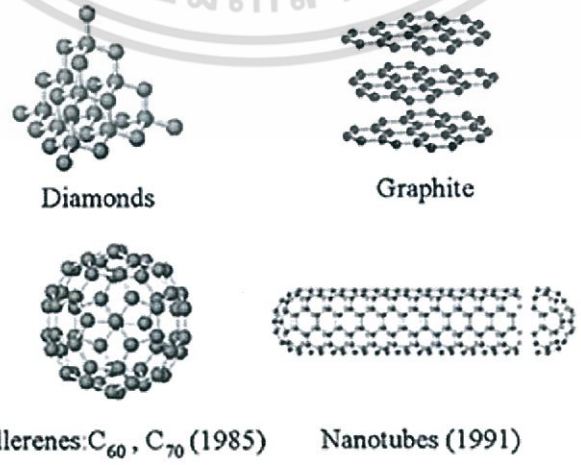


รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการเกิด Urethane [17]

2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbonnanotube, CNT) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1991 โดยศาสตราจารย์ชาวญี่ปุ่นชื่อซูมิโอะลิจิมา (SumioLijima) [18] โดยพื้นฐานแล้วเกิดมาจากธาตุคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างในระดับนาโนเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากว่า CNT มีลักษณะโครงสร้างพิเศษที่แตกต่างไปจากอัญรูปทั้ง 3 แบบของธาตุคาร์บอนซึ่งก็คือ เพชร แกรไฟต์ และฟลูเลอรีน ดังรูปที่ 2.8 โดย CNT นี้เกิดขึ้นจากอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันเป็นแผ่นเหมือนกับโครงสร้างของแกรไฟต์ที่เชื่อมโยงกันเป็นตาข่ายที่มีรูรูปหกเหลี่ยมแต่มีลักษณะที่ม้วนตัวเข้าหากันเป็นท่อหรือเป็นหลอด

CNT มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-15 นาโนเมตรและมีความยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร CNT มีคุณสมบัติที่แข็งแรงกว่าเหล็กกล้าแต่ก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา อีกทั้งยังมีความสามารถในการเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้าและสามารถนำความร้อนได้ดีเนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของ CNT จึงนิยมนำมาทำเป็นวัสดุคอมพอสิต เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเพิ่มฟังก์ชันในการใช้งานของพอลิเมอร์



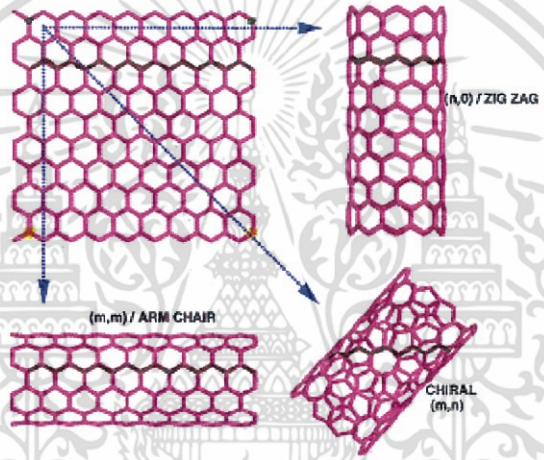
รูปที่ 2.8 โครงสร้างการจัดเรียงอะตอมแบบต่างๆของธาตุคาร์บอน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์

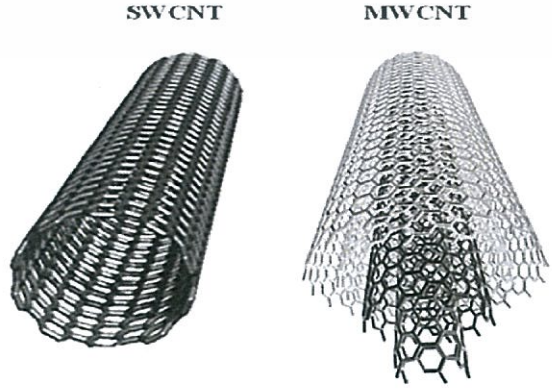
คาร์บอนนาโนทิวบ์ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด [19] ดังนี้

1.ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-wall Carbon Nanotube, SWCNT) ประกอบด้วยแผ่นกราฟีน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดจากอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นรูปหกเหลี่ยมม้วนเป็นรูปทรงกระบอกแบบไม่มีรอยต่อผนังของ SWCNT มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันตามการม้วนของแผ่นแกรไฟต์ทำให้เกิดลวดลายบนผนังท่อที่ต่างกัน ส่งผลให้การนำไฟฟ้าแตกต่างกัน ด้วย SWCNT มีโครงสร้างแตกต่างกัน 3 แบบ คือ โครงสร้างท่อแบบ Armchair แผ่นแกรไฟต์ม้วนตามแนวสมมาตรแกนตั้ง, โครงสร้างท่อแบบ Zigzag แผ่นแกรไฟต์ม้วนตามแนวสมมาตรแกนนอน และโครงสร้างท่อแบบ Chiral แผ่นแกรไฟต์ม้วนในมุมบิดที่ต่างจากสองแบบแรก



รูปที่ 2.9 การม้วนของแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน [20]

2. ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-Wall Carbon Nanotube, MWCNT) ประกอบด้วยแผ่นกราฟีนที่ม้วนเข้าหากันเป็นทรงกระบอกกลวงซ้อนกันหลายๆชั้น โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกันดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความแตกต่างระหว่าง SWCNT และ MWCNT [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3.2 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

1. สมบัติทางไฟฟ้า

สมบัติทางไฟฟ้าของ CNT ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ CNT ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งการที่ CNT มีลวดลายของผนังท่อที่ต่างกันทำให้การนำไฟฟ้าของ CNT แตกต่างกันซึ่ง MWCNT มีโครงสร้างแบบ Chiral จะแสดงความสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้า ส่วน SWCNT ซึ่งมีโครงสร้างต่างกัน 3 แบบจะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังนี้ โครงสร้างท่อแบบ Armchair จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า, โครงสร้างท่อแบบ Zigzag จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกึ่งตัวนำไฟฟ้า และโครงสร้างท่อแบบ Chiral แผ่นแกรไฟต์ม้วนในมุมบิดที่ต่างจากสองแบบแรกจะมีสมบัติอยู่ระหว่างสองแบบแรก [7]

2.สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาวิจัยในปัจจุบันทำให้สามารถพิสูจน์ได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึง (Stiffness) และมีความแข็งแรง (Strong) ที่สุดที่เคยผลิตขึ้นมา คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่ามอดุลัสของยังที่สูงที่สุดสูงถึง 1000 GPa ซึ่งสูงประมาณ 5 เท่าของเหล็กกล้าและมีความต้านทานแรงดึงสูงถึง 63 GPa ซึ่งสูงกว่าเหล็กกล้าประมาณ 50 เท่า [22]

3.สมบัติทางความร้อน

การนำความร้อนของ CNT เกิดจากการสั่นของแลตทิชของของแข็ง (Lattice vibration) แล้วเกิดการปลดปล่อยโฟนอน (Phonon) ออกมา CNT เมื่อนำมาทำเป็นวัสดุคอมพอสิตจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ใช้แทนอนุภาคโลหะหรืออนุภาคอะลูมินาได้ [18]

2.3.3 การใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในปัจจุบัน

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นโครงสร้างนาโนที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายด้าน ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย ยกตัวอย่างเช่น ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีของซัมซุง (Samsung Advanced Institute of Technology) ได้ทดลองนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาทดแทนแหล่งกำเนิดแสงให้หน้าจอ LCD ที่ปกติจะใช้หลอดไฟหรือหลอด LED ในการกำเนิดแสง ซึ่งพบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์จะช่วยเพิ่มความละเอียดของหน้าจอ LCD ให้สูงมากขึ้นและมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลงด้วย นอกจากนี้ยังช่วยให้จอ LCD สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นรวมถึงมีการแสดงผลที่รวดเร็วมากขึ้นด้วย โดยหน้าจอแบบนี้จะถูกเรียกว่า Field-emitter Displays หรือ FED [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

149486

อย่างไรก็ตามถึงแม้การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในปัจจุบันสามารถกระทำได้หลากหลายด้าน แต่จุดด้อยที่สำคัญของคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็คือเรื่องราคาที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้ในปัจจุบันยังไม่ค่อยพบการใช้งานที่แพร่หลายมากนัก

2.4 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า

พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า (Electrically conductive polymer composites, ECPCs) เป็นการผสมกันของวัสดุพอลิเมอร์ทั้งที่เป็นเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้ากับสารตัวเติมในกลุ่มที่มีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ ผงเขม่าดำ แกรไฟต์ เส้นใยคาร์บอนและผงโลหะ โดยสารตัวเติมกลุ่มนี้จะมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เมื่อผสมกันแล้วจะทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัตินำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านอนุภาคสารตัวเติมนำไฟฟ้าที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับการเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาคของสารตัวเติม ค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแต่ละอนุภาคที่อยู่ใกล้กันและระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ [24]

2.4.1 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตในช่วงที่คอมพอสิตเปลี่ยนจากวัสดุไม่นำไฟฟ้า ($p<p_c$) เป็นวัสดุนำไฟฟ้า ($p>p_c$) อธิบายได้จากสมการ Scaling power law ดังนี้ [25]

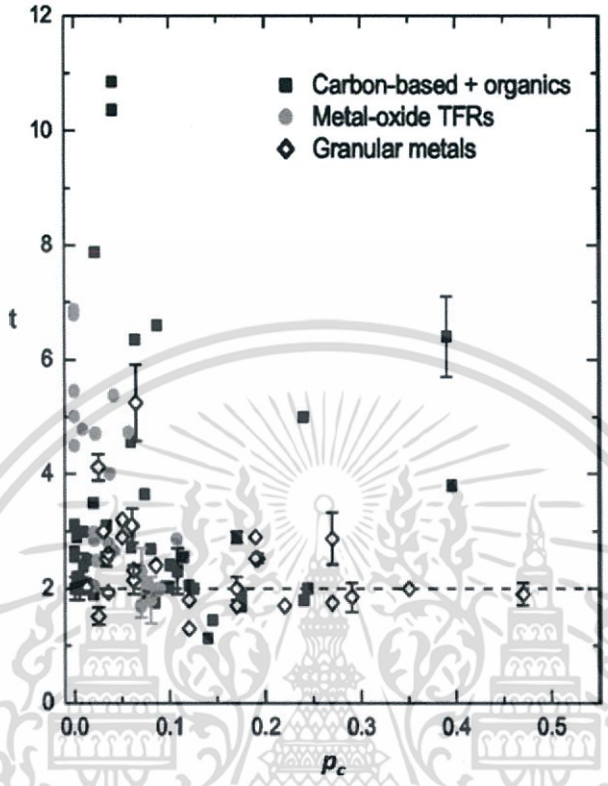
$$\sigma_c=\sigma_0 (p-p_c)^t$$

โดย
- σ_c คือ ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต
- σ_0 คือ ค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติม
- p คือ ความเข้มข้นของสารตัวเติม
- p_c คือ ความเข้มข้นของจุดที่เกิดการนำไฟฟ้า (Percolation threshold)
- t คือ เลขชี้กำลังวิกฤต (Critical exponent)

จากรูปที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า t กับ Percolation threshold (p_c) ในวัสดุหลากหลายชนิด ได้แก่ Carbon-based ผสมกับ organics, Metal-oxide Thick Film Resistors (TFRs) และ Granular metals พบว่าค่า Percolation threshold อยู่ในช่วง 0.05 – 0.5 และค่า Critical exponent อยู่ในช่วง 1.5-11 โดยค่า Criticalexponent สามารถบ่งบอกลักษณะของโครงสร้างผลึก โดยมีค่าเป็นแบบ Universal คือ t=1.3 (โครงสร้างผลึกแบบสองมิติ), t=2 (โครงสร้างผลึกแบบสามมิติ), t=2.4 (โครงสร้างผลึกแบบสี่มิติ) และ t=2.7 (โครงสร้างผลึกแบบห้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิติ) [26] ซึ่งพบว่าค่า Critical exponent ในรูปที่ 2.11 ส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 2.0 ซึ่งมีลักษณะเป็น Universal



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Critical exponent (t) กับ Percolation threshold (p_c) ของ Carbon-based ผสมกับ organics, Metal-oxide TFRs และ Granular metals [25]

2.4.2 กลไกการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมพอสิต

ทฤษฎีกลไกการนำไฟฟ้าในวัสดุผสมโดยสารตัวเติมนำไฟฟ้ากระจายตัวแบบสุ่ม แบ่งได้เป็น 3 ทฤษฎี [27] คือ

1. ทฤษฎี Conductive path การสร้างโครงข่ายหรือสายโซ่การนำไฟฟ้าของสารตัวเติมในเนื้อเมทริกซ์ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งด้วยสายโซ่ของสารตัวเติมเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า ซึ่งสายโซ่ของสารตัวเติมนี้เกิดจากอนุภาคหรือกลุ่มก้อนที่สัมผัสกันหรือติดกัน ดังนั้นปรากฏการณ์การนำไฟฟ้านี้จึงจะเกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนสารตัวเติมสูงกว่าสัดส่วนวิกฤติ (Critical concentration หรือ Percolation limit)

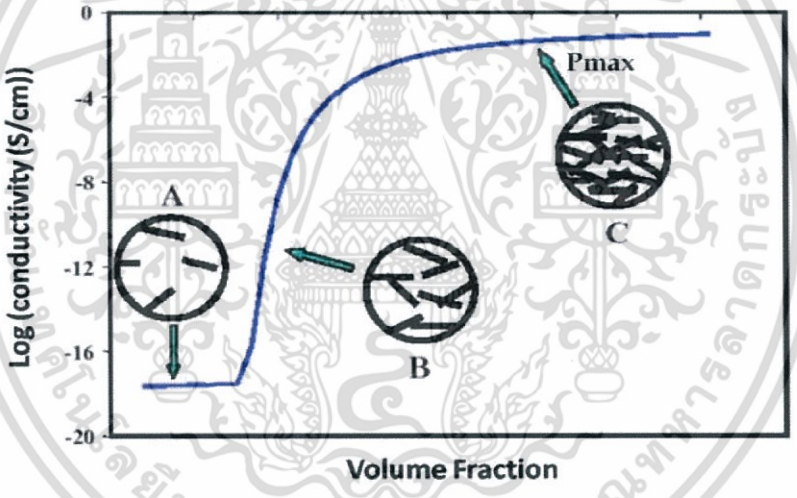
2. ทฤษฎี Electron tunneling การนำไฟฟ้าของทฤษฎีนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดข้ามผ่านช่องว่างของตัวกีดขวางระหว่างองค์ประกอบของเมทริกซ์ซึ่งระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างช่องว่างอยู่ในช่วงที่สามารถกระโดดได้ ความแตกต่างระหว่างทฤษฎีแรกก็คือสัดส่วนสารตัวเติมวิกฤติของทฤษฎีนี้จะต้องน้อยกว่าสัดส่วนวิกฤติของทฤษฎีแรก

3. ทฤษฎี Electric field radiation การไหลของประจุเกิดจากการให้สนามไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบหรือช่องว่างของอนุภาคสารตัวเติม

จากทฤษฎี Conductivepath สามารถอธิบายได้ดังนี้ หากสัดส่วนของ CNT ซึ่งเป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าในเมทริกซ์ลดลง ค่าการนำไฟฟ้าก็จะต่ำ ทำให้มีสมบัติเป็นฉนวน (Insulator) (บริเวณ A ในรูปที่ 2.12) ซึ่ง CNT นั้นจะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์แต่ไม่ได้มีการสัมผัสกันเกิดขึ้น เมื่อปริมาณ CNT เพิ่มขึ้นอนุภาคจะเกิดการเกาะเกี่ยวกันทำให้เกิดโครงข่าย 3 มิติขึ้น ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนถึงสัดส่วนของการเติมวิกฤติ เรียกจุดนี้ว่า Percolation threshold (บริเวณ B ในรูปที่ 2.12) และเมื่อสัดส่วนของ CNT มีปริมาณมากเกินพอ ค่าการนำไฟฟ้าจะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเริ่มคงที่ (บริเวณ C ในรูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 Percolation S-Curve [2]

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมพอสิต

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีหลายปัจจัยคือคุณสมบัติของวัสดุตัวเติม ความเข้มข้น รูปร่างขนาดของอนุภาค ความพรุนบริเวณพื้นที่ผิว ขนาดของการกระจายตัว การจัดเรียงตัวของอนุภาควัสดุตัวเติมและอิเล็กตรอนทันเนลลิ่ง [28]

นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตได้ด้วยวิธีการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glasstransitiontemperature, T_g) ถึงอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ภายใต้ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งความร้อนจะส่งผลต่อโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยสายโซ่พอลิเมอร์อาจจะ

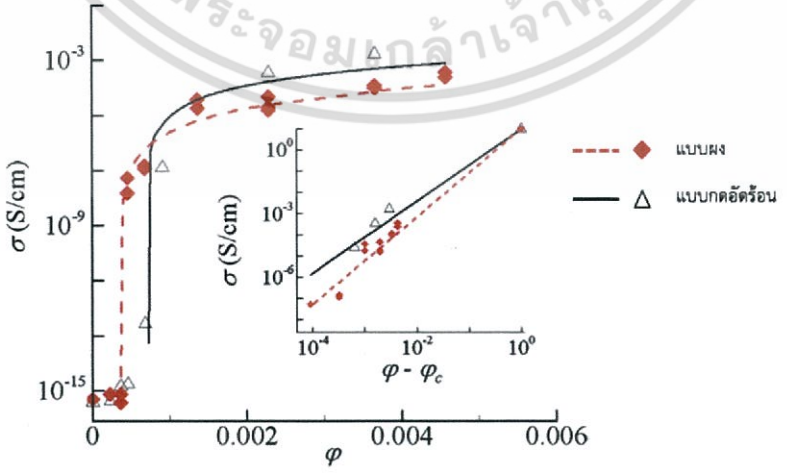
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่และอาจส่งผลให้มีปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์แต่ละชนิด การอบอ่อนจะช่วยเพิ่มสมบัติต่างๆของวัสดุ ได้แก่ สมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล เป็นต้น

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ผลกระทบของการเตรียมคอมพอสิตต่อจุดนำไฟฟ้า

Lisunova และคณะ [29] ทำการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ Ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE)/MWCNT คอมพอสิต ที่เตรียมด้วยวิธีที่ต่างกัน 2 วิธี คือ แบบผง (Power) และแบบกดอัดร้อน (Hot-pressed compact) โดยทั้งสองวิธีใช้การผสมแบบเชิงกล (Mechanical mixing) จากผลการศึกษาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมที่ใส่มีปริมาณมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยพบว่า p_c อยู่ในช่วง 0.0004 – 0.0007 ค่าที่ได้นี้สามารถอธิบายได้จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องนั่นก็คือ ค่า Aspect ratio ที่สูงของ CNT ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 100 – 1000 และการกระจายตัวของ CNT ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งพบว่าการกระจายตัวแบบสุ่มทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคมากกว่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในการเตรียมคอมพอสิตที่ต่างกันมีผลต่อค่า p_c และ t ที่คำนวณได้จากสมการ Scaling power law โดยในการเตรียมแบบผงได้ค่า p_c= 0.00073, t = 1.77 และในการเตรียมแบบกดอัดร้อนได้ค่า p_c= 0.00036, t = 2.07 ซึ่งทำให้ทราบว่าในการเตรียมแบบกดอัดร้อนมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าและมีการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์เมทริกซ์มากกว่าในการเตรียมแบบผงเนื่องจากในการเตรียมแบบกดอัดร้อนพอลิเมอร์คอมพอสิตถูกกดอัด ทำให้ภายในไม่มีช่องว่างของอากาศ ส่งผลให้อนุภาคของสารตัวเติมเกิดการเชื่อมต่อกันมากกว่าในการเตรียมแบบผง

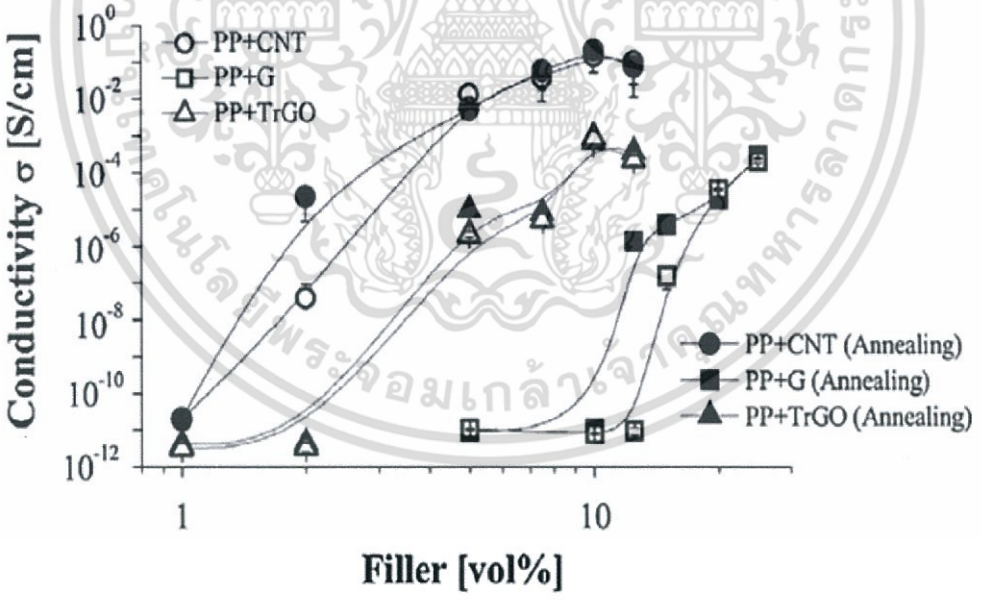


รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Electrical conductivity (σ) กับสัดส่วนโดยปริมาณ (φ) ของ MWCNT จากงานวิจัยของ Lisunova และคณะ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

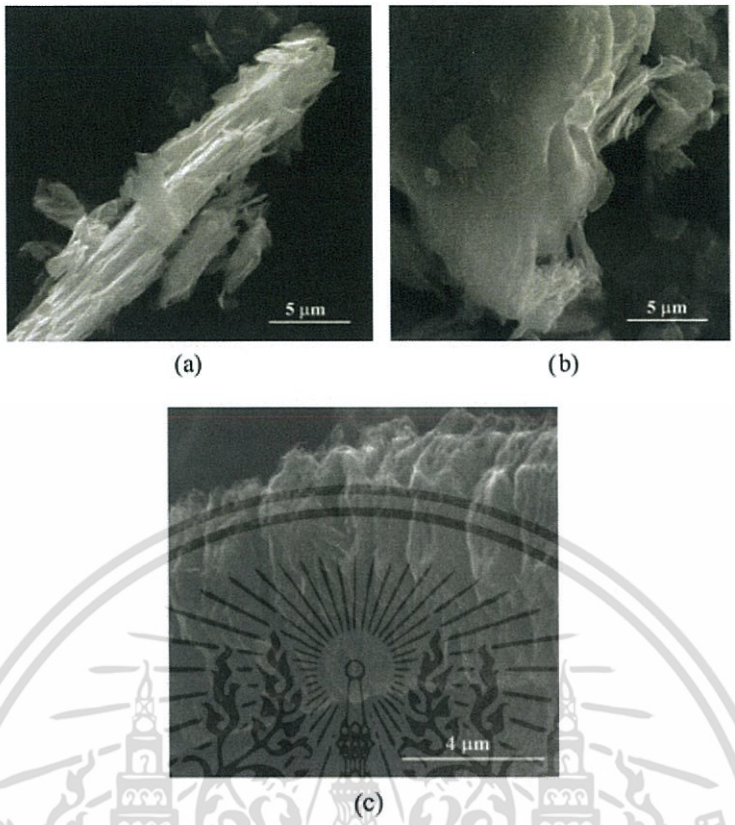
2.5.2 ผลกระทบของการอบอ่อนต่อชนิดของสารตัวเติมกลุ่มคาร์บอน

Cristhian และ Humberto [30] ทำการศึกษาพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของ Polypropylene (PP) คอมพอสิตโดยการเตรียมคอมพอสิตระหว่าง PP กับสารตัวเติมที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบพื้นฐานแต่มีลักษณะอนุภาคแตกต่างกัน ได้แก่ Graphite (G), Thermally reduced graphene oxide (TrGO) และ Carbon nanotubes (CNT) ด้วยวิธีการเตรียมแบบหลอมเหลว ผลของการศึกษาดังรูปที่ 2.14 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตที่สูงที่สุดคือค่าการนำไฟฟ้าของสูตรที่ทำการผสมระหว่าง PP กับ CNT ที่ประมาณ 10^{-1} S/cm จากการศึกษาผลของการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการทำการอบอ่อนคอมพอสิต โดยเฉพาะสูตรที่ใช้สารตัวเติมเป็น CNT และ G พบว่าค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างมากที่บริเวณจุดนำไฟฟ้าซึ่ง CNT คอมพอสิตเพิ่มขึ้นจาก 10^{-8} S/cm เป็น 10^{-5} S/cm และ G คอมพอสิตเพิ่มขึ้นจาก 10^{-10} S/cm เป็น 10^{-6} S/cm ส่วนใน TrGO คอมพอสิตไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าหลังจากการทำการอบอ่อน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีลักษณะย่น (ดังรูปที่ 2.15) ทำให้เป็นการขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของคอมพอสิตในระหว่างการอบอ่อน



รูปที่ 2.14 ผลของสารตัวเติมกลุ่มคาร์บอนและการอบอ่อนต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิพอพิลีนคอมพอสิตจากงานวิจัยของ Cristhian และ Humberto [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

(c)

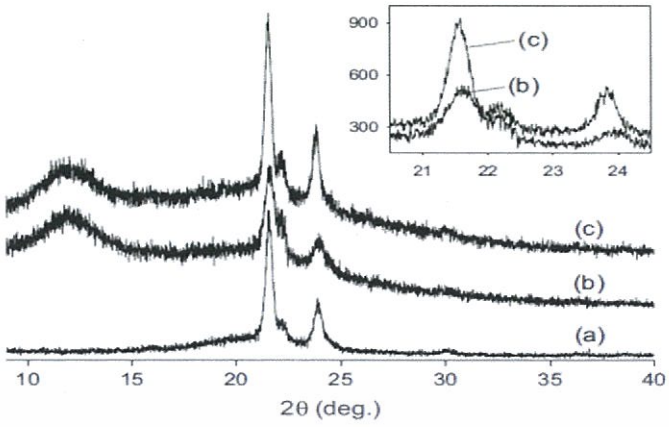
รูปที่ 2.15 ภาพ SEM ของ (a) Graphite (G), (b) Graphene oxide (GO) และ (c) Thermally Reduced grapheme oxide (TrGO) จากงานวิจัยของ Cristhianและ Humberto [30]

2.5.3 ผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกล

Ko และคณะ [31] ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใยนาโนพอลิคาโปรแลคโทน (Polycaprolactone, PCL) โดยทำการเตรียมเส้นใยนาโน PCLที่ 15%wt ในตัวทำละลาย DMF จากนั้นขึ้นรูปด้วยเทคนิค Electrospinning process แล้วเคลือบด้วยยางซิลิโคน (Sylgard 184) เปรียบเทียบกับเส้นใยนาโนเคลือบด้วยยางซิลิโคนที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเส้นใยนาโนที่ผ่านการอบอ่อนมีค่า Young's modulus และ Tensile strength มากขึ้น แต่ค่า Elongation at break ลดลง

เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) แสดงในรูปที่ 2.16 พีคการเลี้ยวเบนของผลึก เกิดพีคที่ $2\theta=22.1°$ และ $23.9°$ โดยเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง กราฟ (b) และ (c) พบว่าพีคของเส้นใยนาโนที่เคลือบด้วยยางซิลิโคนที่ผ่านการอบอ่อนให้พีคที่คมชัดและมี intensity ที่สูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากมีความเป็นผลึกมากขึ้น สอดคล้องกับค่า T_m ที่เพิ่มขึ้นจาก 60.2°C เป็น 61.1°C หลังจากผ่านการอบอ่อนผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการอบอ่อนช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของ PCL และส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นนั่นเอง

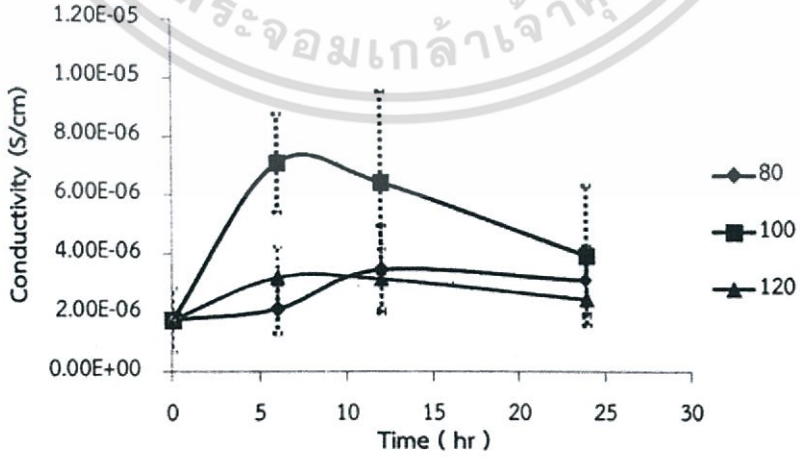
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 WAXD patterns ของ (a) เส้นใยนาโน PCL, (b) เส้นใยนาโน PCL ที่เคลือบด้วยยางซิลิโคน, และ (c) เส้นใยนาโน PCL เคลือบด้วยยางซิลิโคนที่ผ่านการอบอ่อน จากงานวิจัยของ Ko และคณะ [31]

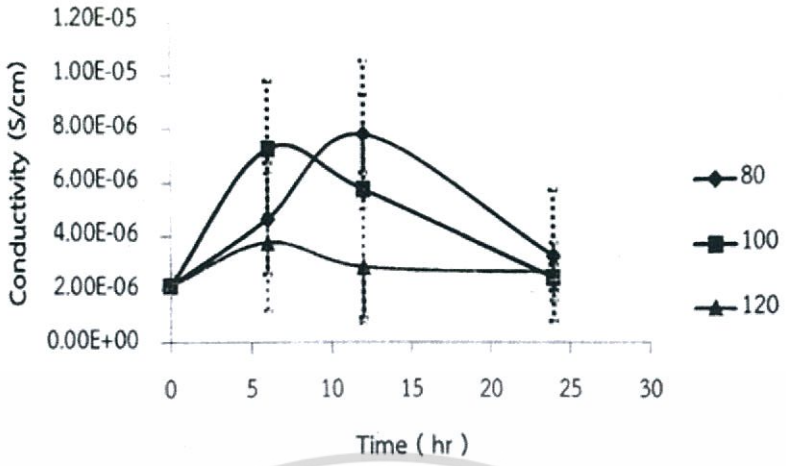
2.5.4 ผลกระทบของกระบวนการอบอ่อนต่อสมบัตินำไฟฟ้า

คุณดาราวรรณ ลิ่มถิ่น และคณะ [32] ทำการศึกษาผลกระทบของช่วงเวลาและอุณหภูมิในการอบอ่อนต่อโครงสร้างและสมบัตินำไฟฟ้าของพอลิยูริเทน/คาร์บอนนาโนทิวบ์คอมพอสิต (PU/MWCNT nanocomposite) โดยทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt กับ PU ที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มที่ต่างกันคือ PU-ester และ PU-ether แล้วทำการอบอ่อนนาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120°C เป็นเวลา 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter ของ PU ที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มเป็น Polyester และ Polyether แสดงได้ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต จากงานวิจัยของดาราวรรณ ลิ่มถิ่น และคณะ [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ether/MWCNTนาโนคอมพอสิต จากงานวิจัยของดาราวรรณ ลิ่มถิ่น และคณะ [32]

จากการทดลอง PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt โดยมีโครงสร้างส่วนนิ่มต่างกัน (Polyester หรือ Polyether) พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบอ่นสูงขึ้นนาโนคอมพอสิตเกิด Microphase separation มากขึ้นและโครงสร้างส่วนแข็งเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 100°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.17 เนื่องจาก MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ทำให้โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.18 เนื่องจาก MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่มซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการอบอ่อนเพื่อให้เกิดค่านำไฟฟ้าที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อน ที่ทำให้เกิดจุดนำไฟฟ้าใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลกระทบของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต

ตอนที่ 2 ตรวจหาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตหลังผ่านกระบวนการอบอ่อนใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนิ่มที่ต่างกัน คือ PU-ester และ PU-ether

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

1. PU-ester : Desmopan 3695AU ของบริษัท Bayer มีค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 550 kg/cm^2, มอดุลัสที่ 100% เท่ากับ 120 kg/cm^2 และความหนาแน่น เท่ากับ 1.20 g/cm^3

2. PU-ether : Utechllan UE-95AU ของบริษัท Bayer มีค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 450 kg/cm^2, มอดุลัสที่ 100% เท่ากับ 130 kg/cm^2 และความหนาแน่น เท่ากับ 1.14±0.02 g/cm^3

3. MWCNT ของบริษัท Sigma-Aldrich

4. พอลิเมอร์คอมปาวด์สำหรับล้างเครื่องผสมระบบปิด LIOCLEAN-Z Lot NO. Z610050 ของบริษัท Toyo Ink (Thailand)

5. กาวอีพอกซีชนิดนำไฟฟ้า EPO-TEX EE129-4 ของบริษัท Epoxy Technology

6. PELCO Conductive Silver Paint ของบริษัท Ted Pella

7. สายไฟ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 mm ของบริษัท Thai Wonderful Wire Cable

8. โถดูดความชื้น (Desiccator)

9. แผ่นเทฟลอน ของบริษัท Fantastic Triumph

10. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) รุ่น PL 2100 ของบริษัท BrabenderPlasti-Corder

11. เครื่องกดอัด (Compression machine) ของบริษัท Mach Group (1992)

12. ตู้อบสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7610F ของบริษัท JEOL

14. LCR Meter รุ่น E4980A ของบริษัท Agilent

15. Universal Testing Machine รุ่น Model LRK-2kN Lode cell 2 kN ของบริษัท NTS Technology

16. Fourier Transform Raman Spectrometer รุ่น Spectrum GX ของบริษัท Perkin Elmer

17. Differential Scanning Calorimeter รุ่น 204 F1 ของบริษัท Phoenix

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต

เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตระหว่าง PU และ MWCNT โดยใช้การผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่อง Internal mixer ดังรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เตรียมเม็ด PU โดยนำเม็ด PU ทั้ง 2 ชนิด ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

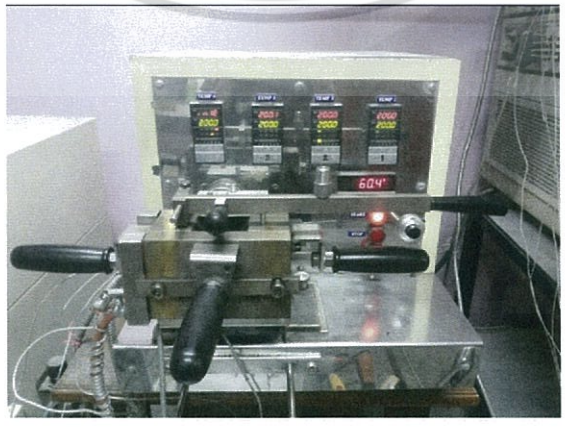
2. เตรียม MWCNT โดยนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3. ชั่ง PU และ MWCNT สูตรละ 50 กรัม โดยใช้ปริมาณของ MWCNT ที่ต่างกันคือ 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5, 2.0 และ 5.0%wt

4. สภาวะที่ใช้ในการเตรียม มีดังนี้

4.1 PU-ester/MWCNT ใช้อุณหภูมิในการผสม 200°C เป็นเวลา 10 นาที และ PU-ether/MWCNT ใช้อุณหภูมิในการผสม 210°C เป็นเวลา 8 นาที

4.2 กำหนดให้ความเร็วในการหมุนสกรูที่ 60 rpm

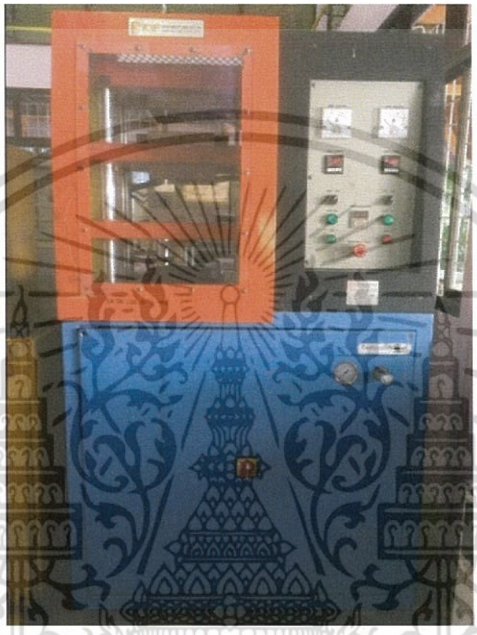


รูปที่ 3.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต

หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตแล้วนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดด้วย Compression machine ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร และมีสภาวะในการขึ้นรูปคืออุณหภูมิในการขึ้นรูป 200°C, เวลาในการ Preheat 16 นาที, เวลาในการขึ้นรูป 8 นาที และเวลาในการหล่อเย็น 8 นาที



รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด

3.3.3 กระบวนการอบอ่อน

กระบวนการอบอ่อนแบ่งกระบวนการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยการศึกษาเวลาในการอบอ่อนที่เหมาะสม ทำให้นาโนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด แล้วจึงนำเวลาการอบอ่อนที่เหมาะสมมาศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการอบอ่อนของนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt

จากงานวิจัยของดาราวรรณ ลิ่มถิ่น และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบอ่อนสำหรับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต คือ อุณหภูมิ 100°C และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต คืออุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6, 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่า PU-ester/MWCNT ใช้อุณหภูมิการอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่อน 100°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ PU-ether/MWCNT ใช้อุณหภูมิการอบอ่อน 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้นาโนคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเวลาในการอบอ่อนที่เหมาะสมที่สุดเพิ่มเติมโดยใช้สภาวะการอบอ่อนดังตารางที่ 3.1

การเรียกชื่อสูตรที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1 เช่น Es-No anneal หมายถึง PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ส่วนนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการอบอ่อนจะเรียกชื่อเป็น Es-2 หมายถึง PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการอบอ่อน

นาโนคอมพอสิต	อุณหภูมิ(°C)	เวลา (hr)					
PU-ester/MWCNT	100	2	4	6	8	10	12
PU-ether/MWCNT	80	8	10	12	14	16	-

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5, 2.0 และ 5.0%wt โดยเลือกเวลาที่เหมาะสมจากจากผลการศึกษาในขั้นตอนที่ 1 มาทำการศึกษาดังนี้ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ใช้อุณหภูมิการอบอ่อน 100°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ส่วน PU-ether/ MWCNT นาโนคอมพอสิต ใช้อุณหภูมิการอบอ่อน 80°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (รายละเอียดผลการศึกษาอยู่ในบทที่ 4)

การเรียกชื่อสูตรที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 เช่น Unfilled-Es หมายถึง PU-ester /MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ไม่เติม MWCNT และ 0.3 (0.5, 0.8, 1.2, 1.5, 2.0, 5.0)-Es หมายถึง PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT 0.3 (0.5, 0.8, 1.2, 1.5, 2.0, 5.0)%wt เป็นต้น โดยนาโนคอมพอสิตทั้งหมดผ่านการอบอ่อน

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิต

3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

Differential Scanning Calorimeter (DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์วัสดุ โดยการวัดอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายออกมา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีและยังสามารถศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนเฟสของวัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาได้ในการวิเคราะห์นั้นจะใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของ Heat Flow ของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เทียบกับสารอ้างอิง โดยสารตัวอย่างและสารอ้างอิงจะถูกให้

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนจากแหล่งพลังงาน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลองเทคนิค DSC สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหา อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature, T_m), กระบวนการตกผลึก (Crystallization process) และความจุความร้อน (Heat capacity) เป็นต้น [33]

ในงานวิจัยนี้ ใช้เทคนิค DSC ในการศึกษาการแยกตัวของวัฏภาคโครงสร้างส่วนแข็งและส่วนนิ่มใน PU นาโนคอมพอสิต ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบคือ PU-ester และPU-ether นาโนคอมพอสิตทุกสูตร ตัดชิ้นงานตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 6-7 มิลลิกรัม กำหนดสภาวะการทดสอบแบบ heat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิทดสอบระหว่าง -70 ถึง 250 °C ด้วยอัตราการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิที่ 10°C/min

3.4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคFT-Raman

Fourier Transform Raman Spectrometer, FT-Raman เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของสาร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยอาศัยหลักการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนกับโมเลกุลของสาร เมื่อโฟตอนผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารจะมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป จากนั้นพลังงานบางส่วนจะถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลแล้วเกิดการกระเจิงออกไป FT-Raman ใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันเช่น หมู่ -OH, -CO, -CC เป็นต้น ตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-Raman เช่น พอลิเมอร์ผงและของเหลว เป็นต้นซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาเลขคลื่น (Wave number) ในช่วง 200-3500 cm^{-1} [34]

3.4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง UTM

Universal testing machine (UTM) เป็นเครื่องทดสอบแรงประเภท Static load test ให้แรงทดสอบคงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ สามารถใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงกระทำของวัสดุทั้งแรงดึง แรงอัดและแรงเฉือน หลักการทำงานของเครื่อง UTM คือให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่และบันทึกค่าแรงดึง (Tension force) ที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัว (Deformation) ของวัสด โดยขณะชิ้นทดสอบยืดออกจะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นงานทดสอบนี้จะมีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมาได้ แรงที่วัดออกมามีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) การทดสอบจะต้องดึงชิ้นทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ซึ่งแรงต้านสูงสุดของชิ้นทดสอบเป็นผลที่ได้จากการวัดแรง ดังนั้นชิ้นงานทดสอบสามารถทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับแรงต้านของชิ้นงานที่ทนได้ก่อนขาดจากกัน [35]

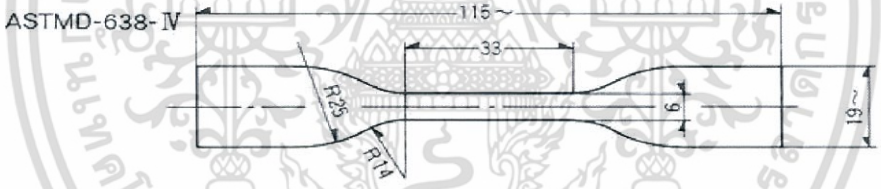
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ตัดแผ่นคอมพอสิตเป็นรูป Dumbbell ตามมาตรฐาน ASTM D638 ดังรูปที่ 3.3 ทำการหาค่าเฉลี่ยของความกว้างและความหนาของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง UTM โดยสภาวะการทดสอบกำหนดให้น้ำหนักทดสอบ (Load cell) ที่ใช้คือ 2 kN และใช้อัตราเร็วในการดึง 500 mm/min ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบแรงดึง โดยวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ได้แก่ มอดุลัสที่ 100% (Young's modulus) หาได้จากสมการที่ 1, ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หาได้จากสมการที่ 2, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) หาได้จากสมการที่ 3 และความเหนียว (Toughness) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strength กับ Strain

$$\text{Young's modulus, E (MPa)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad \text{สมการที่ 1}$$

$$\text{Tensile strength, } \sigma \text{ (MPa)} = \frac{F}{A} \qquad \text{สมการที่ 2}$$

$$\%\ \text{Elongation at break} = \left[\frac{(l - l_0)}{l_0}\right] \times 100 \qquad \text{สมการที่ 3}$$



รูปที่ 3.3 มาตรฐานชิ้นงานทดสอบ ASTM D638 Type IV [36]

3.4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FESEM

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ หลักการทำงานของ FESEM ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนผ่านเลนส์รวมแสง (Condenser lens) จะกลายเป็นลำอิเล็กตรอนจากนั้นจะถูกปรับระยะโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลำอิเล็กตรอนจะถูกกราดลงบนผิวของชิ้นงานทำให้เกิด Secondary electron ขึ้น สัญญาณจาก Secondary electron นี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณภาพบน

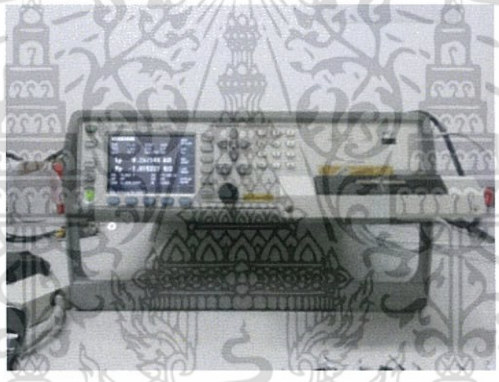
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จอรับภาพและเนื่องจากใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กจึงทำให้ภาพที่ได้มีการแจกแจงรายละเอียดสูง [37,38]

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ FESEM เริ่มจากการตัดชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกลให้มีลักษณะเป็นแท่งกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร จากนั้นตัดแต่งชิ้นงานให้มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากผิวหน้าตัดทำการเคลือบชิ้นงานด้วย Platinum แล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้แสง 5 kv ที่กำลังขยาย x5000, x10000 และ x20000 เท่า

3.4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter

LCR meter เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์วัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า Resistance (R), วัดค่าความจุไฟฟ้า Capacitance (C) และวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า Inductance (L) ของวัสดุ [39]



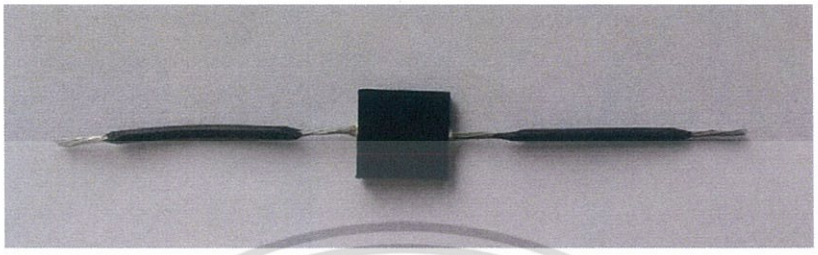
รูปที่ 3.4 เครื่อง LCR meter

ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง LCR meter (ดังรูปที่ 3.4) ในการวัดค่าความต้านทานที่ความถี่ 20-1x10^{6} Hz ที่ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ โดยกำหนดฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบคือ $L_p - R_p$ และความต่างศักย์ 10 V การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบทางไฟฟ้า ทำได้โดยการตัดชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตขึ้นรูปที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ให้มีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร และยาว 10 มิลลิเมตรนำชิ้นงานที่ได้มาต่อกับสายไฟด้วยกาวอีพอกซีชนิดนำไฟฟ้าดังรูปที่ 3.5 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อบ่มกาว (Curing) จากนั้นทา Silver paint ที่บริเวณพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ต่อกับสายไฟให้ทั่ว เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จแล้ว นำชิ้นงานตัวอย่างไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วย LCR meter นำค่าความต้านทานที่ได้มาแปลงเป็นค่า Volume resistivity ด้วยสมการที่ 4 จากนั้นแปลงเป็นค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ด้วยสมการที่ 5แล้วนำค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Volume resistivity } (\Omega\text{cm}) = \frac{\text{resistance x cross section area}}{\text{length}} \qquad \text{สมการที่ 4}$$

$$\text{Conductivity } (\text{S/cm}) = \frac{1}{\text{volume resistivity}} \qquad \text{สมการที่ 5}$$



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

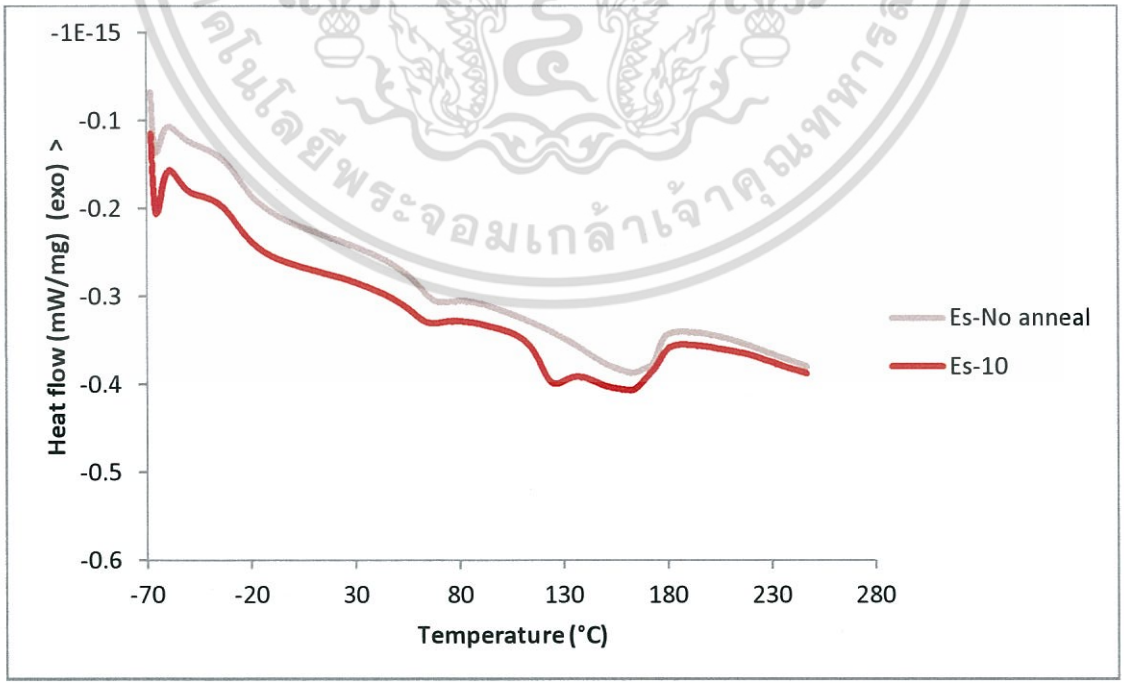
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อน

4.1.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

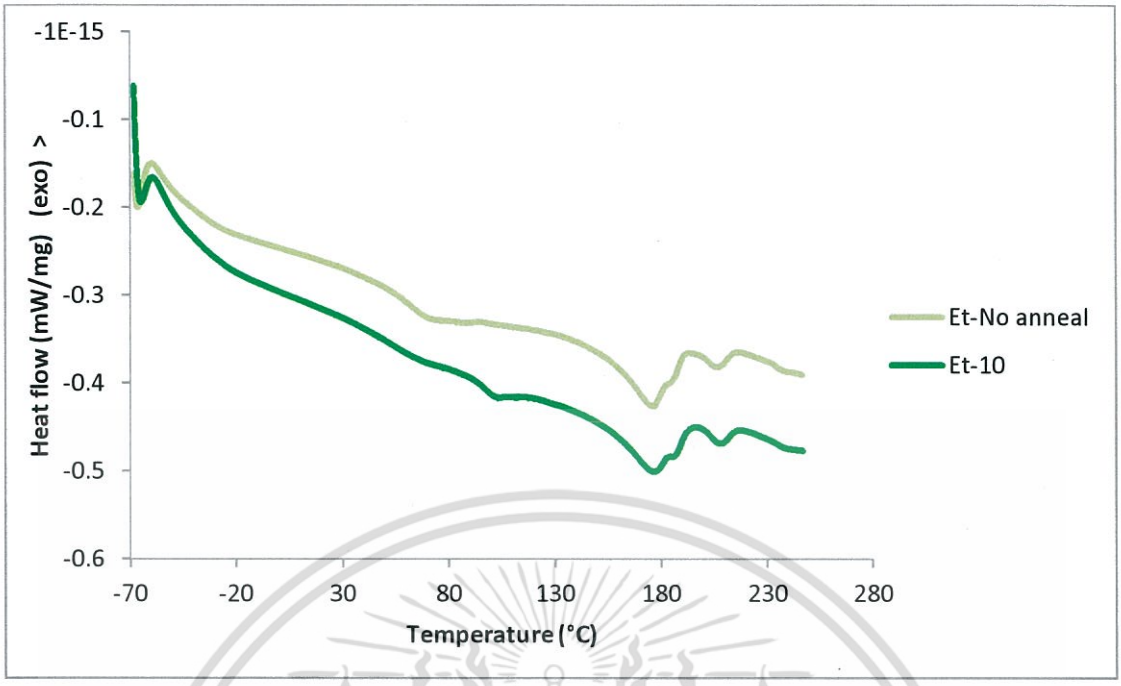
พอลิยูริเทนเป็นบล็อคโคพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ โครงสร้างส่วนนิ่ม และโครงสร้างส่วนแข็ง นอกจากนั้นอาจพบบริเวณที่โครงสร้างทั้งสองส่วนผสมกันอยู่ (Mixing phase) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC แบบ Heat ทำให้พบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนต่างๆได้ดังนี้ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่ม ($T_{g(SS)}$), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนแข็ง ($T_{g(HS)}$), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งที่ผสมกัน ($T_{g(MP)}$), อุณหภูมิในการหลอมเหลวหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอุณหภูมิที่เกิด Microphase mixing (T_{MMT})

ในการทดสอบภายใต้สภาวะการให้ความร้อนจะสามารถพบค่า $T_{g(SS)}$, $T_{g(HS)}$, $T_{g(MP)}$ และ T_{MMT} รวมถึงที่ใช้ในการหลอมให้โครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็งผสมกัน ($\Delta H_{(MMT)}$) ลักษณะกราฟ DSC ของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.1 กราฟ DSC (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต และ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่เวลาในการอบอ่อนต่างกัน โดยใช้ปริมาณ MWCNT เท่ากันคือ 0.5%wt แสดงผลในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต

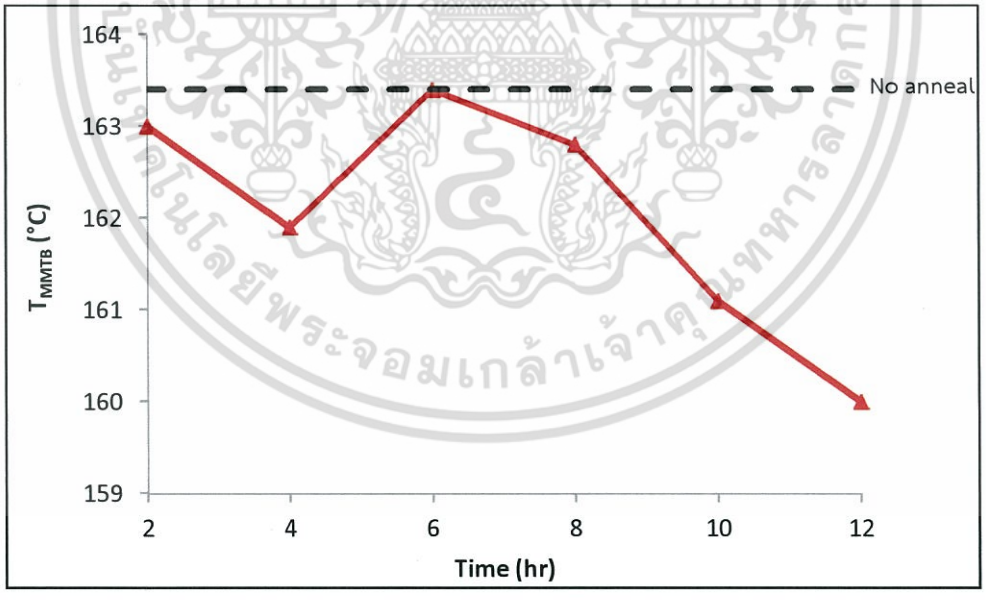
สูตร	$T_{g(SS)}$ (°C)	$T_{g(MP)}$ (°C)	T_{MMT} (°C)		$\Delta H_{(MMT)}$ (J/g)
			A	B	
Es-No anneal	-24.6	62.7	-	163.4	15.21
Es-2	-24.5	57.2	125.3	163.0	20.07
Es-4	-24.9	60.1	124.5	161.9	19.83
Es-6	-24.4	56.7	127.8	163.4	20.48
Es-8	-26.3	61.2	125.5	162.8	17.97
Es-10	-25.3	56.5	126.3	161.1	19.56
Es-12	-26.4	53.9	126.4	160.0	18.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

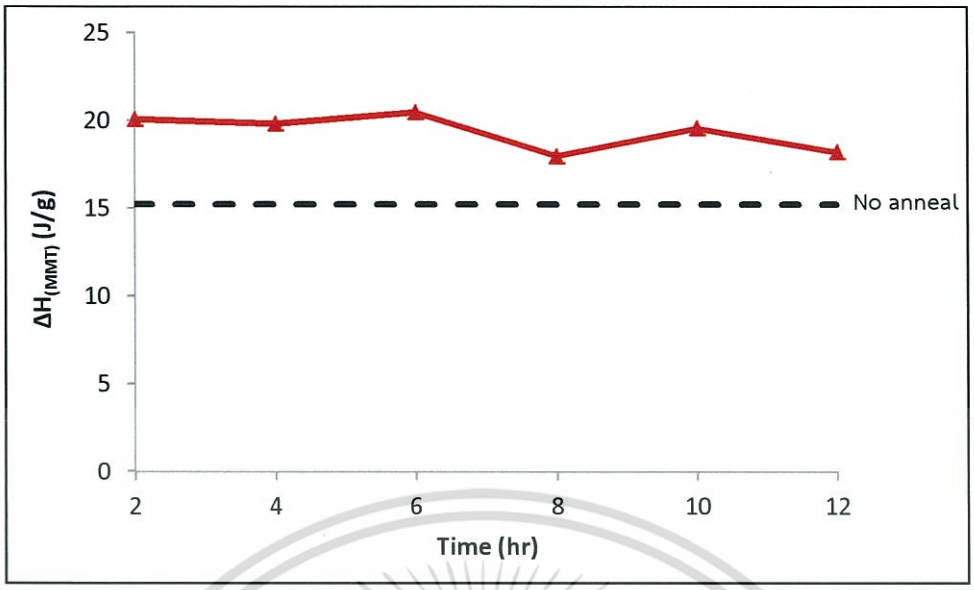
สูตร	$T_{g(MP)}$ (°C)	$T_{g(HS)}$ (°C)	T_{MMT} (°C)			$\Delta H_{(MMT)}$ (J/g)
			T_{MMT1} (°C)		T_{MMT2} (°C)	
			A	B		
Et-No anneal	61.4	-	176.1	-	206.6	10.99
Et-8	58.7	102.9	176.6	187.3	206.8	12.48
Et-10	52.8	98.4	176.5	-	208.3	11.01
Et-12	58.3	101.2	177.3	-	208.2	11.19
Et-14	53.5	99.3	175.1	-	204.1	12.68
Et-16	62.7	99.8	176.4	-	207.1	11.56

นำค่า T_{MMTB} และ $\Delta H_{(MMT)}$ ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.2 และนำค่า $T_{g(HS)}$ ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.3



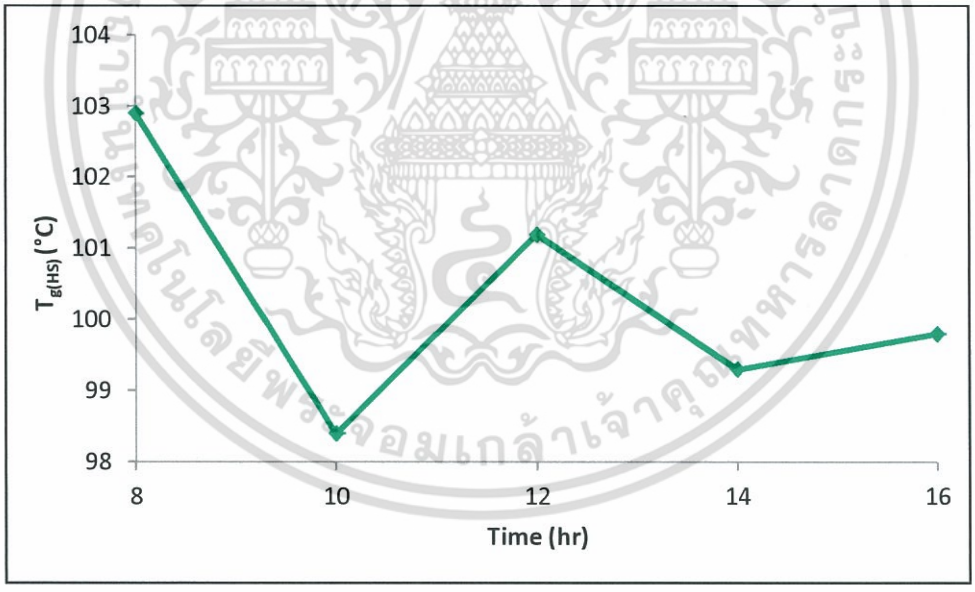
(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.2 กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) T_{MMTB} และ (b) $\Delta H_{(MMT)}$



รูปที่ 4.3 กราฟ DSC แสดงค่า $T_{g(HS)}$ ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยทั่วไปจะมีอสัณฐานของโครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งของ PU ผสมอยู่ด้วยกันแต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งไม่ได้ผสมกันทั้งหมด ยังคงมีโครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งบางส่วนที่แยกออกจากกันเมื่อทำการอบอ่อนในช่วงเวลาที่แตกต่างกันจะเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Microphase separation ทำให้โครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งเกิดการแยกตัวออกจากกัน ทำให้พบค่า $T_{g(SS)}$ ที่ต่ำลงและค่า $T_{g(MP)}$ มีค่าลดลงประมาณ 9°C แสดงถึงโครงสร้างส่วนแข็งที่แยกตัวออกมาด้วยนอกจากนี้เมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100°C ยังพบค่า T_{MMT} ที่มีการแยกออกเป็น 2พีค คือ T_{MMTA} ที่ประมาณ 126°C และ T_{MMTB} ที่ประมาณ 162°C เมื่อพิจารณากราฟ T_{MMTB} ดังรูปที่ 4.2 (a) พบว่าเมื่อเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นค่า T_{MMTB} มีแนวโน้มลดลง แสดงว่า MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester จึงส่งผลให้โครงสร้างส่วนแข็งมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่มีความเป็นระเบียบลดลง เนื่องจากพบพีคที่แยกออกมาเกิดที่อุณหภูมิที่ต่ำลงและเมื่อพิจารณากราฟ $\Delta H_{(MMT)}$ ดังรูปที่ 4.2 (b) พบว่าเมื่อทำการอบอ่อน $\Delta H_{(MMT)}$ มีค่าสูงขึ้นกว่าไม่ได้ผ่านการอบอ่อน อาจเป็นไปได้ว่า MWCNT ที่กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ทำให้ต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้เกิดการหลอมโครงสร้างส่วนแข็งและส่วนนิ่มให้เข้ากันได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต จะทำให้เกิด Microphase separation มากขึ้นและ MWCNT ที่กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งจะทำให้โครงสร้างส่วนแข็งเกิดผลึกที่มีความเป็นระเบียบลดลง

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์กราฟ DSC ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตพบว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนมีค่า $T_{g(MP)}$ ที่ 61.4°C และพบ T_{MMT2} บริเวณคือ T_{MMT1} ที่ 176.1°Cและ T_{MMT2} ที่ 206.6°C เมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 80°C พบค่า $T_{g(HS)}$ แสดงว่าการอบอ่อนเหนี่ยวนำให้เกิด Microphase separation ขึ้นและเมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อนมากขึ้น พบค่า $T_{g(HS)}$ ลดลง ดังรูปที่ 4.3 แต่มีค่า $\Delta H_{(MMT)}$ ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการอบอ่อนทำให้โครงสร้างส่วนแข็งที่แยกออกมาเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกมากขึ้น ส่วนค่า T_{MMT1} และ T_{MMT2} ไม่เปลี่ยนแปลง จึงสันนิษฐานว่า MWCNT จะกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่มจึงไม่ส่งผลต่อความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกนั่นเอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาการอบอ่อนPU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต จะทำให้เกิด Microphase separationมากขึ้น ความเป็นผลึกในโครงสร้างส่วนแข็งเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจาก MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่ม จึงทำให้เวลาในการอบอ่อนมีผลกระทบต่อความเป็นผลึกน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง

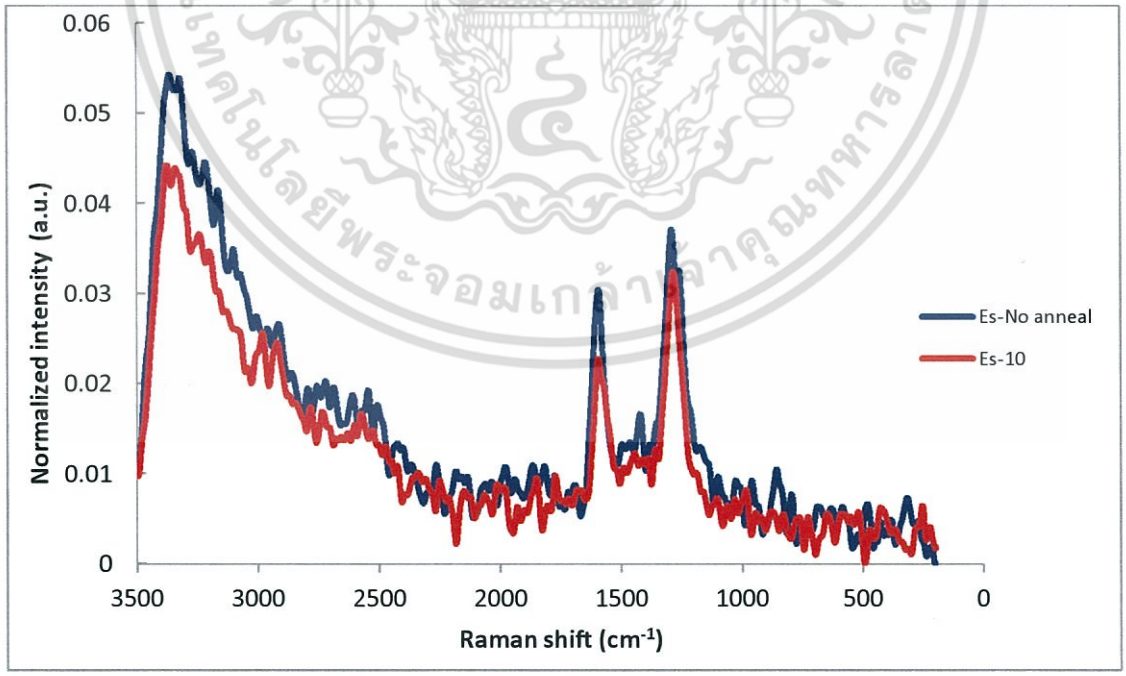
4.1.2ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิคFT-Raman

การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต จากรูปที่ 4.4 คือ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต และรูปที่ 4.5 คือ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ปรากฏพีคเด่นชัดของ MWCNT2 พีค ได้แก่ D-band ที่ประมาณ 1,300 cm^{-1} บ่งบอกถึงส่วนที่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

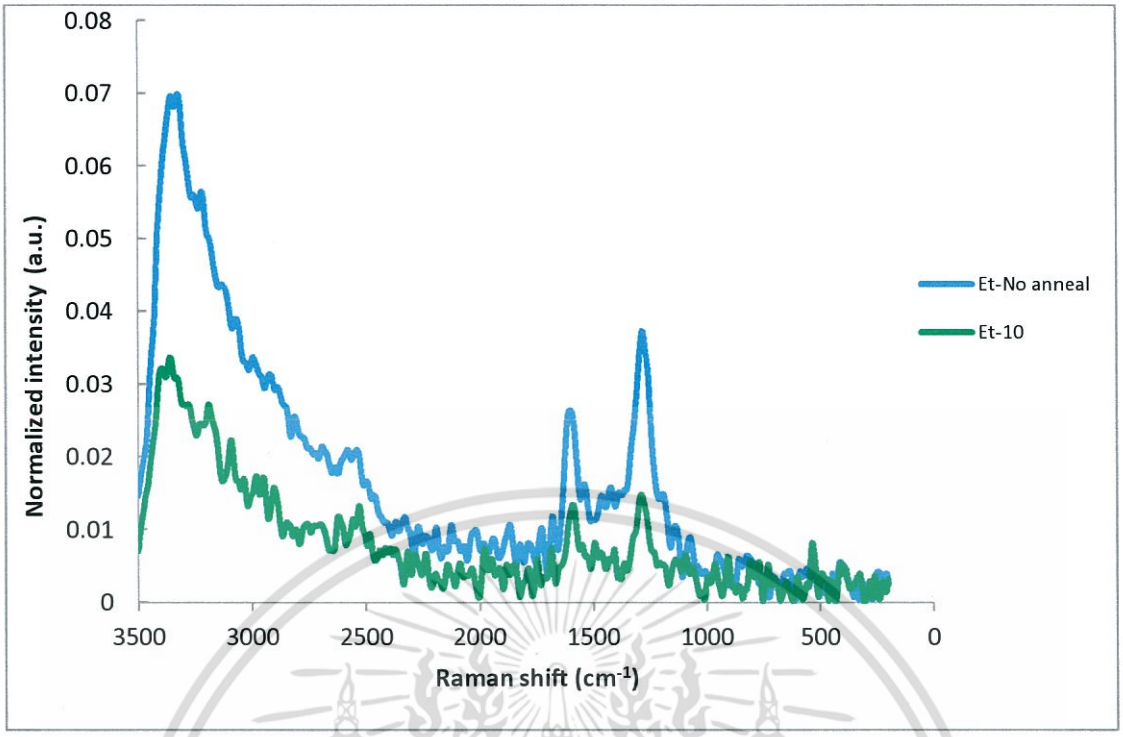
เป็นระเบียบที่ปรากฏในโครงสร้างของ MWCNT และ G-bandที่ประมาณ 1,600 cm^{-1} บ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของโครงสร้าง MWCNT

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 สรุปค่าเลขคลื่น (Wave number) และความเข้มข้น (Intensity) ได้ดังตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบพีคของ D-band และ G-band ของ MWCNT จากงานวิจัยของคุณระวิจี หมั่นเรียนและคณะ [40] กับ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อน พบว่ามีการเลื่อนตำแหน่งเกิดขึ้นทั้ง PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตแสดงว่า MWCNT มีความเข้ากันได้กับ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต และภายหลังจากการอบอ่อนพบพีคของ D-band มีการเลื่อนตำแหน่งต่ำลง 6 cm^{-1} (จาก 1292 cm^{-1} เป็น 1286 cm^{-1}) และพบพีคของ G-band มีการเลื่อนตำแหน่งสูงขึ้น 1 cm^{-1} (จาก 1595 cm^{-1} เป็น 1596 cm^{-1}) ส่วน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ภายหลังจากการอบอ่อนพบพีคของ D-band มีการเลื่อนตำแหน่งสูงขึ้น 7 cm^{-1} (จาก 1284 cm^{-1}เป็น 1291 cm^{-1}) และพบพีคของ G-band มีการเลื่อนตำแหน่งต่ำลง 11 cm^{-1} (จาก 1602 cm^{-1} เป็น 1591 cm^{-1}) ชี้ให้เห็นว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการอบอ่อนมีการเลื่อนตำแหน่งเลขคลื่นของพีคมากกว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต แสดงว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต สามารถทำปฏิกิริยากับ MWCNT ได้ดีกว่าภายหลังจากการอบอ่อนเนื่องจากความเข้ากันได้ของ PU-ether กับ MWCNT ที่มีมากกว่าจึงทำให้มีผลต่อสมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิตด้วยซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.4 FT-Raman spectra ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการ Normalized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 FT-Raman spectra ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการ Normalized

ตารางที่ 4.3 ค่าD-band และ G-band ของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านและไม่ผ่านการอบอ่อน

ชนิดของสาร	D-band (cm^{-1})	I_D (a.u.)	G-band (cm^{-1})	I_G (a.u.)
MWCNT*	1277	0.730	1591	0.500
Es-No anneal	1292	0.037	1595	0.030
Es-10	1286	0.032	1596	0.022
Et-No anneal	1284	0.037	1602	0.026
Et-10	1291	0.014	1591	0.013

* หมายเหตุ ผลการทดสอบจากงานวิจัยของคุณระวิจี หมั่นเรียนและคณะ [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง UTM

ในงานวิจัยนี้ใช้ UTM เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุนาโนคอมพอสิต ซึ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่เวลาการอบอ่อนแตกต่างกัน

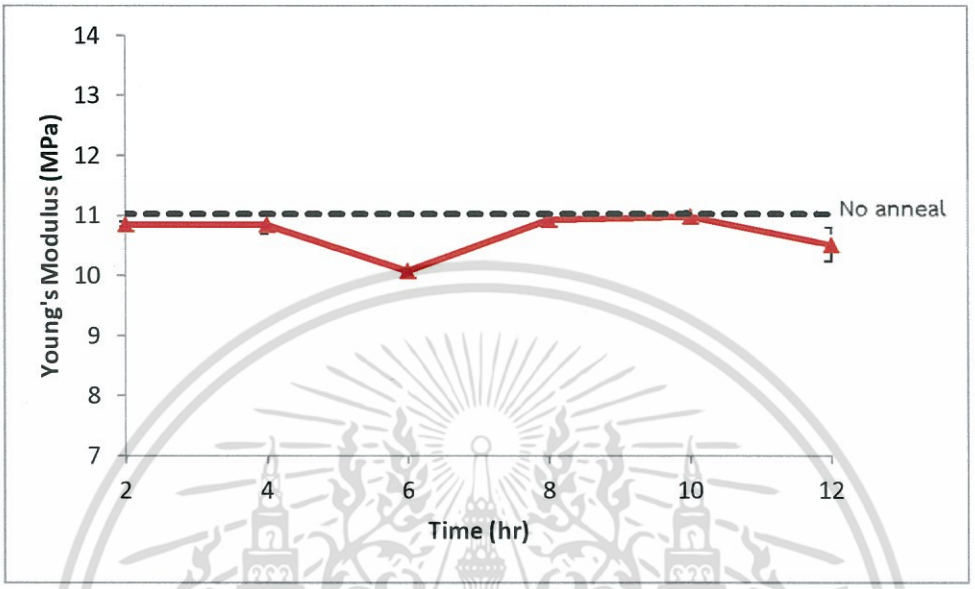
สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Toughness (J)
Es-No anneal	11.02±0.11	41.0±3.0	884.7±9.5	70.0±0.0
Es-2	10.86±0.05	41.8±1.2	922.7±40.8	76.7±5.8
Es-4	10.85±0.15	43.4±2.4	917.7±50.6	70.0±10.0
Es-6	10.08±0.05	41.9±0.8	958.9±21.3	73.3±5.8
Es-8	10.93±0.05	39.2±3.4	846.5±64.3	63.3±11.6
Es-10	10.98±0.09	43.3±1.3	918.2±52.7	73.3±5.8
Es-12	10.52±0.28	42.5±1.8	921.8±27.3	70.0±0.0

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่เวลาการอบอ่อนแตกต่างกัน

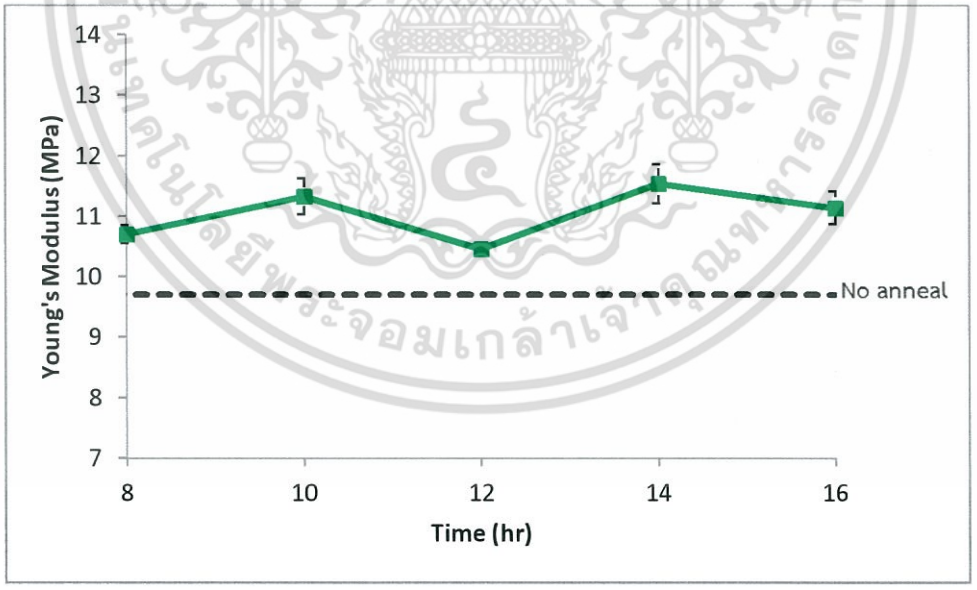
สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Toughness (J)
Et-No anneal	9.71±0.18	29.0±1.0	878.4±19.0	60.0±0.0
Et-8	10.70±0.15	32.7±2.1	860.8±57.5	56.7±5.8
Et-10	11.33±0.29	30.6±2.1	793.7±55.3	56.7±5.8
Et-12	10.46±0.04	32.9±0.6	849.8±12.2	53.3±5.8
Et-14	11.53±0.32	31.7±1.8	809.7±24.0	60.0±0.0
Et-16	11.14±0.27	32.7±2.7	894.4±7.0	70.0±0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า Young's Modulus และความแข็งแรงดึงของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



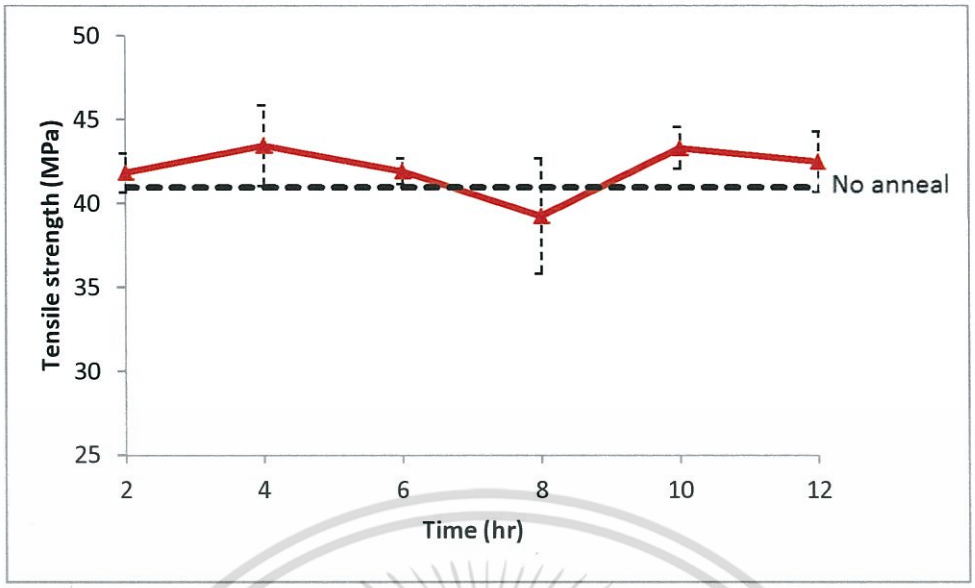
(a)



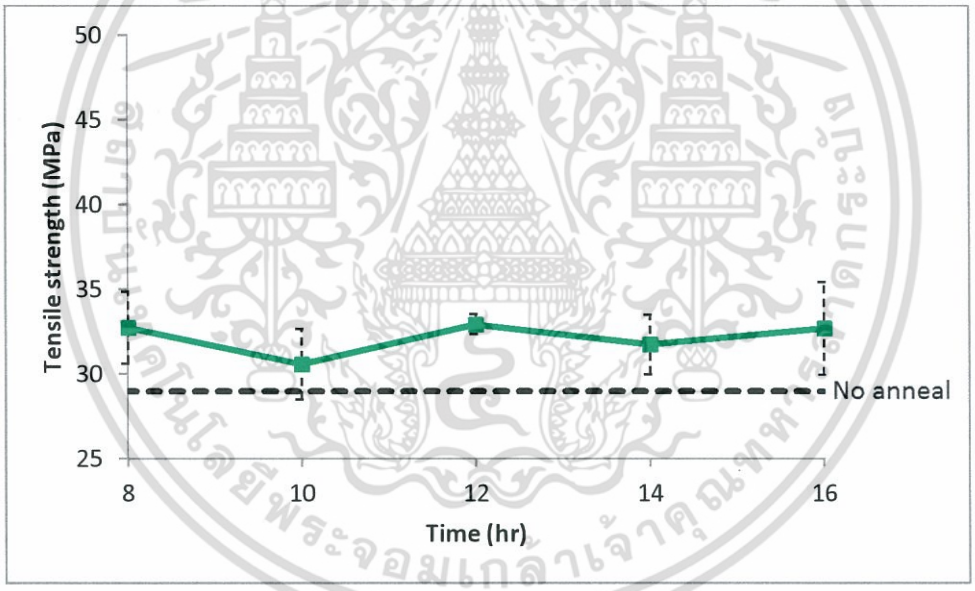
(b)

รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



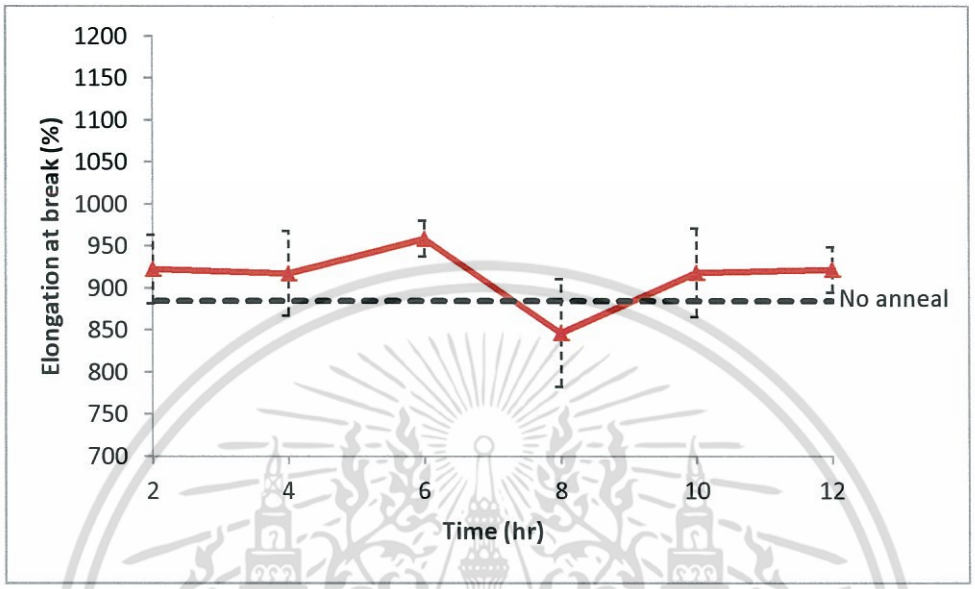
(b)

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

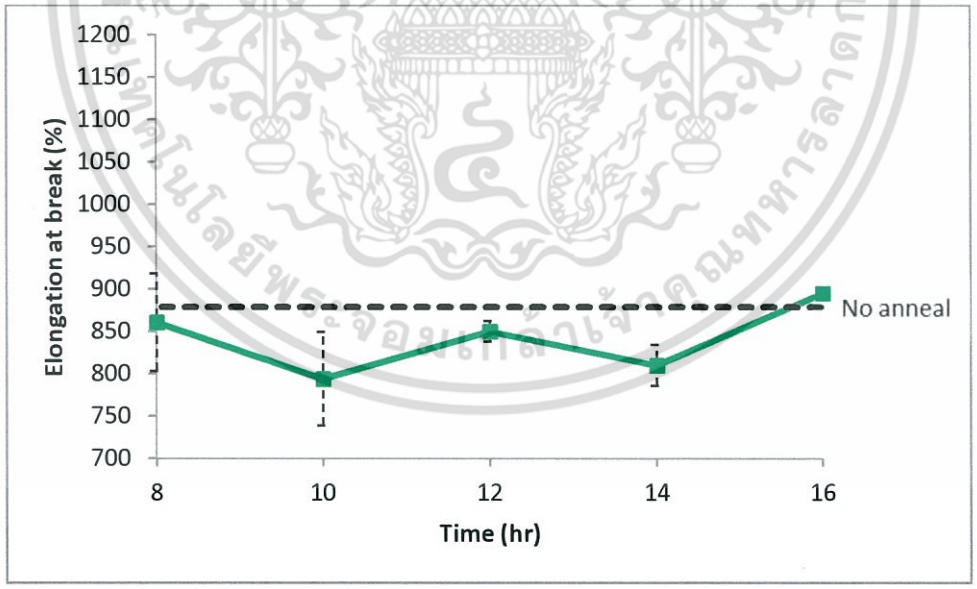
จากรูปที่ 4.6 (b) และรูปที่ 4.7 (b) พบว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตภายหลังจากการอบอ่อนค่า Young's modulus และความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต จากรูปที่ 4.6 (a) และรูปที่ 4.7 (a) ค่า Young's modulus และความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มคงที่ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ FT-Raman คือ MWCNT มีความเข้ากันกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PU-ether ได้ดีกว่า PU-ester จึงส่งผลให้ค่า Young's modulus และความแข็งแรงดึงที่การอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพิ่มขึ้น 117% และ 106% ตามลำดับ ในขณะที่ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีค่า Young's modulus และความแข็งแรงดึงคงที่



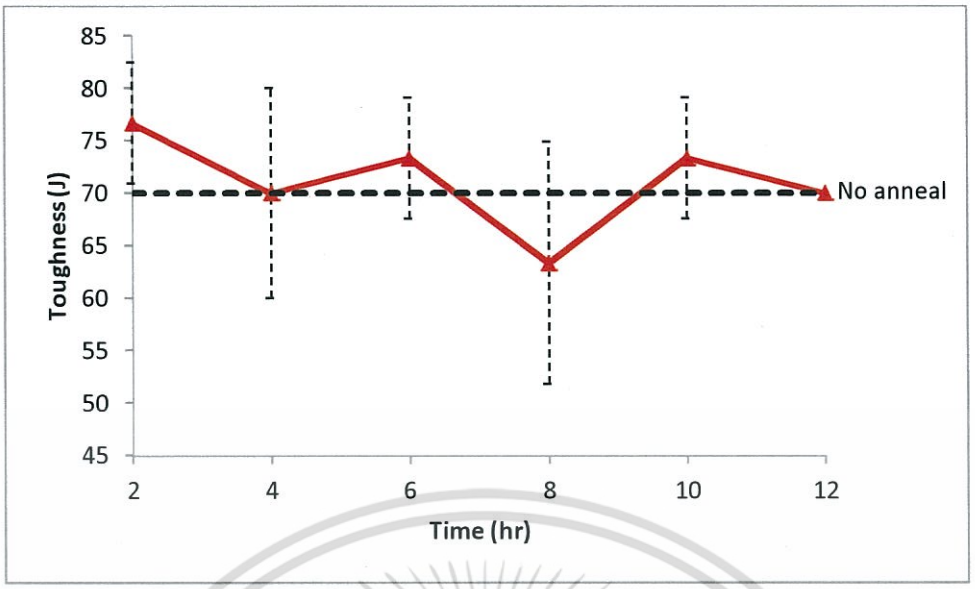
(a)



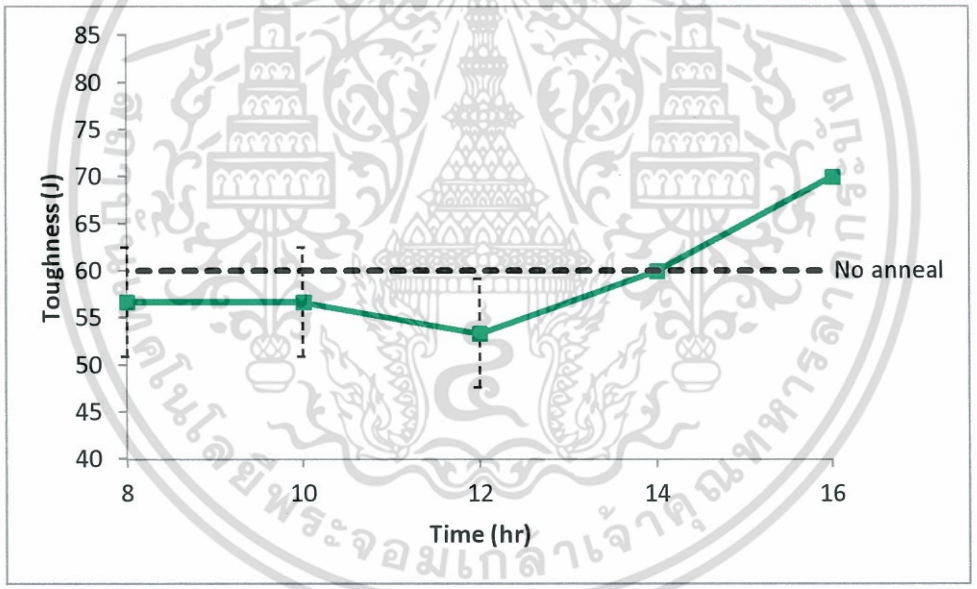
(b)

รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับเวลาในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Toughness กับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

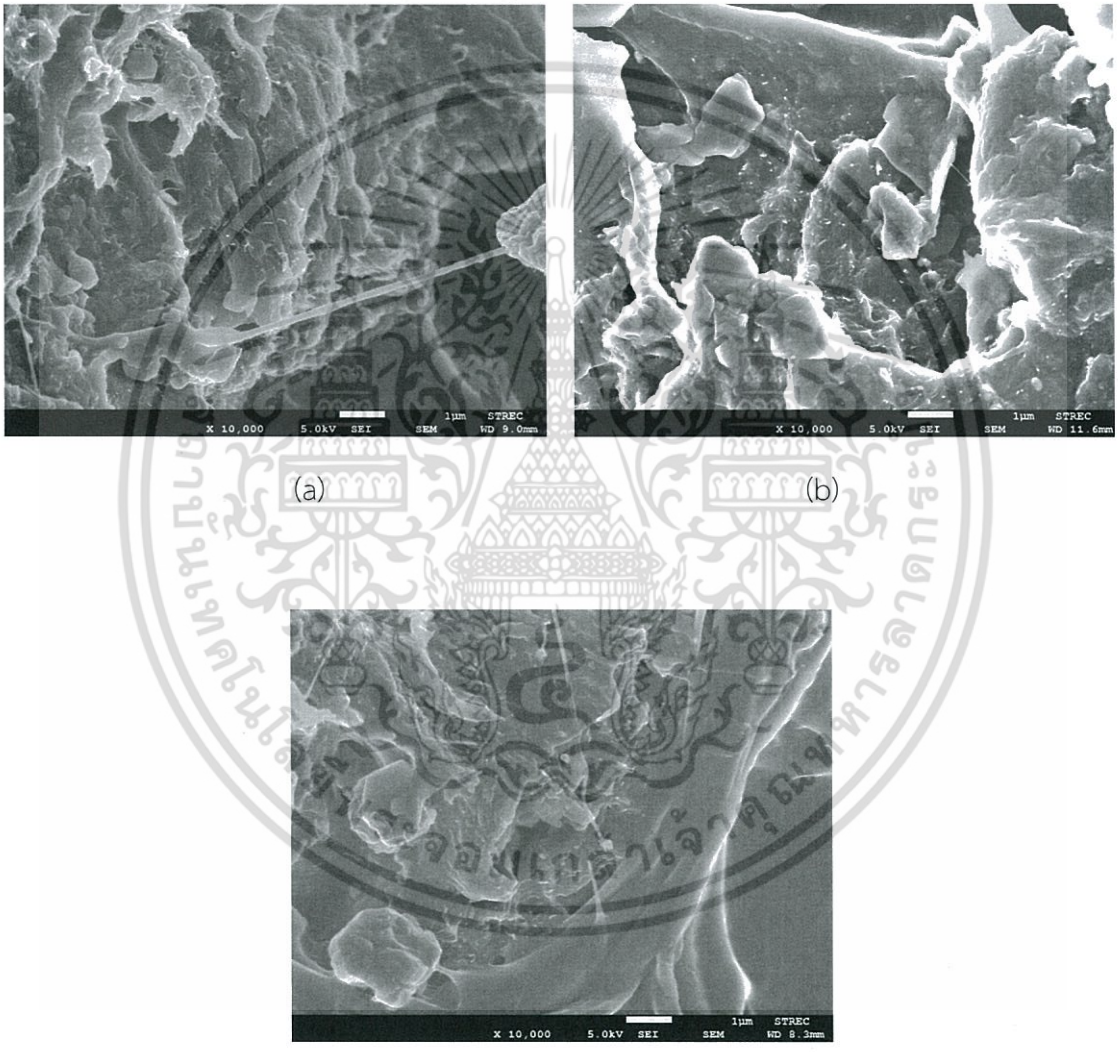
จากรูปที่ 4.8 (a), (b) และรูปที่ 4.9 (a), (b) พบว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ภายหลังจากการอบอ่อนค่า %Elongation at break และ Toughness มีแนวโน้มลดต่ำลงเนื่องจาก MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่มจึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้างส่วนนิ่ม ส่งผลต่อสมบัติความยืดหยุ่นของ PU ส่วน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งจึงไม่ได้ส่งผลต่อค่า %Elongation at break และ Toughness

4.1.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FESEM

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค FESEM เพื่อศึกษากระจายตัวของอนุภาค MWCNT ในวัสดุนาโนคอมพอสิตโดยบริเวณที่เป็นจุดสว่างคือ MWCNT ซึ่งผลที่ได้มีดังต่อไปนี้



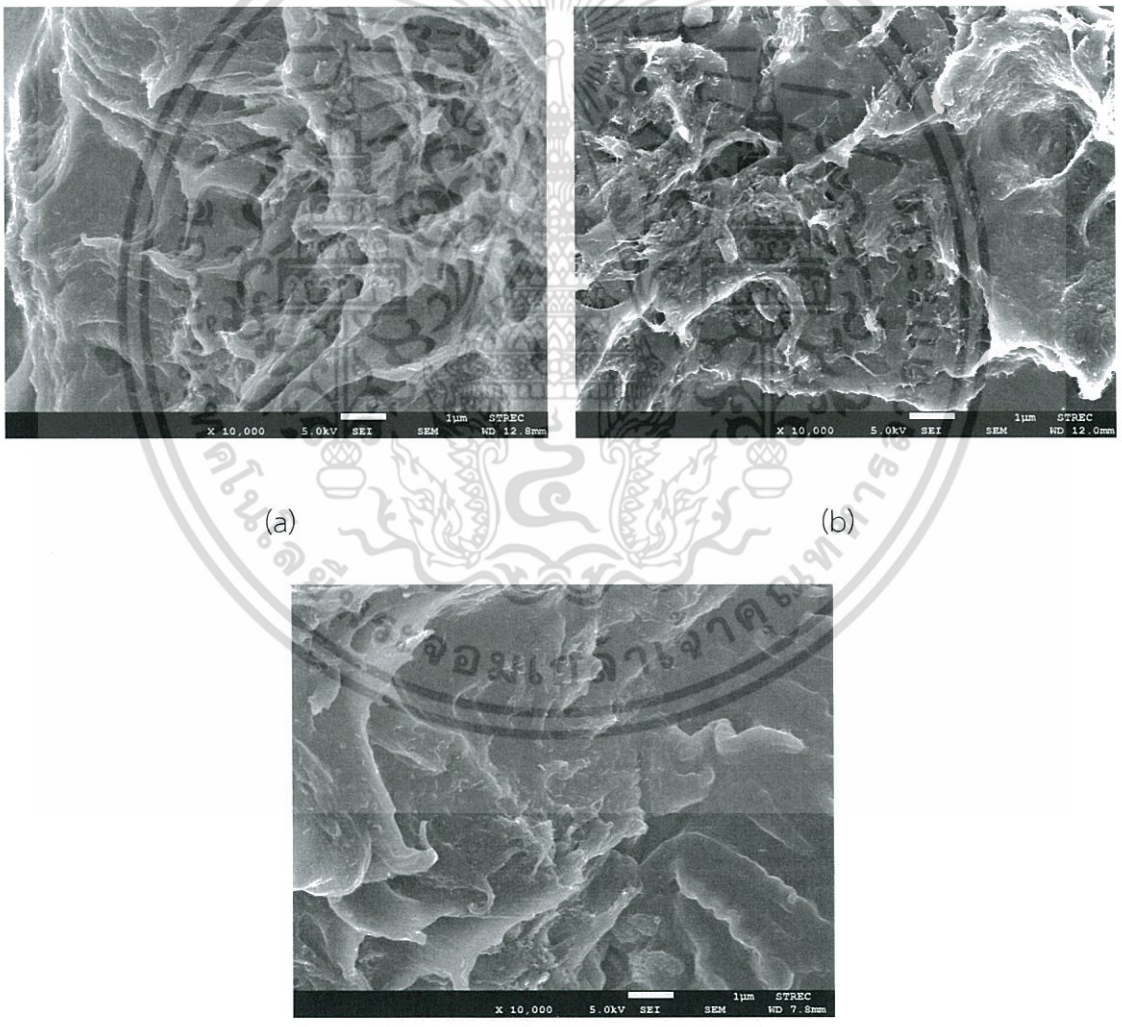
(a) (b)

(c)

รูปที่ 4.10 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt (a) Es-No anneal (b) Es-10 และ (c) Es-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT ในชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตแสดงให้เห็นว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการอบอ่อนแม้จะมีการเกิด Microphase separation ขึ้นแต่ MWCNT ยังมีการกระจายตัวดีไม่กลับมาเกาะกลุ่มกัน (Agglomerate) โดยในรูปที่ 4.10 (a) คือ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ MWCNT 0.5%wt และไม่ผ่านการอบอ่อนสังเกตเห็นว่า MWCNT มีการกระจายตัวได้ดีและจากรูปที่ 4.10 (b) และ (c) คือ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt และผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100°C แต่เวลาในการอบอ่อนแตกต่างกันคือ 10 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมงตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าที่เวลาการอบอ่อนสูงที่สุด MWCNT ก็ยังคงสามารถกระจายตัวได้ดีในวัสดุนาโนคอมพอสิตสังเกตจากการเห็นท่อของ MWCNT ที่กระจายตัวอยู่ได้อย่างชัดเจน



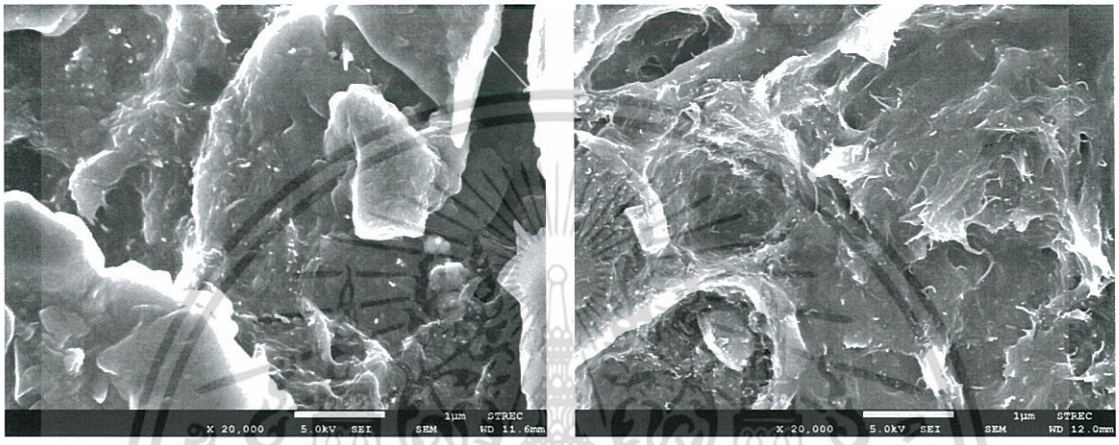
(a) (b)

(c)

รูปที่ 4.11 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt (a) Et-No anneal (b) Et-10 และ (c) Et-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT ในชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตแสดงให้เห็นว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการอบอ่อน MWCNT มีการกระจายตัวดีไม่กลับมาเกาะกลุ่มกันเช่นเดียวกับที่พบใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต คือแม้จะมีการเกิด Microphase separation แต่ MWCNT ก็ยังมีการกระจายตัวได้ดีในนาโนคอมพอสิตแม้จะผ่านการอบอ่อนถึง 16 ชั่วโมงก็ตาม



(a) (b)

รูปที่ 4.12 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x20000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง (a) 0.5-Es และ (b) 0.5-Et

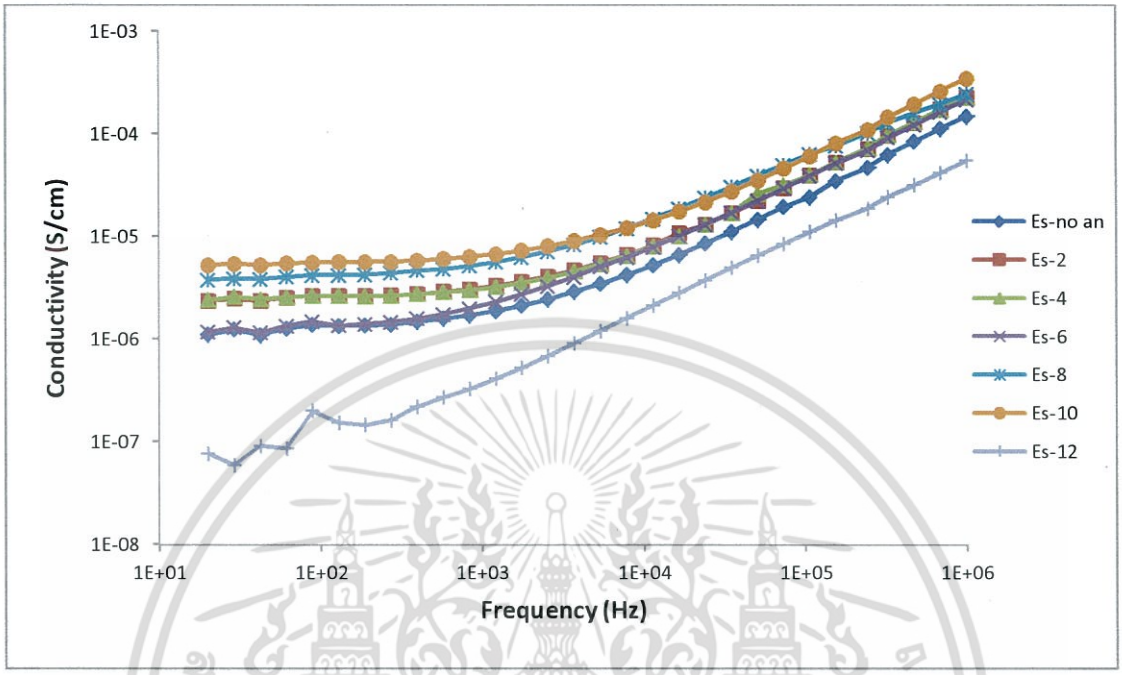
จากผลการศึกษา FT-Raman ทำให้ทราบว่า PU-ether มีความเข้ากันได้กับ MWCNT มากกว่า PU-ester ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 (a) พบว่าที่บริเวณพื้นผิวที่ขาดจากแรงดึง PU-ester มีส่วนที่ห่อหุ้ม MWCNT ได้น้อยกว่า PU-ether จากรูปที่ 4.12 (b) ทำให้สังเกตเห็นท่อ MWCNT ยื่นออกมากได้อย่างชัดเจน

4.1.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter

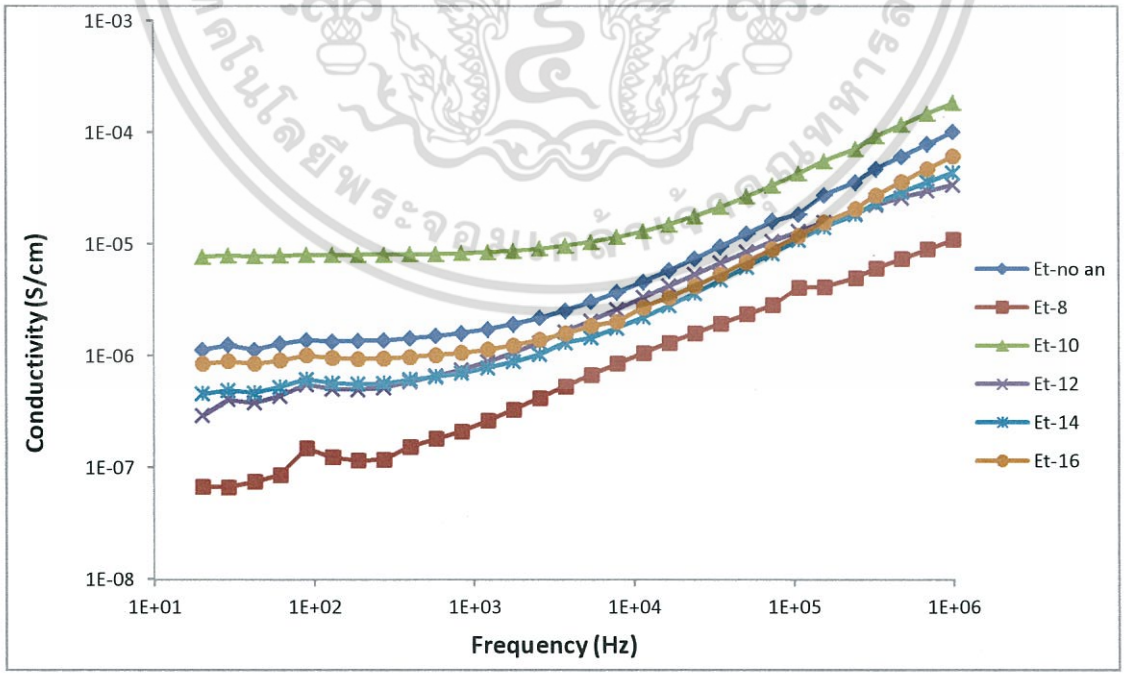
จากการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยหาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่ 20-1x10^6 Hz เมื่อนำไปแปลงเป็นค่าการนำไฟฟ้าและสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ในสภาวะการอบอ่อนที่เวลาการอบอ่อนแตกต่างกัน โดยค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.5%wt ทั้ง PU-ester/MWCNT ใช้เวลาในการอบอ่อน 2, 4, 6, 8, 10 และ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง ส่วน PU-ether/MWCNT ใช้เวลาในการอบอ่อน 8, 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เวลาในการอบอ่อนต่างกัน



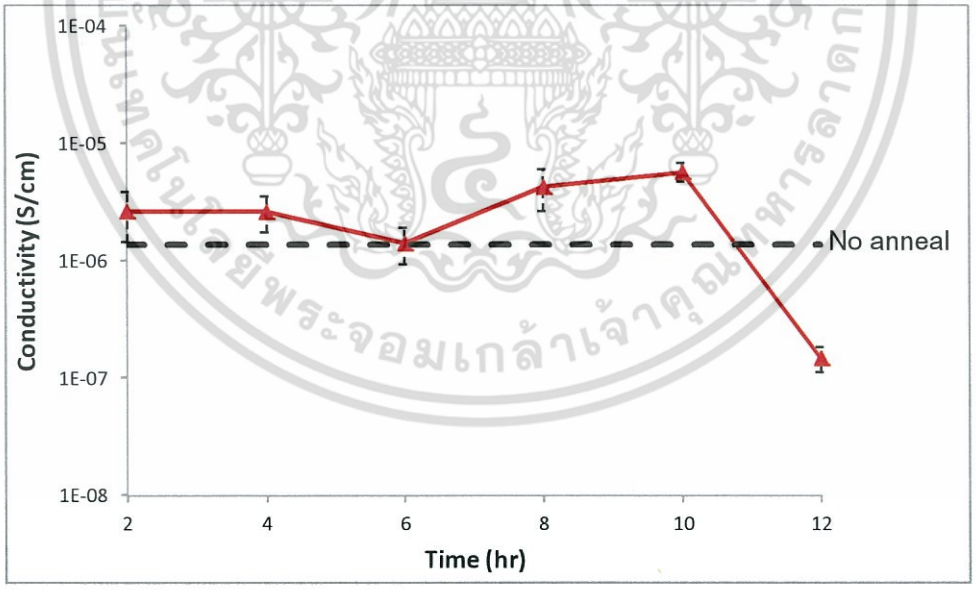
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เวลาในการอบอ่อนต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 พบว่าที่ความถี่ 20 ถึง 129 Hz นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนและผ่านการอบอ่อนที่เวลา 6 และ 12 ชั่วโมง มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเริ่มคงที่ที่ความถี่ 129 ถึง 272 Hz และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ส่วนที่เวลาการอบอ่อนที่ 2, 4, 8 และ 10 ชั่วโมง มีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ที่ช่วงความถี่ 20 ถึง 272 Hz และค่าการนำไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

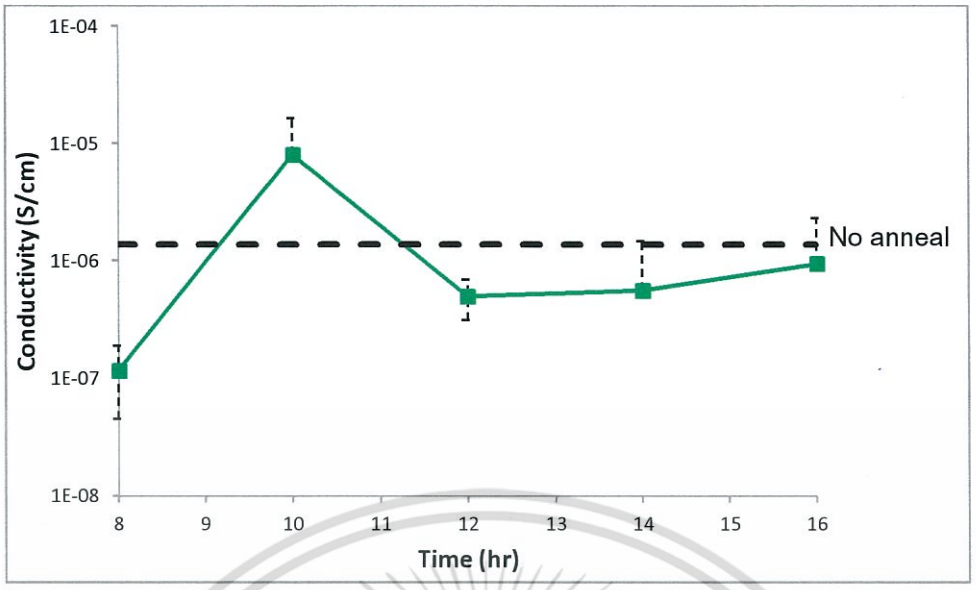
จากรูปที่ 4.14 พบว่าที่ความถี่ 20 ถึง 272 Hz นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ส่วนที่เวลาการอบอ่อนที่ 12 และ 14 ชั่วโมง มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ที่ช่วงความถี่ 20 ถึง 89 Hz และเริ่มคงที่ที่ช่วงความถี่ 89 ถึง 272 Hz หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นและนาโนคอมพอสิตที่ไม่ผ่านการอบอ่อนและที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 10 และ 16 ชั่วโมง มีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ที่ความถี่ 80 ถึง 396 Hz และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าที่ช่วงความถี่ประมาณ 129 ถึง 200 Hz นาโนคอมพอสิตที่สภาวะการอบอ่อนต่างๆ มีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นจึงกำหนดค่าความถี่ที่ 188 Hz มาใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อน ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อนของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

ค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100°C จะทำให้ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อนเป็น 10 ชั่วโมง มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 5.69×10^{-6} S/cm จากผล DSC เมื่อเวลาในการอบอ่อนมากขึ้นทำให้เกิด Microphase separation มากขึ้นและมีความเป็นผลึกในโครงสร้างส่วนแข็งเพิ่มขึ้น โดย MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าค่าการนำไฟฟ้าลดลงเป็น 1.47×10^{-7} S/cm เนื่องจากผลึกที่เกิดมากทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง

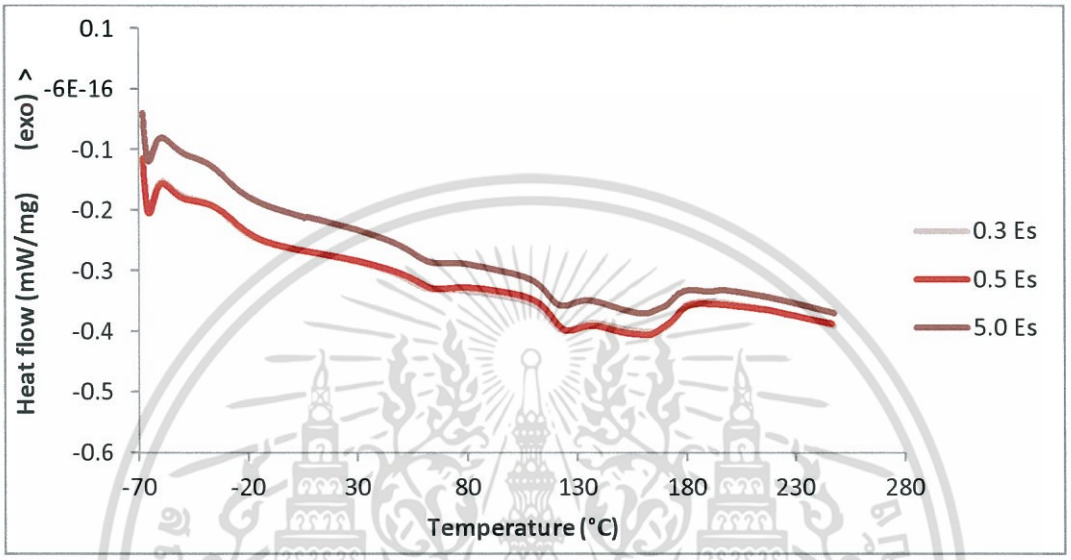
ค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อทำการอบอ่อน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ 80°C จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปโดยเมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อนเป็น 10 ชั่วโมง จะพบค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 8.08×10^{-6} S/cm และเมื่อพิจารณาผลจาก DSC พบว่าเมื่อทำการอบอ่อนนาโนคอมพอสิตจะทำให้เกิด Microphase separation และมีความเป็นผลึกสูงขึ้น เนื่องจากค่า $\Delta H_{(MMT)}$ สูงขึ้น ดังนั้นผลึกที่เกิดมากเมื่อใช้เวลาในการอบอ่อนสูงที่สุดคือ 16 ชั่วโมง จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง จึงสามารถสรุปได้ว่า เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อน PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต คือ 10 ชั่วโมง จึงใช้เวลานี้ในการศึกษาจุดนำไฟฟ้าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

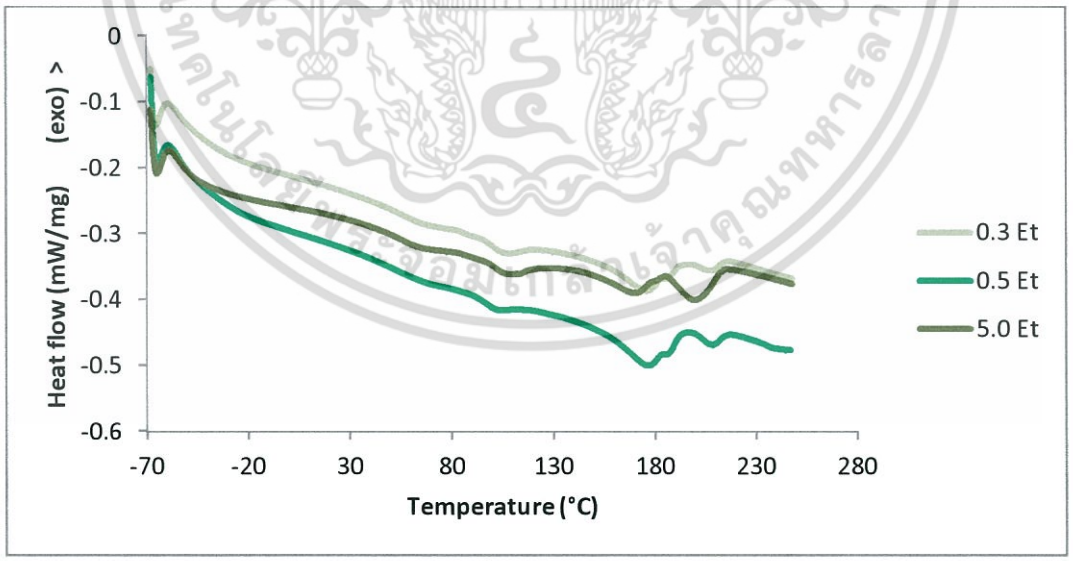
4.2 ผลการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต

4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ลักษณะกราฟ DSC ของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.17



(a)



(b)

รูปที่ 4.17 กราฟ DSC (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต และ (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ MWCT ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT แตกต่างกัน

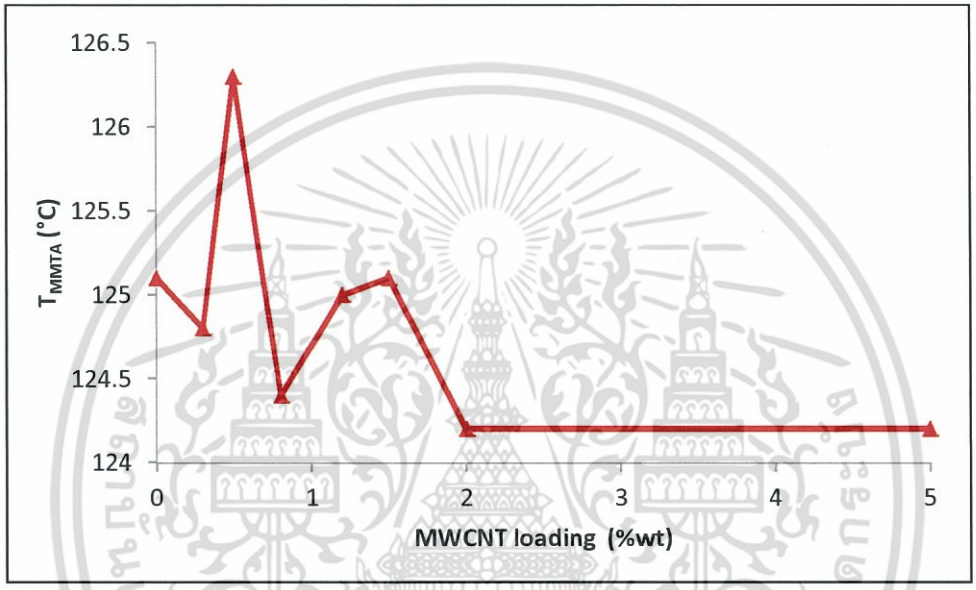
สูตร	$T_{g(SS)}$ (°C)	$T_{g(MP)}$ (°C)	T_{MMT} (°C)		$\Delta H_{(MMT)}$ (J/g)
			A	B	
Unfilled-Es	-28.0	54.1	125.1	167.7	24.65
0.3-Es	-28.5	54.5	124.8	163.1	19.26
0.5-Es	-25.3	56.5	126.3	161.1	19.56
0.8-Es	-28.5	58.1	124.4	161.8	19.96
1.2-Es	-26.1	56.7	125.0	162.4	17.53
1.5-Es	-27.1	59.1	125.1	161.7	16.19
2.0-Es	-28.5	54.5	124.2	160.9	17.57
5.0-Es	-29.2	56.3	124.2	159.9	18.23

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNTนาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณ MWCNT แตกต่างกัน

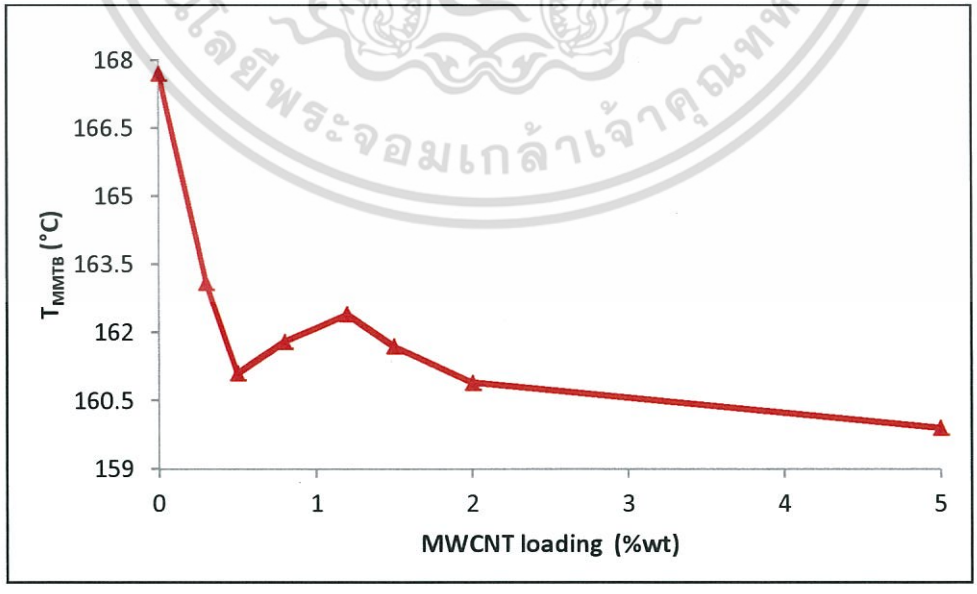
สูตร	$T_{g(MP)}$ (°C)	$T_{g(HS)}$ (°C)	T_{MMT}		$\Delta H_{(MMT)}$ (J/g)
			T_{MMT1}(°C)	T_{MMT2} (°C)	
Unfilled-Et	56.8	100.7	175.8	205.4	11.38
0.3-Et	57.9	102.0	176.0	207.0	10.21
0.5-Et	52.8	98.4	176.5	208.3	11.01
0.8-Et	58.0	103.4	175.4	205.7	11.28
1.2-Et	60.0	100.9	175.4	204.6	11.86
1.5-Et	63.1	100.9	174.6	205.3	13.03
2.0-Et	54.1	101.9	173.6	204.3	11.07
5.0-Et	55.2	101.8	170.6	199.7	10.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 100°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แต่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า MWCNT จะเข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT มากขึ้น ค่า $\Delta H_{(MMT)}$ จึงลดต่ำลง ดังรูปที่ 4.18 (c) นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่า T_{MMT} (T_{MMTA} และ T_{MMTB}) มีแนวโน้มลดต่ำลงด้วย ดังรูปที่ 4.18 (a) และ (b) เนื่องจากเกิดการขัดขวางการเกิดผลึก

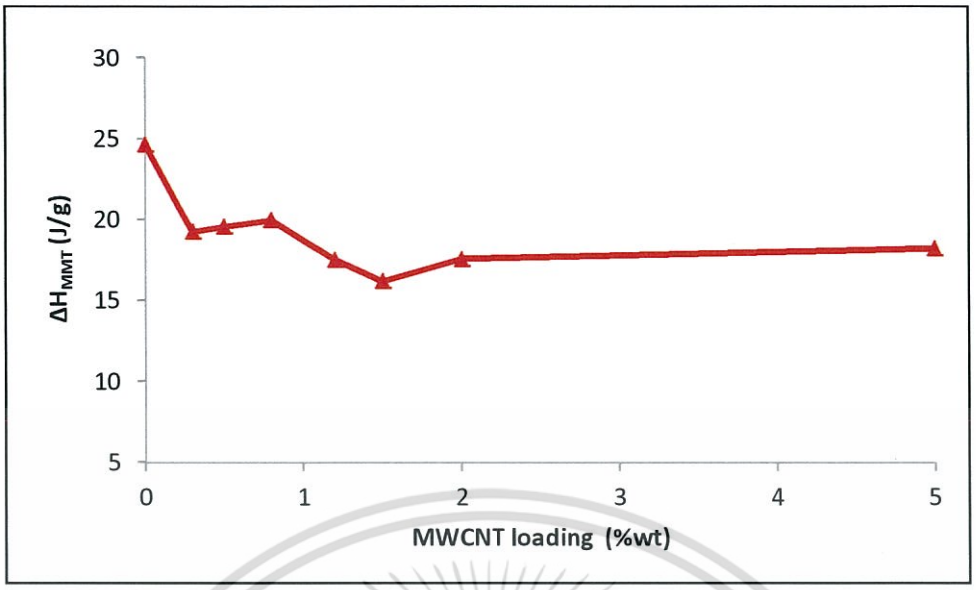


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

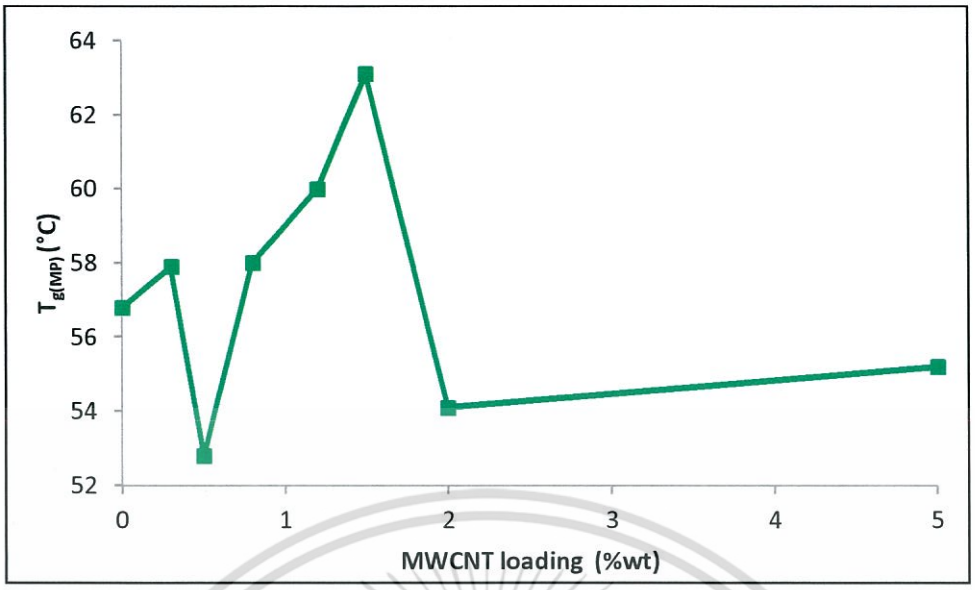


(c)

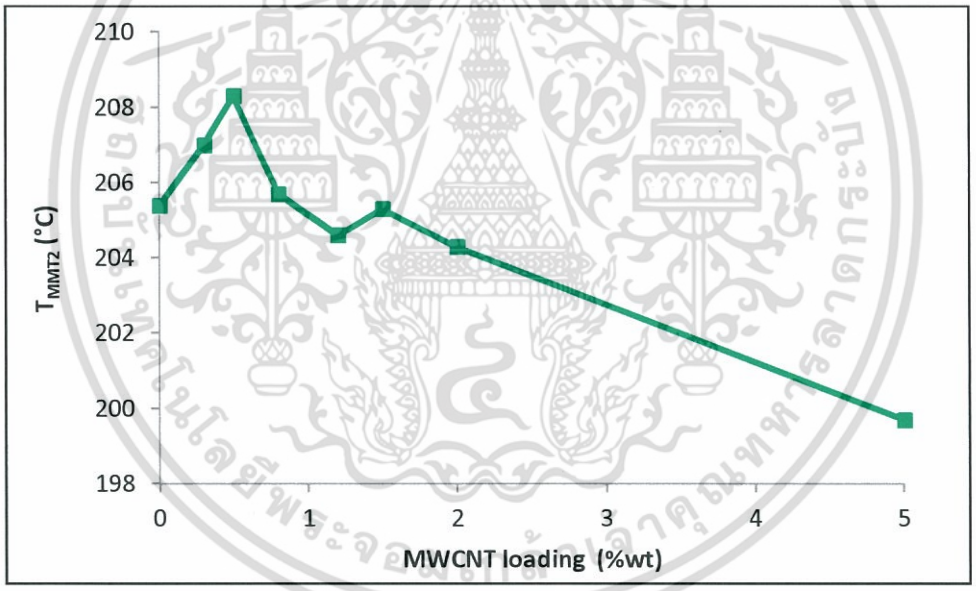
รูปที่ 4.18 กราฟ DSCของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) T_{MMTA}(b) T_{MMTB}และ (c) $\Delta H_{(MMT)}$

จากตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ กราฟ DSC ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ใช้อุณหภูมิในการอบอ่อน 80°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แต่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน พบว่าการอบอ่อนทำให้เกิด Microphase separation เนื่องจากพบค่า $T_{g(HS)}$ในทุกนาโนคอมพอสิต และเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT ถึง 1.5%wt พบว่าค่า $T_{g(MP)}$ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.19 (a) แสดงว่า MWCNT ยังกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนนิ่มและเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT มากขึ้น พบว่าค่า $T_{g(MP)}$ มีแนวโน้มลดต่ำลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟ T_{MMT2} ดังรูปที่ 4.19 (b) พบว่าที่ปริมาณ MWCNT ตั้งแต่ 2.0%wt ขึ้นไป ค่า T_{MMT2} มีแนวโน้มลดต่ำลงอย่างมาก แสดงว่า MWCNT ที่ใส่เข้าไปมากขึ้นจะเริ่มเข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.19 กราฟ DSCของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) $T_{g(MP)}$ และ (b) T_{MMT2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง UTM

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

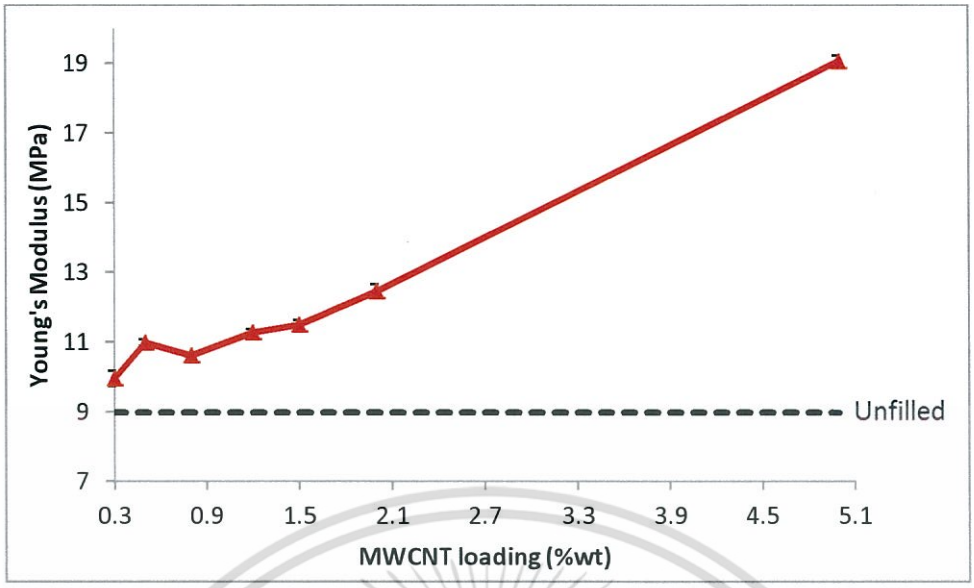
ตารางที่ 4.8 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน และผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Toughness (J)
Unfilled-Es	8.99±0.15	42.6±0.4	953.6±24.8	80.0±0.0
0.3-Es	9.96±0.22	41.2±1.5	890.4±20.9	66.7±5.8
0.5-Es	10.98±0.09	43.3±1.3	918.2±52.7	73.3±5.8
0.8-Es	10.62±0.05	41.0±0.3	926.6±5.0	80.0±0.00
1.2-Es	11.29±0.09	39.8±1.5	876.1±17.9	73.3±5.8
1.5-Es	11.50±0.12	41.3±0.3	909.4±19.1	76.7±5.8
2.0-Es	12.45±0.21	34.3±1.3	801.2±30.6	60.0±0.0
5.0-Es	19.07±0.15	26.5±0.7	556.2±37.1	50.0±0.0

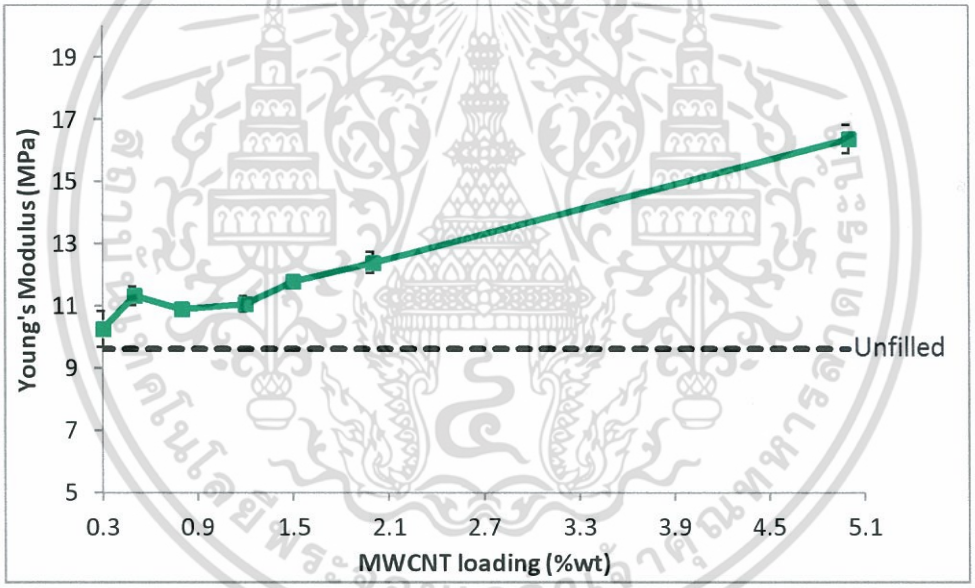
ตารางที่ 4.9 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน และผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Toughness (J)
Unfilled-Et	9.63±0.43	33.1±2.4	821.9±13.9	56.7±5.8
0.3-Et	10.26±0.57	34.5±1.4	908.0±11.2	70.0±0.0
0.5-Et	11.33±0.29	30.6±2.1	793.7±55.3	56.7±5.8
0.8-Et	10.91±0.14	31.9±0.9	887.2±6.3	66.7±5.8
1.2-Et	11.06±0.25	26.8±1.1	767.1±14.9	53.3±5.8
1.5-Et	11.79±0.11	27.9±0.1	811.5±27.7	56.7±5.8
2.0-Et	12.40±0.35	23.6±0.4	694.3±10.8	50.0±0.0
5.0-Et	16.37±0.45	19.5±0.3	330.4±1.7	20.0±0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



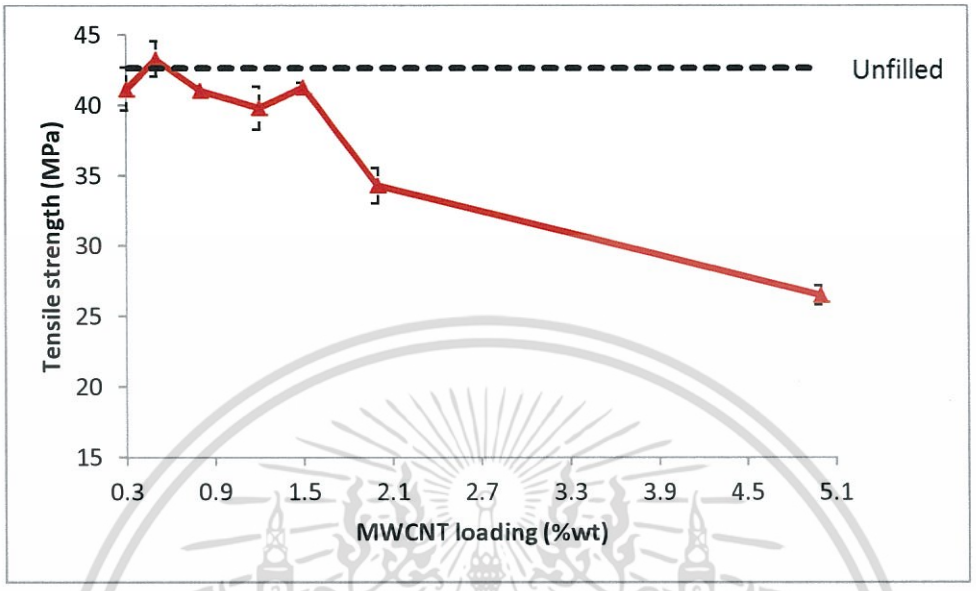
(b)

รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

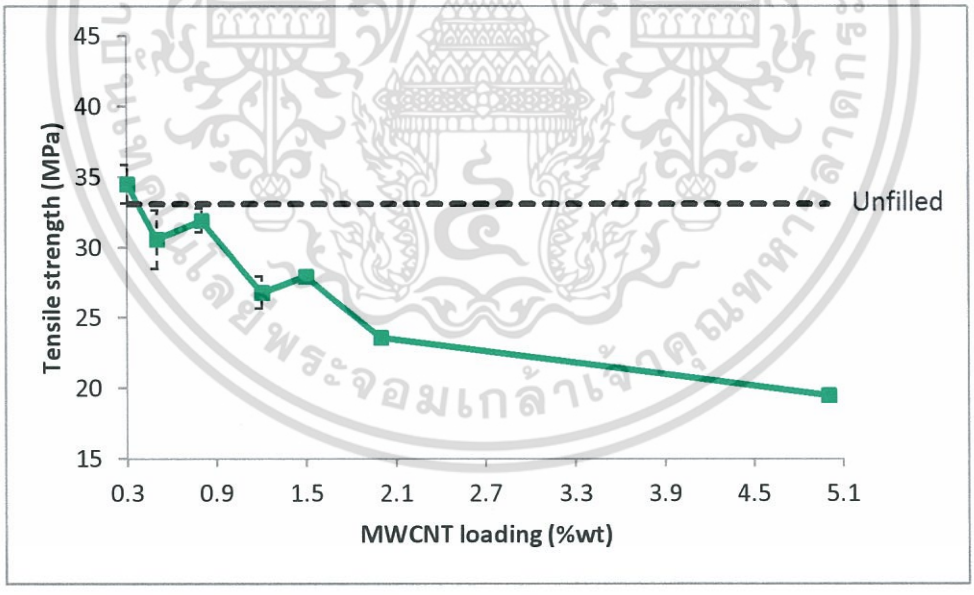
จากรูปที่ 4.20 (a) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT ค่า Young's modulus ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณ MWCNT ที่มากขึ้นทำให้ช่วยเพิ่มความแข็งตึงในวัสดุนาโนคอมพอสิตโดยที่ปริมาณ MWCNT 5.0%wt มีค่าYoung's modulus เพิ่มขึ้น 212% ส่วนในรูปที่ 4.20 (b) พบว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณ MWCNT 5.0%wt มีค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น 170%wt และเนื่องจาก MWCNT เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester นาโนคอมพอสิต จึงทำให้มีค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นสูงกว่า PU-ether นาโนคอมพอสิต



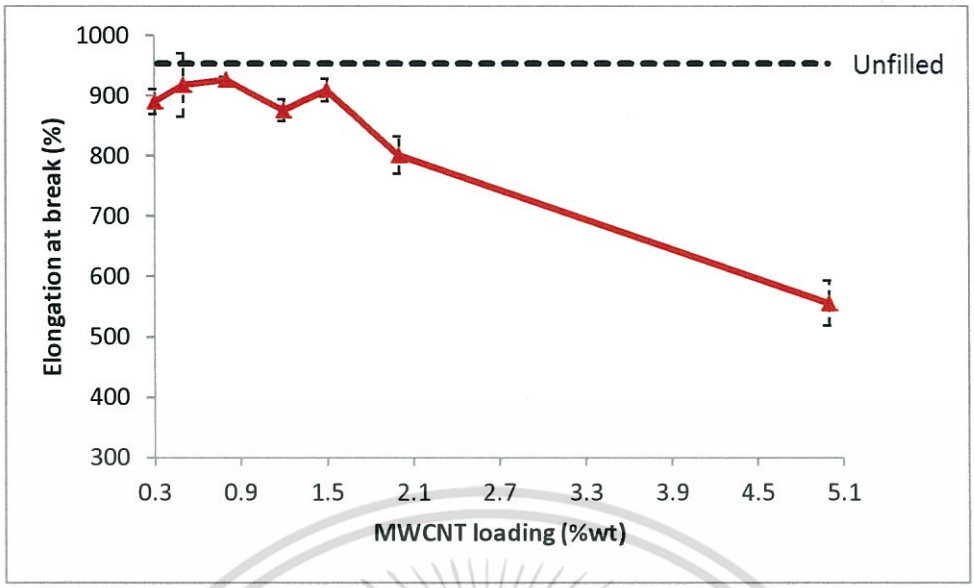
(a)



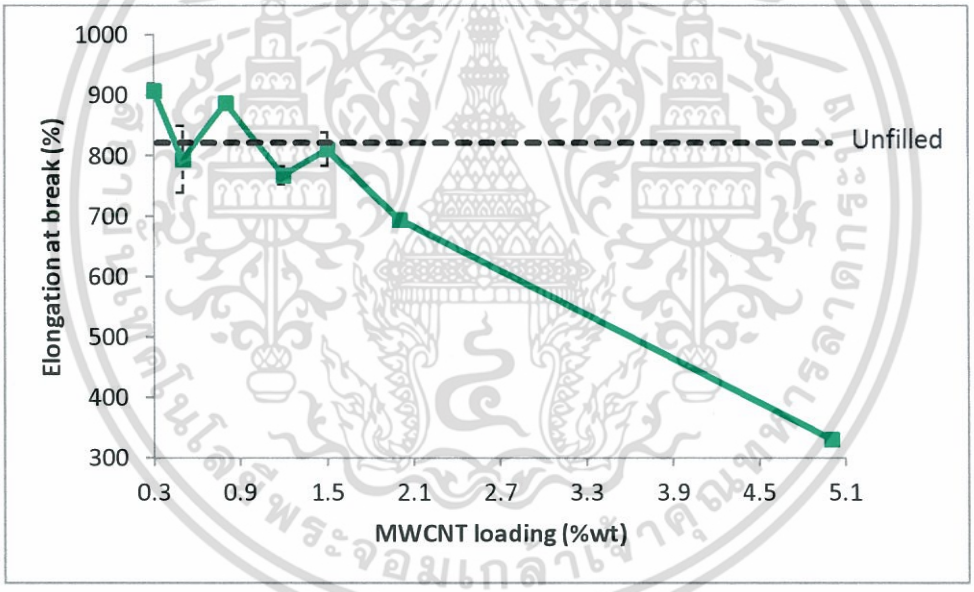
(b)

รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



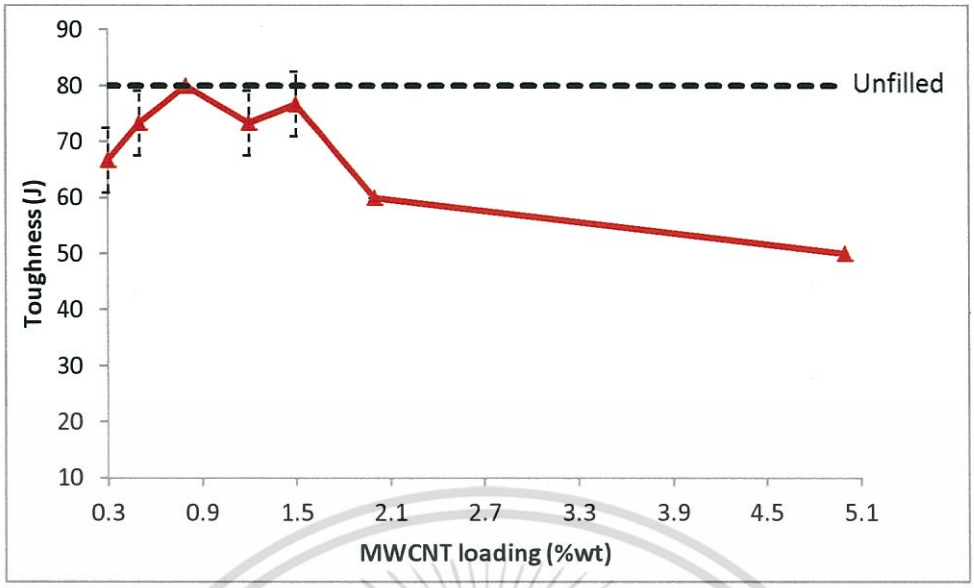
(a)



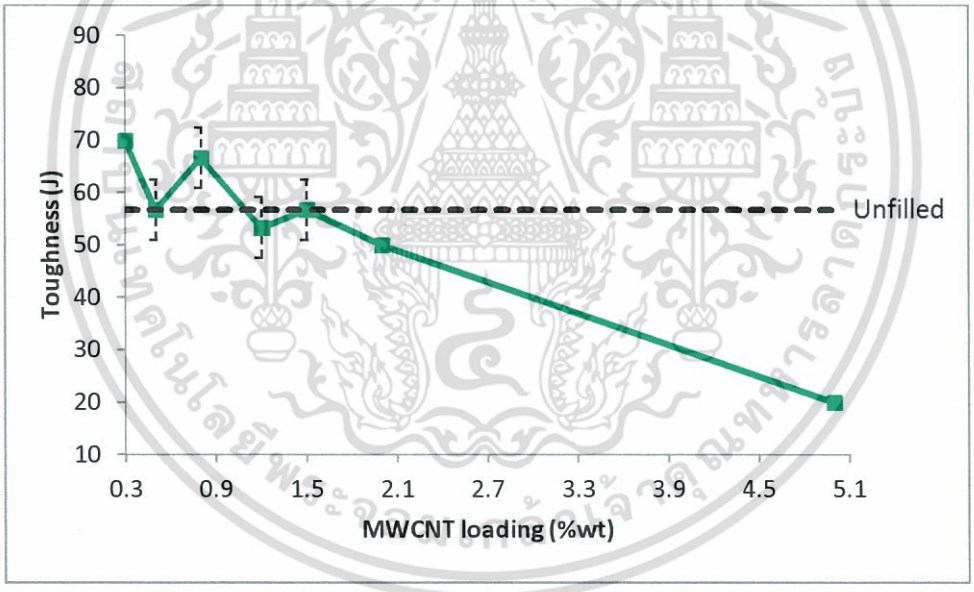
(b)

รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Elongation at break กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Toughness กับปริมาณ MWCNT ของ (a) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (b) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

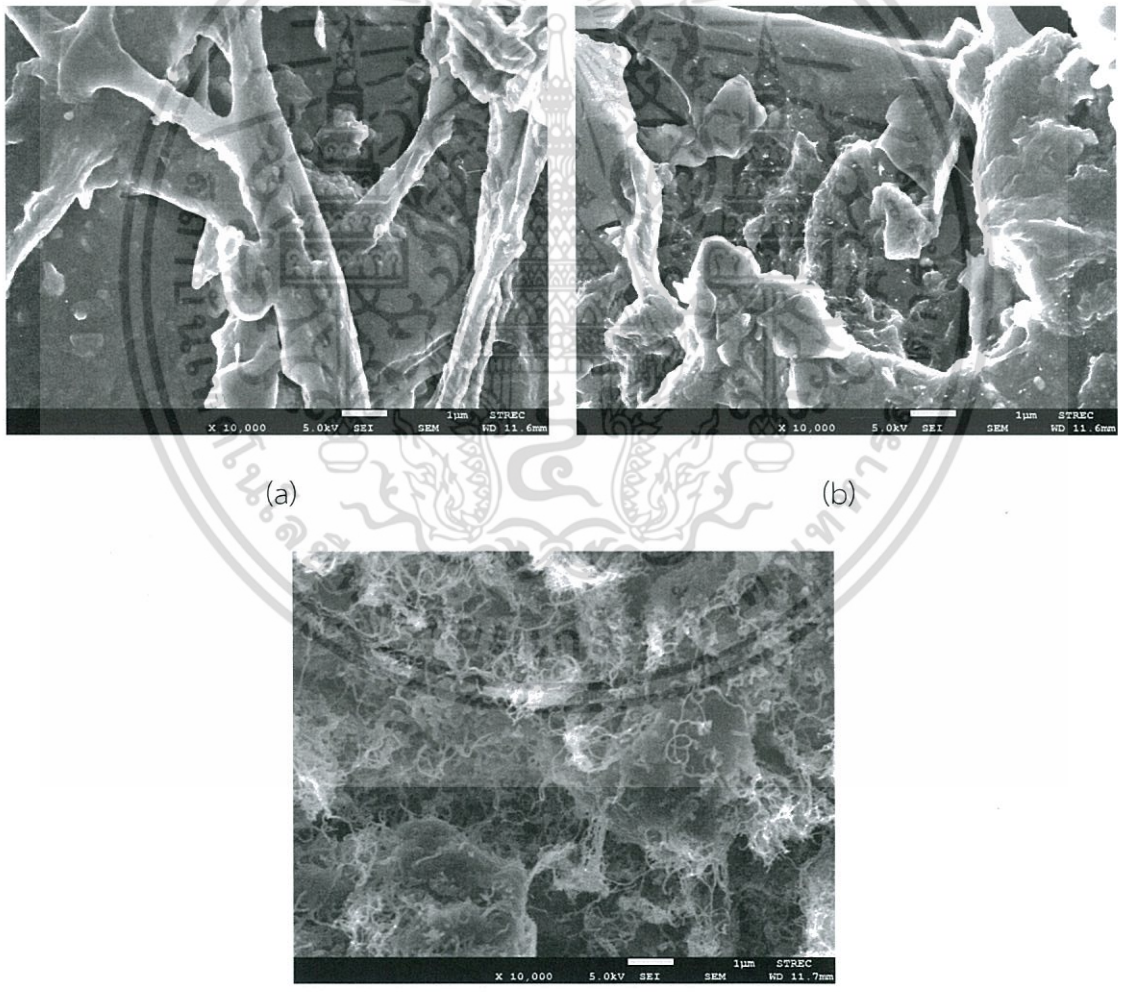
จากรูปที่ 4.21 (a), รูปที่ 4.22 (a) และ รูปที่ 4.23 (a) พบว่าค่าความแข็งแรงดึง, %Elongationat break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งและเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น ทำให้ไปขัดขวางความเป็นระเบียบในโครงสร้างของผลึก ส่วนรูปที่ 4.21 (b), รูปที่ 4.22 (b) และรูปที่ 4.23 (b) พบว่าค่าความแรงดึง, %Elongationat breakและ Toughness ของPU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มลดลงและลดลงอย่างมากเมื่อมีปริมาณ MWCNT ตั้งแต่ 2.0%wt ขึ้นไป เนื่องจาก MWCNT เริ่มเข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งจึงทำให้ขัดขวางการเกิดผลึก ส่งผลให้โครงสร้างส่วนแข็งมีความเป็นระเบียบในผลึกลดลงค่าTensile strength, %Elongationat breakและ Toughness จึงลดลง

4.2.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FESEM

การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค MWCNT ในวัสดุนาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณ MWCNT ต่างกัน ซึ่งผลที่ได้มีดังต่อไปนี้

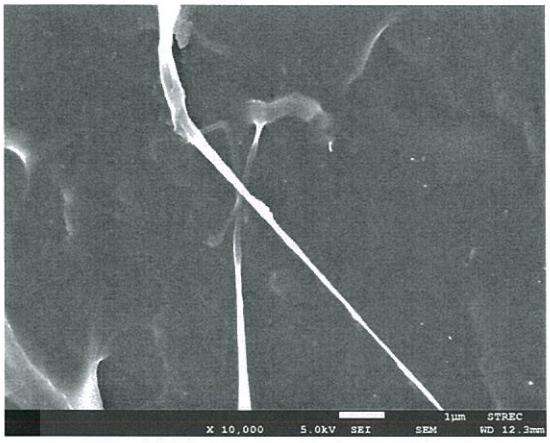


(a) (b)

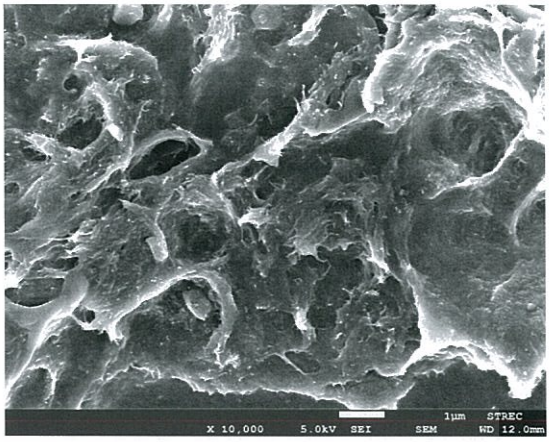
(c)

รูปที่ 4.24 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) 0.3-Es (b) 0.5-Es และ (c) 5.0-Es

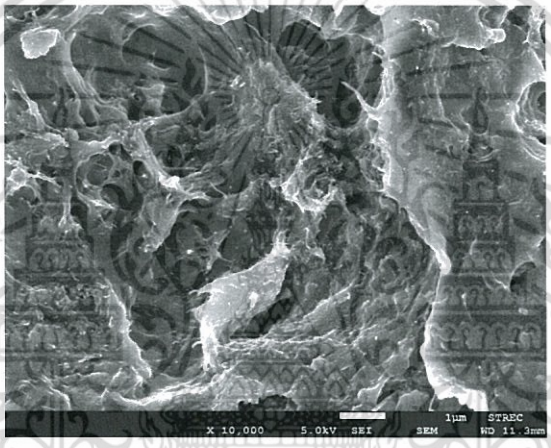
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

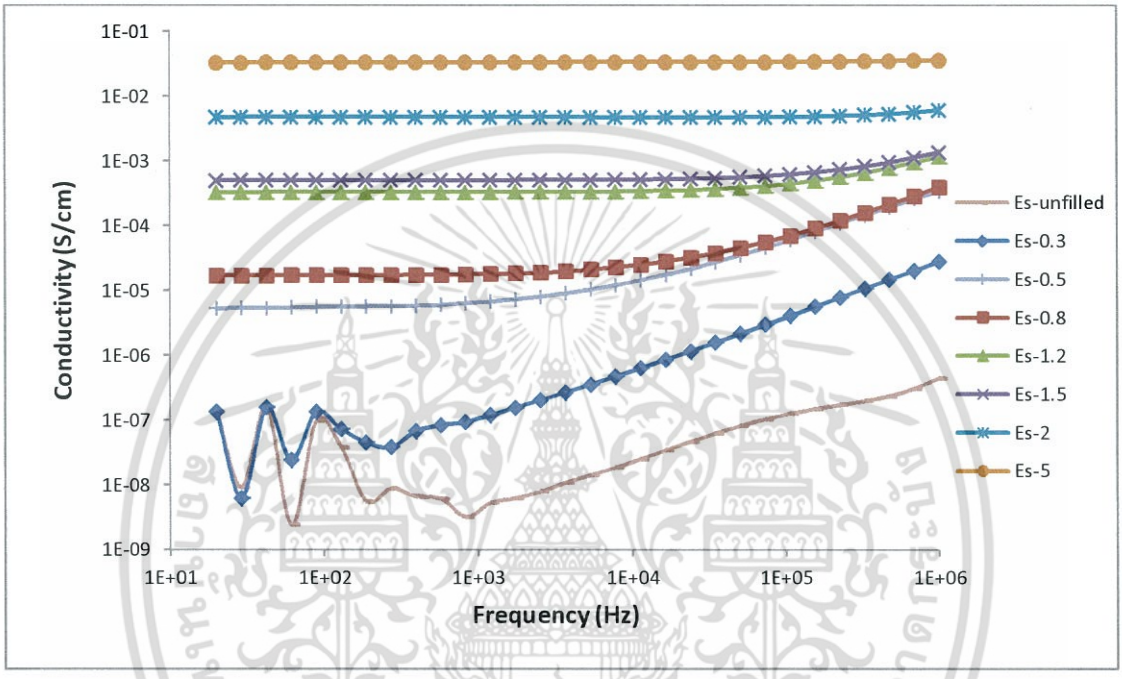
รูปที่ 4.25 ภาพ FESEM ที่กำลังขยาย x10000 เท่าของพื้นผิวแตกหักของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต (a) 0.3-Et (b) 0.5-Et และ (c) 5.0-Et

จากรูปที่ 4.24 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT ในชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีการเติม MWCNT ที่ปริมาณแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT (5.0%wt) แต่ MWCNT ยังคงมีการกระจายตัวได้ดีในนาโนคอมพอสิตเหมือนเดิม ถึงแม้ว่าการอบอ่อนจะเหนี่ยวนำให้เกิด Microphase separation ที่มากขึ้นก็ตาม ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกับ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ MWCNT ยังคงกระจายตัวได้ดี แม้ใส่ MWCNT ปริมาณมาก (5.0%wt) ดังแสดงในรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter

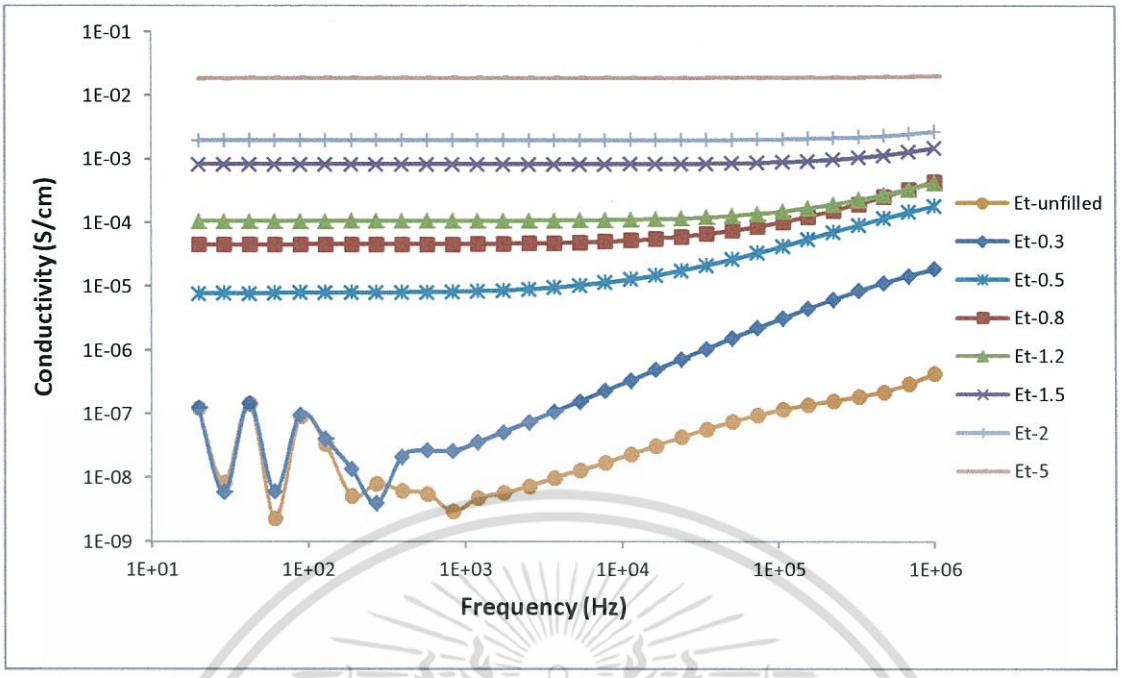
ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณ MWCNT 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5, 2.0 และ 5.0%wt โดยทั้ง PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT ใช้เวลาในการอบอ่อนเท่ากันที่ 10 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester/MWCNTนาโนคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.26 เห็นได้ว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ไม่เติม MWCNT และ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่เติม MWCNT ปริมาณ 0.3%wt ในช่วงความถี่ 20 ถึง 396 Hz มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ และเริ่มคงที่ที่ความถี่ 396 ถึง 834 Hz หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จนถึง 0.8%wt ค่าการนำไฟฟ้าคงที่ที่ความถี่ 20 ถึง 1210 หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จนถึง 1.5%wt ค่าการนำไฟฟ้าคงที่ที่ความถี่ 20 ถึง 50600 Hz หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จนถึง 5.0%wt พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ตลอดทั้งช่วงความถี่ นั่นแสดงว่าเมื่อเติม MWCNT ลงใน PU-ester ปริมาณ 5.0%wt ความถี่ไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

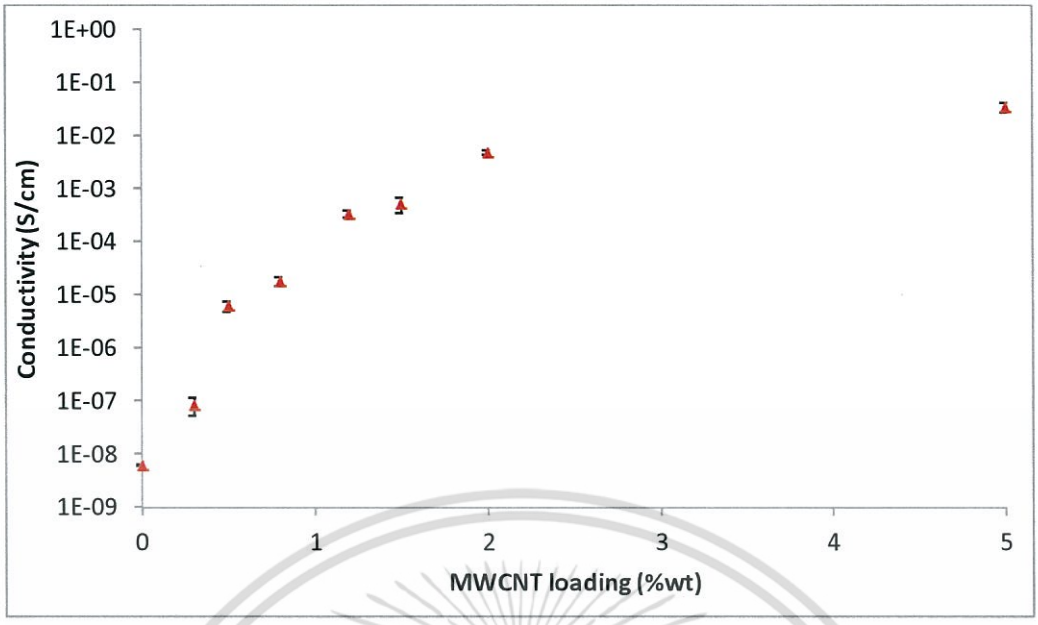


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

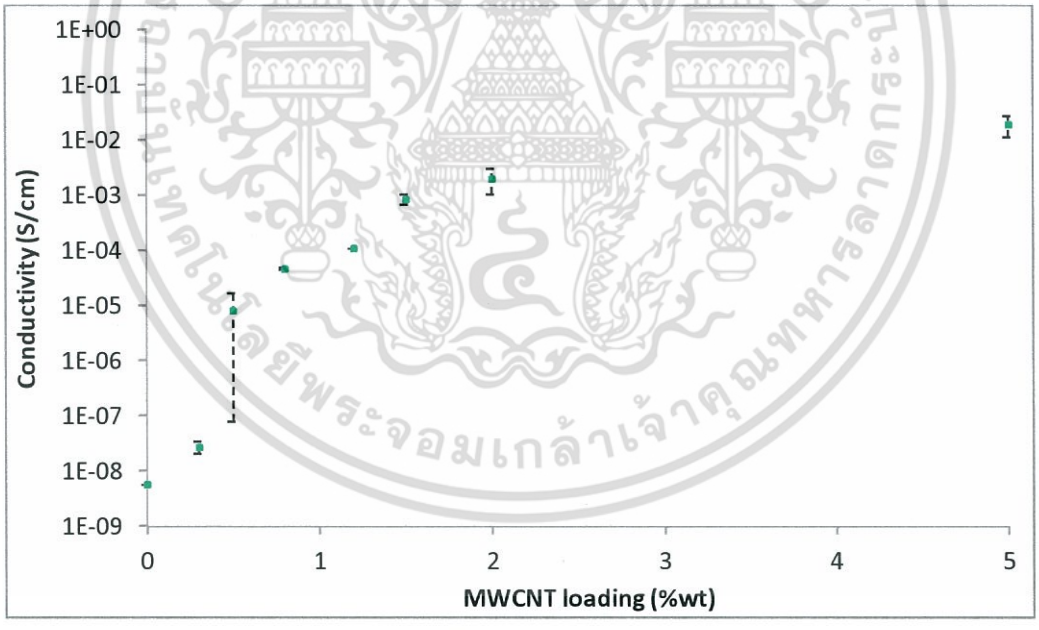
จากรูปที่ 4.27 เห็นได้ว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่เติม MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่เติม MWCNT ปริมาณ 0.3 %wt ในช่วงความถี่ 20 ถึง 396 Hz มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่และเริ่มคงที่ที่ความถี่ 396 ถึง 834 Hz หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จนถึง 0.5%wt ค่าการนำไฟฟ้าคงที่ที่ความถี่ 20 ถึง 5390 จนถึง 1.2%wt ค่าการนำไฟฟ้าคงที่ที่ความถี่ 20 ถึง 34800 Hz หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จนถึง 5.0%wt พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ตลอดทั้งช่วงความถี่ แสดงว่าเมื่อเติม MWCNT ลงใน PU-ester และ PU-ether ปริมาณมากกว่า 2.0%wt ความถี่ของกระแสไฟฟ้าเริ่มไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 พบว่าที่ช่วงความถี่ 396 ถึง 600 Hz นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อน มีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น จึงกำหนดค่าความถี่ที่ 575 Hz มาใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาในการอบอ่อน ดังรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต



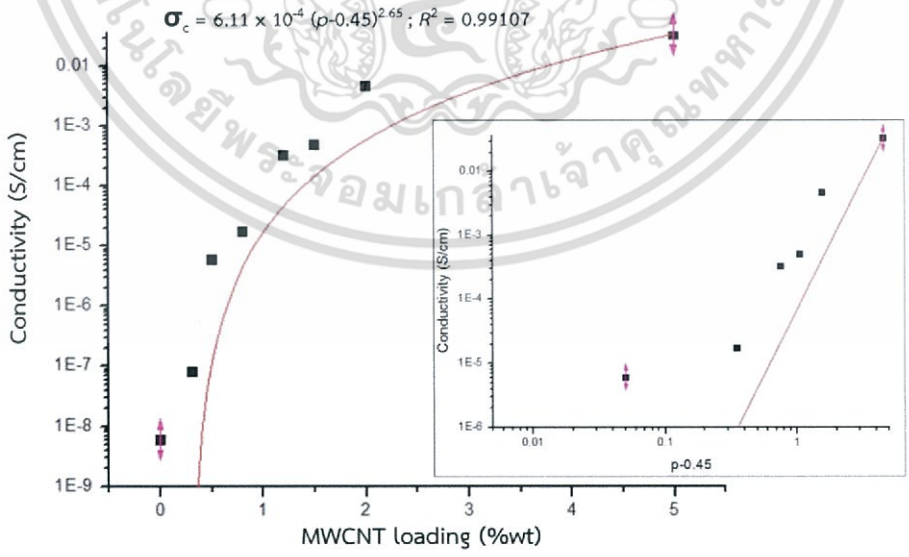
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ใน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 0.3%wt มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก Unfilled-Es คือ 6.10×10^{-9} S/cm เป็น 8.33×10^{-8} S/cm โดยค่าการนำไฟฟ้าเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนจากฉนวนไฟฟ้าไปเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ช่วงปริมาณ MWCNT 0.3 ถึง 0.5%wt ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนจาก $8.33x10^{-8}$ เป็น $6.08x10^{-6}$ S/cm และเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่ $3.37x10^{-2}$ S/cm เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 5.0%wt และเมื่อเปรียบเทียบกับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อนจากงานวิจัยของคุณชลธิชา หอมวันและคณะ [41] ได้ทำการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต พบว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนมีค่าการนำไฟฟ้า $2.69x10^{-6}$ S/cm และเมื่อเปรียบเทียบกับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อนมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น $6.08x10^{-6}$ S/cm เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 0.5%wt เท่ากัน

เมื่อพิจารณา PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ดังรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อเติม MWCNT พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยเมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 0.5%wt โดยค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก Unfilled-Et ที่ $5.61x10^{-9}$ S/cm เป็น $8.18x10^{-6}$ S/cm ซึ่งเปลี่ยนจากฉนวนไฟฟ้าไปเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้าและมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าสูงสุดที่ $1.90x10^{-2}$ S/cm เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 5.0%wt และเมื่อเปรียบเทียบกับ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต จากงานวิจัยของคุณชลธิชา หอมวันและคณะ [41] พบว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนมีค่าการนำไฟฟ้า $1.96x10^{-6}$ S/cm และเมื่อทำการอบอ่อน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต พบว่ามีค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น $8.18x10^{-6}$ S/cm เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 0.5%wt เท่ากัน

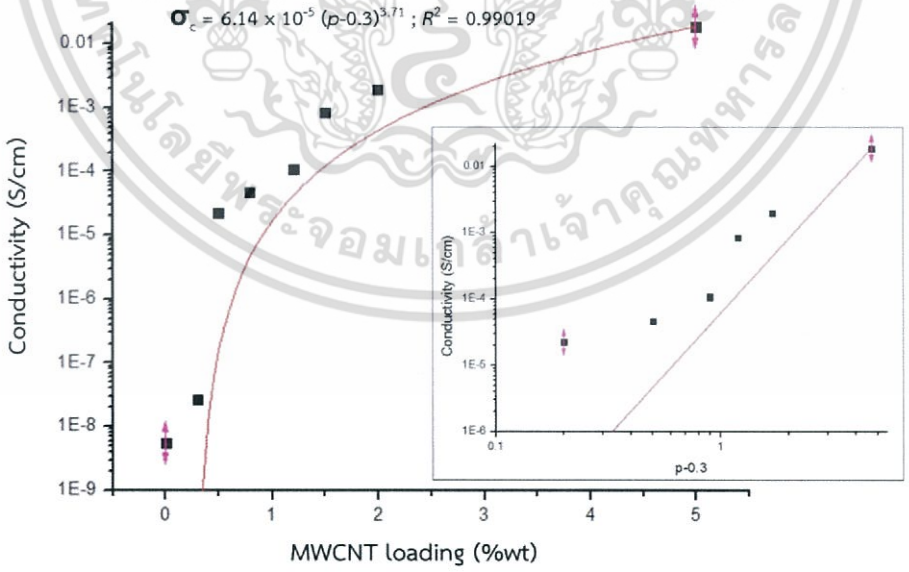


รูปที่ 4.30 การวิเคราะห์หาจุดนำไฟฟ้าด้วย Percolation theory ใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.30 แสดงการทำ Curve fitting เพื่อวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต, ค่า p_c (Percolation threshold) และค่า t (Critical exponent) ด้วย Percolation theory โดยใช้โปรแกรม Origin และใช้ค่า p-p_c ในช่วง 0.3 ถึง 0.5%wt ซึ่งเป็นช่วงที่กราฟมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเปลี่ยนจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้า จากการวิเคราะห์พบว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อน ได้ค่า p_c เท่ากับ 0.45 และค่า t เท่ากับ 2.65

หากค่า t ที่เป็นแบบ Universal ที่เท่ากับ 2.7 แสดงถึงการที่อนุภาค MWCNT เกิดการสร้างโครงข่ายนำไฟฟ้าเป็นรูปแบบ 5 มิติ (Hypercubic) อย่างสมบูรณ์ แต่จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่า t ที่ได้ มีค่า 2.65 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Universal แสดงว่าอนุภาค MWCNT เกิดการสร้างโครงข่ายนำไฟฟ้าแบบ 5 มิติ แต่ไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับผล DSC ที่พบว่าการอบอ่อนทำให้เกิด Microphase separation มากขึ้น แต่ MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester จะส่งผลให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบในผลึกลดลง จึงอาจทำให้เกิดโครงข่ายนำไฟฟ้าแบบ 5 มิติ ที่ไม่สมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบจุดนำไฟฟ้าของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจากงานวิจัยของคุณชลธิชา หอมวันและคณะ [41] พบว่ามีค่า p_c ไม่เปลี่ยนแปลงคือ 0.45 และค่า t เท่ากับ 2.7 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการอบอ่อนไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณ MWCNT ที่จะทำให้เกิดจุดนำไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบค่านำไฟฟ้าที่บริเวณจุดนำไฟฟ้า (0.5%wt) พบว่าการอบอ่อนจะเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าได้ 226%



รูปที่ 4.31 การวิเคราะห์หาจุดนำไฟฟ้าด้วย Percolation theory ใน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำ Curve fitting ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยทำการวิเคราะห์ด้วย Percolation theory เหมือนกับที่วิเคราะห์ใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต เพื่อหาค่า p-p_c และค่า t โดยใช้ค่า p-p_c ในช่วง 0.3 ถึง 0.5%wt เนื่องจากในรูปที่ 4.29 ช่วงนี้เป็นช่วงที่กราฟมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัด จากการวิเคราะห์พบว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการอบอ่อนได้ค่า p_c เท่ากับ 0.3 และค่า t เท่ากับ 3.71 ดังรูปที่ 4.31

จากค่า t ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตพบว่าเป็นแบบ Non-universal เมื่อเปรียบเทียบค่า t ของPU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจากงานวิจัยของคุณชลธิชาและคณะ [41] กับ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อน พบว่ามีค่า t ต่ำลงคือจาก 5.68 เป็น 3.71 แสดงว่าเมื่อทำการอบอ่อนโครงข่ายนำไฟฟ้าของ MWCNT แผ่ขยายน้อยลงซึ่งอาจส่งผลให้เกิด Tunneling effect ลดลงไปด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบจุดนำไฟฟ้าของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนกับ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการอบอ่อน พบว่ามีค่า p_c ต่ำลง คือ 0.43 เป็น 0.3 เนื่องจาก MWCNT เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่มของ PU-ether ดังนั้นเมื่อนำไปผ่านการอบอ่อนจะเหนี่ยวนำให้เกิด Microphase separation ขึ้นทำให้เกิดโครงข่ายนำไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องใน PU ส่งผลให้มีจุดนำไฟฟ้าลดต่ำลงและมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น 417% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อทำการอบอ่อนทำให้เกิดจุดนำไฟฟ้าที่ต่ำลงและมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น แม้ว่าโครงข่ายการนำไฟฟ้าของ MWCNT จะไม่แผ่ขยายเท่าการไม่อบอ่อนก็ตาม

เมื่อศึกษาผลของสัดส่วนของโครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งในงานวิจัยของคุณกฤตยา ครองสกุลและคณะ [42] ซึ่งได้ทำการศึกษาการกระจายตัวแบบเลือกตำแหน่งของ MWCNT พบว่า PU-ether มีสัดส่วนของโครงสร้างส่วนนิ่มน้อยกว่าโครงสร้างส่วนแข็ง และมีสัดส่วนโครงสร้างส่วนนิ่มน้อยกว่าโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester (3%) ทำให้ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT ตั้งแต่ 2%wt ขึ้นไป จะทำให้ MWCNT เกิดการกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ether ด้วย เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต พบว่าระหว่าง MWCNT ที่เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester กับ MWCNT ที่เข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่มของ PU-ether ในปริมาณMWCNT ที่เท่ากัน แต่ PU-ether มีสัดส่วนของโครงสร้างส่วนนิ่มให้ MWCNT เข้าไปอยู่น้อยกว่าในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester ทำให้ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตเกิดโครงข่ายนำไฟฟ้าที่เบียดชิดกันมากกว่า จึงส่งผลให้เกิดจุดนำไฟฟ้าต่ำกว่า ค่า t จึงสูงกว่า และมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อสมบัตินำไฟฟ้าของพอลิยูริเทนนาโนคอมพอสิต ที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มแตกต่างกันคือ PU-ester และ PU-ether โดยขั้นตอนแรกทำการศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนโดยทำการอบอ่อน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 6, 12 และ 24 ชั่วโมง และทำการอบอ่อน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6, 12 และ 24 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ส่วน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่ม และพบค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเมื่อใช้เวลาในการอบอ่อน 10 ชั่วโมงใน PU นาโนคอมพอสิตทั้งสองชนิด จึงใช้การอบอ่อนที่เวลา 10 ชั่วโมงในขั้นตอนที่ 2 เพื่อทำการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิตหลังผ่านการอบอ่อน เมื่อใช้ Percolation theory หาจุดนำไฟฟ้าใน PU-ester นาโนคอมพอสิต พบว่าค่า p_c เท่ากับ 0.45 และค่า t เท่ากับ 2.65 ซึ่งค่า t เป็นแบบ Non-universal แสดงถึงการสร้างโครงข่ายนำไฟฟ้ารูปแบบ 5 มิติ (Hypercubic) ที่ไม่สมบูรณ์ (ค่า t แบบ universal ที่ 2.7 เป็นการเกิดโครงข่ายรูปแบบ 5 มิติ) ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิต มีค่า p_c เท่ากับ 0.3 และ ค่า t เท่ากับ 3.71 ซึ่งค่า t เป็นแบบ Non-universal เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างนาโนคอมพอสิตที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อนและผ่านการอบอ่อนพบว่า ใน PU-ester นาโนคอมพอสิต มีค่า p_c และ t มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าการอบอ่อนสำหรับ PU-ester นาโนคอมพอสิต ไม่ได้ส่งผลต่อจุดนำไฟฟ้าและโครงข่ายนำไฟฟ้า แต่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิต มีค่า p_c และ t ต่ำลง และค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าการอบอ่อน PU-ether นาโนคอมพอสิต ส่งผลต่อจุดนำไฟฟ้าที่ต่ำลง และค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาสมบัติการนำไฟฟ้าเมื่อเติมปริมาณ MWCNT ในพอลิยูริเทนที่ต่างกัน พบว่า PU-ether มีสัดส่วนโครงสร้างส่วนนิ่มให้ MWCNT เข้าไปอยู่น้อยกว่าใน PU-ester ที่กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ทำให้ MWCNT อยู่ชิดกันมากกว่า จึงส่งผลให้เกิดจุดนำไฟฟ้าต่ำกว่า ค่า t สูงกว่า และค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าภายหลังจากการอบอ่อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ค่า Young's modulus และความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 117% และ 106% ตามลำดับ ในขณะที่ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มคงที่ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ FT-Raman คือ MWCNT มีความเข้ากันกับ PU-ether ได้ดีกว่า PU-ester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูริเทนนาโนคอมพอสิต โดยมีปัจจัยศึกษาต่างๆ ได้แก่ เวลาในการอบอ่อนและปริมาณ MWCNT ที่ใช้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไปได้ดังนี้

1. ศึกษาความเป็นผลึกของ PU นาโนคอมพอสิต โดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction

2. ศึกษาเปรียบเทียบผลของการอบอ่อนต่อจุดนำไฟฟ้าในวัสดุนาโนคอมพอสิตที่ใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น ผงเขม่าดำ แกรไฟต์ เส้นใยคาร์บอน และผงโลหะ เป็นต้น

3. ศึกษาเปรียบเทียบจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยใช้ MWCNT ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การทำ Acid cut หรือ การทำ Functionalize เป็นต้น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] University of York. 2013. **Composites.** [Online]. Available: http://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html.

[2] Cuppoletti, J. 2011. **Nanocomposites with Unique Properties and Applications In Medicine and Industry.** Croatia: In Tech (317-334).

[3] อิทธิพล แจ้งชัด. 2559.**ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิยูริเทน.** เคมีอุตสาหกรรมหน้า 2-15.

[4] CIEC Promoting Science at the University of York. 2013. **Polyurethanes**. [Online]. Available: http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyurethane.html.

[5] ปัทมาพร พ่วงงามพันธุ์. 2557. "การสังเคราะห์พอลิยูริเทนที่มี Diacetylene Unit โดยมีพอลิเอธิลีนเทอเรฟเทอเรตพอลิออลเป็นสารขยายสายโซ่." ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

[6] Boysen, E. Muir, N.C. Dudley, D. and Peterson, C. 2011. **Nanotubes: a Carbon-Based Nanoparticle.** [Online]. Available: http://www.dummies.com/education/science/nanotechnology/nanotubes-a-carbon-based-nanoparticle/.

[7] เบญจพร หนูคล้าย. 2551. "วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและตัวเติมนาโนเป็นตัวตรวจรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์." ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์.

[8] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. 2558. **วัสดุวิศวกรรม (Engineering Materials).** กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[9] ณฐินี โล่ห์พัฒนานนท์. 2552. **พอลิเมอร์เชิงประกอบความรู้พื้นฐานและสมบัติ.** ปัตตานี : โรงพิมพ์ปัตตานีการช่าง.

[10] ศรัญญา พรหมโคตร์. 2557. **เทคโนโลยีนาโนประกอบ (Nanacomposite Technology).** ขอนแก่น : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[11] Loos, M.R. 2011. **Processing of CNT/Polymer Composites.** [Online]. Available: https://sites.google.com/site/cntcomposites/processing-of-cnt-polymer-composites.

[12] ฐิติมา ตะสุวรรณ. 2554. "การพัฒนาพอลิออลเรซินสำหรับการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น." ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

[13] Oertel, G. 1993. **Polyurethane Handbook.** New York : Hanser Publishers.

[14] Efstathiou, K. 2017. "Synthesis and Characterization of a Polyurethane Prepolymer for the Development of a Novel Acrylate-based Polymer Foam." Budapest University of Technology and Economics (BME).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] Ionescu, M. 2017. **Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes**. United Kingdom: Rapra Technology Limited.

[16] Holden, G. Legge, N.R. Quirk, R. Schroeder, H.E. 1996. **Thermoplastic Elastomers**. Hamurg : Hanser Publishers.

[17] Lee, S. 2002. **The polyurethanes book.** New York : J. Wiley& SONS, LTD.

[18] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2017. **Nanotechnology: ท่อนาโนคาร์บอน.** [Online]. Available: http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unit3-8.html.

[19] Gogotsi, Y. 2006. **Nanomaterials Handbook.** Boca raton : Taylor & Francis group.

[20] วีระศักดิ์ สุระเรืองชัยและพรรษมณฑ์ ริจิรวนิช. 2017. **Carbon Nanotubes: Size does Matters.** [Online]. Available: http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html.

[21] Choudhary, V and Gupta, A. 2011. **Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposites.** [Online]. Available: http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nano-composites/polymer-carbon-nanotube-nanocomposites.

[22] Harris, P.J.F. 2009. **Carbon Nanotubes Science Synthesis, Properties and Application.** New York : Cambridge University Press.

[23] สถาพร คำหอม. 2558. **คาร์บอนนาโนทิวบ์กับการประยุกต์ใช้.** ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ มหาวิทยาลัยรังสิต.

[24] ทรงยศ บุญคง. 2555. "การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไธโอฟีนเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ." ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยศิลปกร.

[25] Vionnet-Menot, S. Grimaldi, C. Maeder, T. Strässler, S and Ryser, P. 2005. "**Tunneling - Percolation Origin of Nonuniversality: Theory and Experiments**". Physical review B 71.

[26] Stauffer, D. and A. Aharony, Introduction in Percolation Theory. 1992: Taylor & Francis Group.

[27] Sau, K.P. Chaki, T.K. and Khastgir, D. 1997. "**Conductive Rubber Composites from Different Blends of Rthylene-Propylene-Diene Rubber and Nitrile Rubber.**"Journal of materials science. 32: 5717-5724.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] ภัณฑิลา ลออประเสริฐสุข, จิดาภา ลาภเจริญโกศล และณัฐพงศ์ มากมีทรัพย์. 2556. "การดัดแปรท่อคาร์บอนนาโนเพื่อเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิสไตรีน/ท่อคาร์บอนนาโนคอมพอสิต." ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[29] Lisunova, M.O. Mamunya, Ye.P. Lebovka, N.I. and Melezhyk, A.V. 2007. **"Percolation Behaviour of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene/Multi-Walled Carbon Nanotubes Composites."** European Polymer Journal. 43 : 949-958.

[30] Garzón, C. Palza, H. 2014. **"Electrical Behavior of Polypropylene Composites Melt Mixed with Carbon-Based Particles: Effect of the Kind of Particle and Annealing Process."** Composites Science and Technology. 99 : 117-123.

[31] Ko, Y-ll. Lee, Y. Devarayan, K. Kim, B.S. Hayashi, T. and Kim, I.S. 2014. **"Annealing Effects on Mechanical Properties and Shape Memory Behaviors of Silicone-Coated Elastomeric Polycaprolactone Nanofiber Filaments."** Materials Letters. 131 : 128-131.

[32] ดาราวรรณ ลิ่มถิ่น, สริตา มหิธิธรรมธร และสีน้ำ แผ่วฉิมพลี. 2558. "การศึกษาผลกระทบของการอบอ่อนต่อพอลิยูริเทน/คาร์บอนนาโนทิวบ์คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว." ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[33] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, เกียรติคุณ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2017. **Differential Scanning Calorimeter.** [Online]. Available: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2606/differential-scanning-calorimeter-ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์.

[34] ห้องปฏิบัติการสเปคโตรสโคปี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2544. "เทคนิคทางรามาน." *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ* (24) : 60-63.

[35] ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2017. **Universal Testing Machine (UTM).** [Online]. Available: http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=26&id=32.

[36] Dumbbell co.,LTD. 2017. **Super Dumbbell Cutters Available [Extracted] List of Corresponding Standards.** [Online]. Available: http://www.dumbbell.co.jp/english/super_dumbbell01.html.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[37] ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2017. **Field Emission Scanning Electron Microscope JSM-7001F.** [Online]. Available: http:// thep-center. org/src2/files/eq/fesem.pdf.

[38] สมพร อิสรไกรศีล. 2559. **ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.อัปสร บุญยัง : FESEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่องานวิจัยและงานภาคอุตสาหกรรม.** [Online]. Available: http://www.wu.ac.th/th/news/9138/.

[39] บริษัท เมเชอร์โทรนิกซ์ จำกัด. 2558. "LCR Elite1 เครื่องวัด LCR แบบคีบอุปกรณ์ SMD". เซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์. (421) : 1-10.

[40] ระวิจี หมั่นเรียน, ณัฐชานันท์ พรธีรานวพรรษ และสายชล เนียมอยู่ยงค์. 2558. "การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปลงคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกรด" ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[41] ชลธิชา หอมวัน, ธัญรดา วัฒนภานุ และปฐมพร อุดมวงศ์ศักดิ์. 2558. "การศึกษาจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูริเทน/คาร์บอนนาโนทิวบ์คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว" ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[42] กฤตยา ครองสกุล, กัณณิกา คงขาว และกุสุมาลย์ เนินปลอด. 2558. "การศึกษาการกระจายตัวแบบเลือกตำแหน่ง คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว" ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง