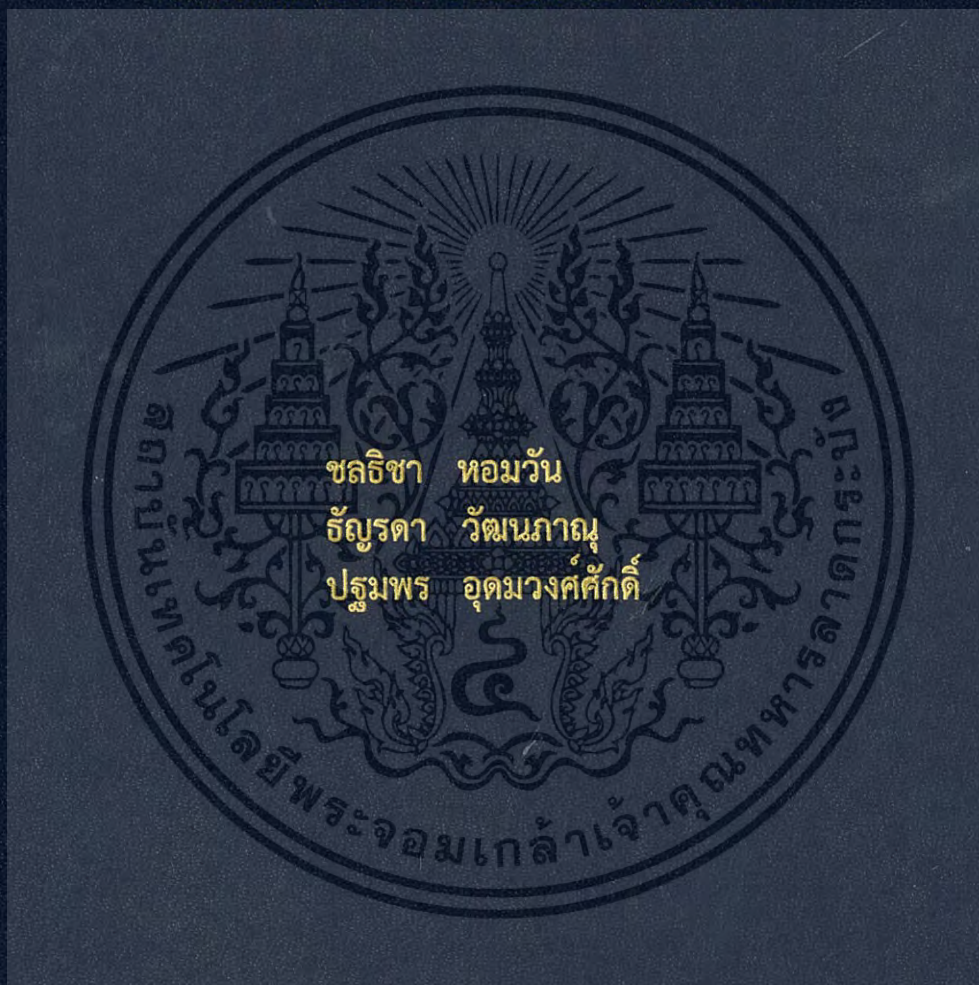


การศึกษาจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทน/คาร์บอนนาโนทิวบ์
คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว

STUDYING CONDUCTING PERCOLATION THRESHOLD
OF POLYURETHANE/CARBON NANOTUBE COMPOSITES
PREPARED BY MELTING MIXING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทน/คาร์บอนนาโนทิวบ์
คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว

STUDYING CONDUCTING PERCOLATION THRESHOLD
OF POLYURETHANE/CARBON NANOTUBE COMPOSITES
PREPARED BY MELTING MIXING



T149273

ชลธิชา หอมวัน
ธัญรดา วัฒนภาณุ
ปฐมพร อุดมวงศ์ศักดิ์

รฟว.

๕๒๒๔ ๗

๒๕๕๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149273
วันเดือนปี 30 ธ.ค. 2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในห้องสมุดเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDYING CONDUCTING PERCOLATION THRESHOLD
OF POLYURETHANE/CARBON NANOTUBE COMPOSITES
PREPARED BY MELTING MIXING



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 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทนคาร์บอนนาโนทิวบ์
คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว
Studying Conducting Percolation Threshold of
Polyurethane/Carbon Nanotube Composites Prepared
by Melt Mixing

ชื่อนักศึกษา

นางสาวชลธิชา หอมวัน รหัสนักศึกษา 55050619
นางสาวธัญรดา วัฒนภาณุ รหัสนักศึกษา 55050683
นางสาวปฐมพร อุดมวงศ์ศักดิ์ รหัสนักศึกษา 55050718

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทน/คาร์บอนนาโนทิวบ์ คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว Studying Conducting Percolation Threshold of Polyurethane/Carbon Nanotube Composites Prepared by Melt Mixing	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชลธิชา หอมวัน	รหัสนักศึกษา 55050619
	นางสาวธัญรดา วัฒนภานุ	รหัสนักศึกษา 55050683
	นางสาวปฐมพร อุดมวงศ์ศักดิ์	รหัสนักศึกษา 55050718
ปริญญา ภาควิชา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ	

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างพอลิยูรีเทน (PU) กับคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (MWCNT) โดยทำการศึกษาค่าการศึกษาค่าจุดนำไฟฟ้า (p_c) ของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลวใน PU ที่มีโครงสร้างส่วนนิ้มแตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) และใช้ปริมาณ MWCNT ต่างกัน โดย PU-ester นาโนคอมพอสิตทำการผสมที่อุณหภูมิ 190 หรือ 200°C ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตทำการผสมที่อุณหภูมิ 200 หรือ 210°C นำนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR-meter ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วย Universal Testing Machine ทดสอบสัณฐานวิทยาด้วย FESEM และทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิตด้วย Percolation theory พบว่า PU-ester นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 190 และ 200°C มีค่า $p_c = 0.55$ และ 0.45 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า MWCNT สามารถกระจายตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิในการเตรียมที่สูงขึ้น ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตมีค่า $p_c = 0.50$, t exponent = 4.77 และ $p_c = 0.43$, t exponent = 5.68 ที่อุณหภูมิการเตรียม 200 และ 210°C ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการเตรียมที่สูงขึ้นส่งผลให้ MWCNT มีจุดนำไฟฟ้าที่ต่ำลง และมีโครงข่ายเชื่อมโยงการนำไฟฟ้าที่แพร่กระจายมากกว่า ค่า Modulus ของ PU-ester นาโนคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 25% ส่วนค่า Modulus ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 10% เนื่องจากใน PU-ester นาโนคอมพอสิต MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งจึงทำให้สามารถเสริมความแข็งแรงได้มากกว่า PU-ether นาโนคอมพอสิตที่ MWCNT มีการกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ้มนั่นเอง

คำสำคัญ : คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น จุดนำไฟฟ้า นาโนคอมพอสิต พอลิยูรีเทน

Title	Studying Conducting Percolation Threshold of Polyurethane/Carbon Nanotube Composites Prepared by Melt Mixing		
Students	Miss Chonticha Homwan	Student ID 55050619	
	Miss Thanrada Vattanapanu	Student ID 55050683	
	Miss Pathomporn Udomwongsak	Student ID 55050718	
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2015		
Advisor	Dr. Kittimon Jirakittidul		

Abstract

In this research, polyurethane (PU) /multiwallcarbonnanotube (MWCNT) nanocomposites were prepared by melt mixing in order to study conducting percolation threshold (p_c). PU matrices used in this study had two different soft segments which based on polyester (PU-ester) and polyether (PU-ether). PU-ester nanocomposites were prepared at 190-200°C while PU-ether nanocomposites were prepared at 200-210°C. After that, LCR meter was used to test electrical conductivity, mechanical properties were tested by Universal Testing Machine, morphology of nanocomposite was investigated by FESEM and thermal properties were tested by DSC. The percolation theory was used to study electrical properties of nanocomposites. PU-ester nanocomposites prepared at 190 and 200°C showed $p_c=0.55$ and 0.45, respectively. It indicated that MWCNTs were better dispersion when mixing at higher temperature. For PU-ether nanocomposites, at 200°C found $p_c=0.50$ and t exponent =4.77 while at 210°C found $p_c=0.43$ and t exponent =5.68. Therefore, it was concluded that high mixing temperature effect on lower p_c and enlarge structure of conductive network. Futhermore of PU-ester nanocomposites increased approximately 25% while modulus of PU-ether composites increased approximately 10%. It was contributed to MWCNT dispersed in hard segments of PU-ester could improve mechanical property better than PU-ether nanocomposites in which MWCNTs dispersed in soft segments.

Keywords : Multiwall carbon nanotube, Nanocomposites, Percolation threshold, Polyurethane

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกรัฐ เดชศรี ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบโครงการพิเศษ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขรูปเล่มเป็นอย่างดี อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทดลอง

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ Field Emission Scanning Microscope (FESEM) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่สนับสนุนโอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจ จนโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมทั้งเพื่อนๆ ที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ท้ายสุดนี้ หากมีความผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูง และผู้เขียนหวังว่าโครงการพิเศษนี้คงมีประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยสำหรับผู้สนใจ

ชลธิชา หอมวัน
ธัญรดา วัฒนภาณุ
ปฐมพร อุดมวงศ์ศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุคอมพอสิต.....	6
2.1.1 ความหมายของวัสดุคอมพอสิต.....	6
2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต.....	6
2.2 นาโนคอมพอสิต.....	7
2.2.1 อนุภาคนาโน.....	7
2.2.2 การเตรียมนาโนคอมพอสิต.....	8
2.3 พอลิยูริเทน.....	9
2.3.1 ปฏิกริยาพื้นฐาน.....	9
2.3.2 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูริเทน.....	12
2.3.2.1 โครงสร้างส่วนนิ่ม.....	13
2.3.2.2 โครงสร้างส่วนแข็ง.....	14
2.3.3 วิธีการสังเคราะห์พอลิยูริเทน.....	14
2.4 คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	15
2.4.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	15
2.4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	16
2.4.2.1 Arc discharge.....	16
2.4.2.2 Laser ablation.....	17
2.4.2.3 Chemical vapor deposition.....	18
2.4.3 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	19
2.4.3.1 สมบัติเชิงกล.....	19
2.4.3.2 สมบัติทางไฟฟ้า.....	19
2.4.3.3 สมบัติทางความร้อน.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
 ใจว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	20
2.5 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า.....	20
2.5.1 กลไกการเกิดพอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า.....	20
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	22
2.5.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	23
2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.6.1 ผลกระทบจากชนิดสารตัวเติมนำไฟฟ้า.....	25
2.6.2 ผลกระทบจากวิธีการเตรียมนาโนคอมพอสิต.....	26
2.6.3 ผลกระทบจากพารามิเตอร์ในกระบวนการเตรียมนาโนคอมพอสิต.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	29
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์.....	29
3.3 วิธีการทดลอง.....	30
3.3.1 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต.....	30
3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปนาโนวัสดุคอมพอสิต.....	30
3.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิต.....	31
3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	31
3.4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM.....	32
3.4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM.....	33
3.4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter.....	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	35
4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	35
4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM.....	38
4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM.....	40
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหัก.....	56
ภาคผนวก ข ตารางแสดงค่า t exponents ตาม Percolation theory ของมิติต่างๆ.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบประเภทของวัสดุคอมพอสิตชนิดต่างๆ.....	7
2.2 ส่วนประกอบหลักของ Thermoplastic polyurethane	12
2.3 รูปแบบโครงสร้าง Single-walled carbon nanotube	16
2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสังเคราะห์ CNT ด้วยเทคนิคต่างๆ	18
3.1 สถานะในการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต	30
4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต	36
4.2 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต.....	37
4.3 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต.....	40
4.4 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต	41
ข.1 แสดงค่า t exponents ตาม Percolation theory ของมิติต่างๆ	62



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมพอสิต.....	1
1.2 การเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า	2
1.3 สมการการเกิด Polyurethane	3
1.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	3
1.5 การม้วนของแผ่นแกรฟีนเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ (a) SWCNT (b) MWCNT	4
1.6 การผสมแบบ Melt mixing.....	4
2.1 การผสมแบบ In situ polymerization	8
2.2 การผสมแบบสารละลาย	8
2.3 การผสมแบบหลอมเหลว	9
2.4 สมการการเกิด Polyurethane	10
2.5 สมการการเกิด Urea	10
2.6 สมการการเกิด Polyurea foams	10
2.7 สมการการเกิด Amide.....	11
2.8 สมการการเกิด Biuret.....	11
2.9 สมการการเกิด Allophanate	11
2.10 สมการการเกิด Dimer และ Trimer	11
2.11 โครงสร้างของ Thermoplastic polyurethane	12
2.12 การม้วนของแผ่นแกรฟีนเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ (a) SWCNT (b) MWCNT	15
2.13 เทคนิค Arc discharge.....	17
2.14 เทคนิค Laser ablation	17
2.15 เทคนิค Chemical vapor deposition.....	18
2.16 แสดงการเปรียบเทียบค่า Tensile strength ของ CNT กับวัสดุต่างๆ.....	19
2.17 กราฟแสดงสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค.....	22
2.18 การเชื่อมต่อกันของอนุภาค (a) อนุภาคทรงกลมและ (b) อนุภาคที่เป็นท่อ	22
2.19 การกระจายตัวของอนุภาค (a) กลุ่มก้อนและ (b) อนุภาคเดี่ยว.....	23
2.20 การจัดเรียงตัวของอนุภาค (a) แบบเป็นระเบียบและ (b) แบบสุ่ม.....	23
2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ CNT ที่เติมในคอมพอสิต	24
2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical exponent และค่า Percolation threshold ของคอมพอสิตต่างๆ ที่วัดได้อยู่ระหว่าง Insulator-conductor	25
2.23 กราฟแสดงค่าการนำไฟฟ้าของอีพอกซีคอมพอสิตกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ	26
2.24 กราฟแสดงค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของ MWCNT ที่ขึ้นรูปแบบ Hot-pressed films และ Extruded strands	27
2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณของ MWCNT ใน PC/MWCNT นาโนคอมพอสิตเตรียมที่ (a) 280°C และ (b) 350°C.....	28

เอกสารนี้เป็นเครื่อง DSC รุ่น 204 F1 Phoenix ของบริษัท Netzsch ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ขออนุญาตจากบริษัทฯ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 FESEM รุ่น JSM-7610F ของบริษัท JEOL	32
3.3 ตัวอย่างรูปดัมเบลล์สำหรับการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV	33
3.4 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า	34
4.1 กราฟ DSC ของ MWCNT/PU-ester นาโนคอมพอสิต.....	35
4.2 กราฟ DSC ของ MWCNT/PU-ether นาโนคอมพอสิต	36
4.3 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 10000$ เท่าของ (a1) 1.5 Es-190 และ (a2) 1.5 Es-200.....	38
4.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 และ (a2) 0.3 Et-210	39
4.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (a2) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต	39
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับปริมาณ MWCNT โดยใช้ข้อมูลหมุ่ในการผสมต่างกัน (a) PU-ester และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต	42
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต.....	44
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต.....	44
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ที่เติมลงในนาโนคอมพอสิต PU-ester โดยใช้ข้อมูลหมุ่ในการผสม (a) 190°C และ (b) 200°C	46
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ที่เติมลงในนาโนคอมพอสิต PU-ether โดยใช้ข้อมูลหมุ่ในการผสม (a) 200°C และ (b) 210°C	47
4.11 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ด้วย Percolation theory ใน PU-ester นาโนคอมพอสิต โดยใช้ข้อมูลหมุ่ในการผสม (a) 190°C และ (b) 200°C	48
4.12 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ด้วย Percolation theory ใน PU-ether นาโนคอมพอสิต โดยใช้ข้อมูลหมุ่ในการผสม (a) 200°C และ (b) 210°C	50
ก.1 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 5000$ เท่าของ (a1) 0.3 Es-190 (a2) 0.3 Es-200 (b1) 0.8 Es-190 (b2) 0.8 Es-200 (c1) 1.5 Es-190 และ (c2) 1.5 Es-200.....	56
ก.2 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 10000$ เท่าของ (a1) 0.3 Es-190 (a2) 0.3 Es-200 (b1) 0.8 Es-190 (b2) 0.8 Es-200 (c1) 1.5 Es-190 และ (c2) 1.5 Es-200.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) 0.3 Es-190 (a2) 0.3 Es-200 (b1) 0.8 Es-190 (b2) 0.8 Es-200 (c1) 1.5 Es-190 และ (c2) 1.5 Es-200.....	58
ก.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 5000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 (a2) 0.3 Et-210 (b1) 0.8 Et-200 (b2) 0.8 Et-210 (c1) 1.5 Et-200 และ (c2) 1.5 Et-210.....	59
ก.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 10000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 (a2) 0.3 Et-210 (b1) 0.8 Et-200 (b2) 0.8 Et-210 (c1) 1.5 Et-200 และ (c2) 1.5 Et-210.....	60
ก.6 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 (a2) 0.3 Et-210 (b1) 0.8 Et-200 (b2) 0.8 Et-210 (c1) 1.5 Et-200 และ (c2) 1.5 Et-210.....	61



คำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย
CNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์
CVD	Chemical vapor deposition
DSC	Differential scanning calorimetry
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope
MDI	4,4'-Methylenebisphenyl isocyanate
MWCNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น
PU	พอลิยูรีเทน
SWCNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
g	กรัม
Hz	เฮิรตซ์
J	จูล
NCO	หมู่ไอโซไซยาเนต
-NHCO-O-	พันธะยูรีเทน
nm	นาโนเมตร
°C	องศาเซลเซียส
OH	หมู่ไฮดรอกซิล
p	ความเข้มข้นของสารตัวเติมนำไฟฟ้า
p_c	ความเข้มข้นของจุดที่เกิดการนำไฟฟ้า
R^2	ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด
S/cm	ซีเมนต์/เซนติเมตร
T	อุณหภูมิ
t	Critical exponent
T_{gSS}	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่ม
T_{gMP}	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็งที่ผสมกันอยู่
T_{MMT}	อุณหภูมิการเกิด microphase mixing
%wt	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ΔH_{MMT}	พลังงานที่ใช้ในการเกิด microphase mixing
σ_c	ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต
σ_0	ค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

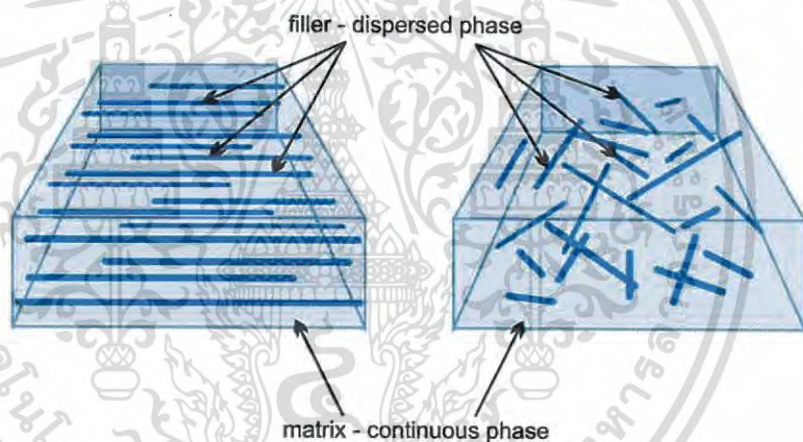
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ ในปัจจุบันและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติ เช่น ความหนาแน่นต่ำทำให้ได้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง ค่ามอดุลัสสูง ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำ ทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีและสภาพอากาศ มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้

วัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบอย่างน้อย 2 ชนิดมาผสมรวมกันอยู่ โดยวัสดุทั้งสองชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต [1]

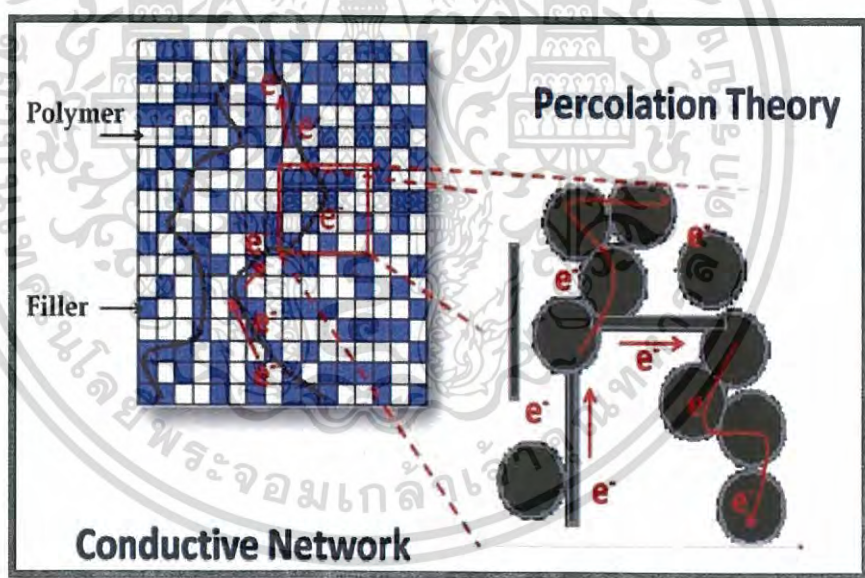
1. เมทริกซ์ (Matrix) คือ วัสดุที่มีความเหนียวสูง แต่มีความแข็งแรงและค่ามอดุลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง วัสดุที่เป็นเมทริกซ์ ได้แก่ Polyurethane, Epoxy และ Polyester

2. สารเสริมแรง (Reinforcement) คือ อนุภาคเล็กๆ ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เป็น วัสดุที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) เมื่อกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีขึ้น ทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้า วัสดุที่เป็นสารเสริมแรง ได้แก่ คาร์บอนนาโนทิวบ์ เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว พอลิเมอร์โดยทั่วไปมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า หากต้องการให้พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ จึงทำการเติมสารตัวเติมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถด้านการนำไฟฟ้า (Electrically conductive fillers) ลงไปผสมทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น ผงเขม่าดำ แกรฟีน คาร์บอนนาโนทิวบ์ เส้นใยคาร์บอน และผงโลหะ

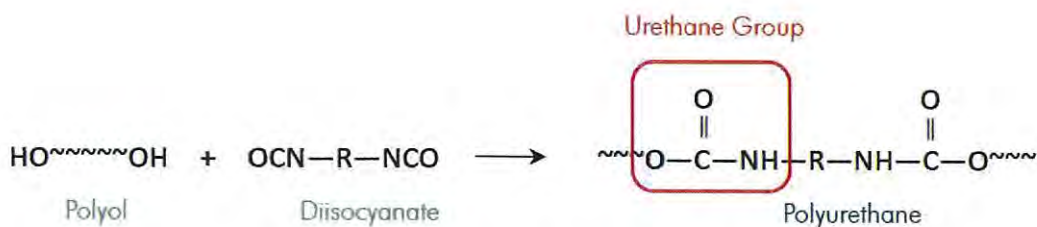
กลไกที่ทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระอย่างต่อเนื่องในโมเลกุลของอนุภาคสารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้าที่เกิดการเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า (Conductive network) ทั่วตลอดเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 จึงเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตขึ้นอยู่กับ การเชื่อมโยงกันของอนุภาคสารตัวเติมโดยปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงไปในเมทริกซ์ ต้องมีปริมาณเกินกว่าสัดส่วนวิกฤตที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (Percolation threshold) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการนำไฟฟ้า นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตยังขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัส (Contact resistance) ระหว่างวัฏภาคของอนุภาคสารตัวเติมที่อยู่ใกล้กันและความต้านทานระหว่างวัฏภาคของอนุภาคสารตัวเติมกับเมทริกซ์อีกด้วย [2]



รูปที่ 1.2 การเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า [3]

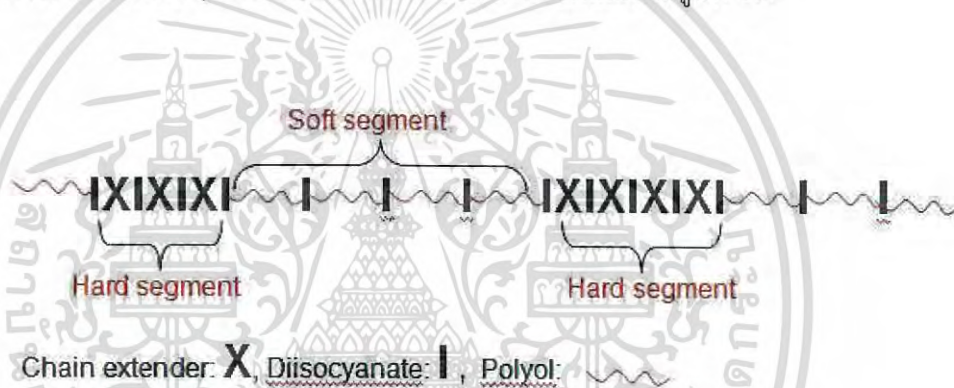
ในงานวิจัยนี้เมทริกซ์ที่ใช้คือพอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) PU มีทั้งชนิดที่เป็นเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต โดยสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างไดไอโซไซยานต (Diisocyanates) กับไดออล (Diols) สมการการเกิด Polyurethane ดังแสดงในรูปที่ 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 สมการการเกิด Polyurethane [4]

โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymer) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนนิ่ม (Soft segment) เป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Polyol ที่มีหมู่ปิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ตัวอย่างเช่น Polyester polyol หรือ Polyether polyol และโครงสร้างส่วนแข็ง (Hard segment) เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Diisocyanate และ Chain extender ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [5]

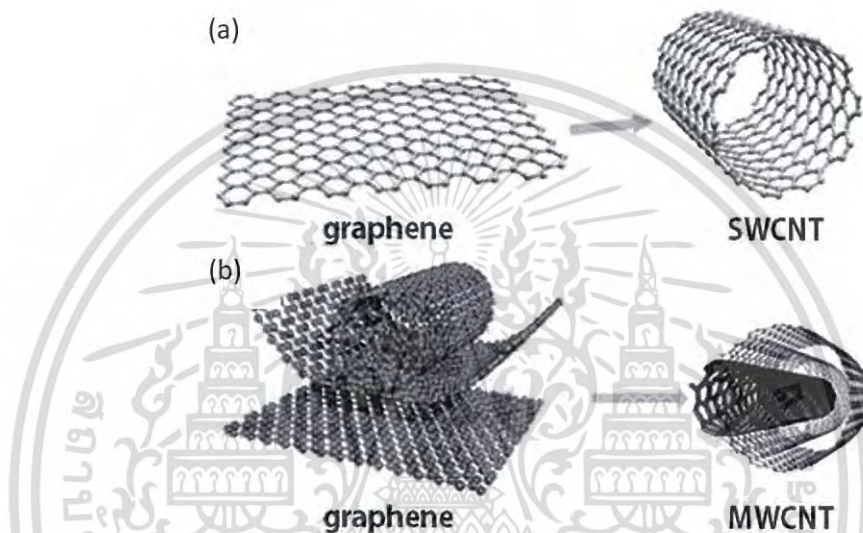
คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) เป็นสารตัวเติมที่มีสมบัติทางการนำไฟฟ้าที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต CNT เป็นวัสดุระดับนาโนที่มีความยาวโดดเด่นออกไปใน 1 มิติ (1D nanomaterial) โดยเกิดจากการนำแผ่นแกรไฟีนม้วนเป็นท่อ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวหลายแบบขึ้นกับทิศทางการม้วนแผ่นแกรไฟีน นอกจากนี้ CNT ยังมีอะตอมในโครงสร้างอยู่ที่ผิวทั้งหมด ทำให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง เนื่องจากอะตอมที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวได้ทุกอะตอม [6]

สมบัติเด่นของ CNT คือ มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงนำไฟฟ้าได้โดยอิเล็กทรอนิกส์กักให้เคลื่อนที่ในทิศทางตามความยาวของท่อในทิศทางเดียว ส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าที่ไม่มีการต้านทาน ไม่มีการชนกันของอิเล็กตรอน เรียกว่า การนำไฟฟ้าแบบบอลลิสติก (Ballistic conduction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

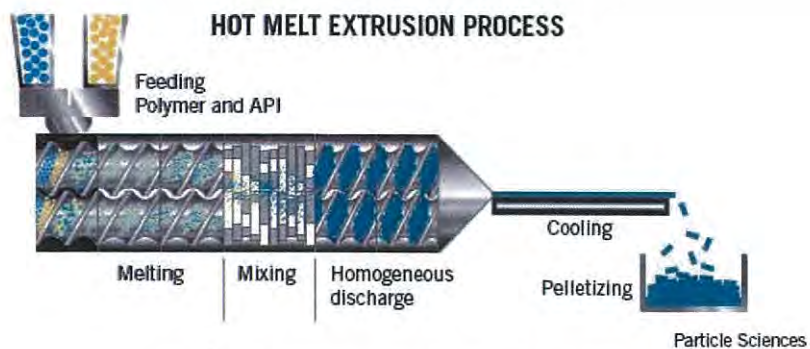
CNT สังเคราะห์ได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) การยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) และอาร์กไฟฟ้า (Electric arc) วิธีที่นิยมคือ CVD ซึ่ง CNT ที่ได้มี 2 แบบ คือ

1. คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNT) มีลักษณะเป็นแผ่นแกรฟีน 1 แผ่น ม้วนเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 นาโนเมตร
2. คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNT) มีลักษณะเป็นแผ่นแกรฟีนซ้อนกัน ม้วนเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-20 นาโนเมตร



รูปที่ 1.5 การม้วนของแผ่นแกรฟีนเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ (a) SWCNT (b) MWCNT [7]

การผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing) เป็นวิธีการเตรียมคอมพอสิตของพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก โดยในการเตรียม Thermoplastic polyurethane/MWCNT นาโนคอมพอสิตมีการผสมกันด้วยแรงเฉือนทำให้เกิดการผสมที่ดี มีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อใช้สารตัวเติมในปริมาณที่มาก



รูปที่ 1.6 การผสมแบบ Melt mixing [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว โดยเทอร์โมพลาสติกพอลิยูริเทนทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ และ CNT ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง ทำการศึกษาลักษณะของอุณหภูมิในการเตรียมนาโนคอมพอสิตต่อความเข้มข้นของ CNT ที่ทำให้เกิดจุดนำไฟฟ้า (Percolation threshold) ใน PU และศึกษาการกระจายตัวของ MWCNT ใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนึ่งที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเตรียมนาโนคอมพอสิตต่อความเข้มข้นของ MWCNT ที่ทำให้เกิดจุดนำไฟฟ้าใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต
2. เปรียบเทียบจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนึ่งที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PU MWCNT วิธีการเตรียมคอมพอสิตแบบหลอมเหลว (Melt mixing) และปัจจัยที่ส่งผลต่อจุดนำไฟฟ้าของ CNT ในวัสดุนาโนคอมพอสิต
2. เตรียมนาโนคอมพอสิตโดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว โดยใช้อุณหภูมิและความเข้มข้นของ MWCNT ที่แตกต่างกัน
3. เตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่าง PU และ MWCNT โดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่อง Brabender โดยใช้ PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนึ่งที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether
4. ขึ้นรูปชิ้นงานโดยกระบวนการกดอัดด้วยเครื่อง Compression molding
5. ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ดูลักษณะการกระจายตัวของ MWCNT ด้วยเทคนิค FESEM และทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของ MWCNT ที่ทำให้เกิดจุดนำไฟฟ้าใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว
2. สามารถทราบถึงปริมาณ MWCNT ที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าใน PU เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม
3. สามารถทราบถึงผลกระทบของโครงสร้างส่วนนึ่งที่ต่างกัน ใน PU ต่อการเกิดจุดนำไฟฟ้า

ใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคอมพอสิต

2.1.1 ความหมายของวัสดุคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิตเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบอย่างน้อย 2 ชนิดมาผสมรวมกันอยู่ โดยวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีสมบัติแตกต่างกันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ เมทริกซ์และสารเสริมแรง โดยเมทริกซ์มีหน้าที่ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใยหรืออนุภาคและกำหนดรูปร่างของวัสดุคอมพอสิตวัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เมื่อนำ Thermoset เข้าสู่กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปทรงถาวรไม่สามารถนำไปหลอมได้อีกและไม่ละลายในตัวทำละลาย Thermoset ที่นิยมใช้ ได้แก่ Epoxy, Polyester และ Vinyl ester เมื่อ Thermoset เริ่มแข็งตัวเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแห 3 มิติ การเชื่อมโยงทำให้วัสดุสามารถต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี ส่วน Thermoplastic เมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปหลอมได้อีกโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป Thermoplastic ที่นิยมใช้ ได้แก่ Polyethylene, Polypropylene และ Polystyrene

สารเสริมแรงเป็นวัสดุที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) อยู่ในรูปของเส้นใยหรือก้อนอนุภาคแทรกอยู่ในเมทริกซ์ ทำหน้าที่เพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ สามารถรับแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุได้ และช่วยให้ไม่เกิดการเสียหายหรือการผิดรูปภายใต้แรงกระทำ โดยแรงกระทำจะถูกถ่ายทอดไปยังสารเสริมแรง สารเสริมแรงที่นิยมใช้ คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) [9]

2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิตมี 3 ประเภท คือ พอลิเมอร์คอมพอสิต เซรามิกคอมพอสิต และเมทัลคอมพอสิต รายละเอียดของวัสดุคอมพอสิตแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2.1

ผงซิลิกา ซิลิกา ไททาเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซลลูโลส และเคลย์ ในการเลือกใช้อุณหภูมิ นาโนขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งานและความสามารถในการผสมเข้ากับเมทริกซ์ ในงานวิจัยนี้ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวกัน ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าและคุณสมบัติที่ดีอีกหลายประการ [11]

2.2.2 การเตรียมนาโนคอมพอสิต

การเตรียมนาโนคอมพอสิตทำได้ 3 วิธี คือ การผสมแบบ In situ polymerization การผสมแบบสารละลาย (Solution mixing) และการผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing) โดยการใช้เทคนิคในการเตรียมขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต้องการ [11]

1. การผสมแบบ In situ polymerization เตรียมโดยการผสมระหว่างอนุภาคนาโนกับมอนอเมอร์ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้เป็นพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือเติมสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก แต่มีข้อจำกัด คือ ยุ่งยากและซับซ้อน



รูปที่ 2.1 การผสมแบบ In situ polymerization [11]

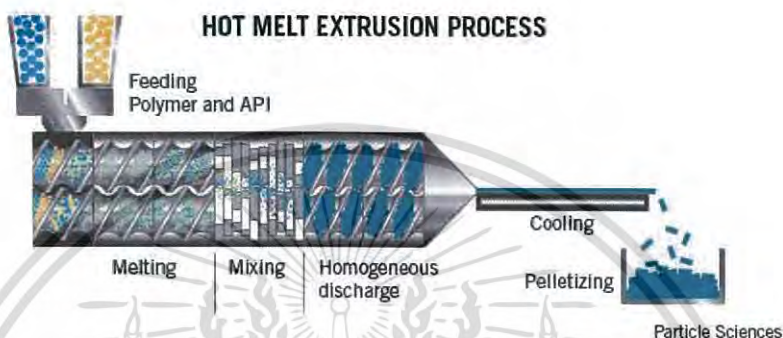
2. การผสมแบบสารละลาย เตรียมโดยการนำอนุภาคนาโนใส่ลงในสารละลาย นิยมใช้ในพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ จากนั้นผสมสารละลายกับพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน แล้วระเหยสารละลายออกเพื่อให้ได้พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับเมทริกซ์ที่มีขั้วต่ำหรือไม่มีขั้ว แต่มีข้อจำกัด คือ พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องละลายในตัวทำละลาย



รูปที่ 2.2 การผสมแบบสารละลาย [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การผสมแบบหลอมเหลว เตรียมโดยอาศัยความร้อนเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอม และอาศัยแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาคนาโน โดยทำการผสมผ่านเครื่องมือที่ใช้ผสม เช่น เครื่องอัดรีด (Extruder) และเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่เตรียมนาโนคอมพอสิตโดยใช้สารตัวเติมในปริมาณที่น้อย สารตัวเติมจะเกิดการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ แต่มีข้อจำกัดสำหรับการเตรียมนาโนคอมพอสิตที่ใช้สารตัวเติมในปริมาณที่มาก



รูปที่ 2.3 การผสมแบบหลอมเหลว [8]

การผสมแบบหลอมเหลวเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำกว่าวิธีการผสมแบบอื่นๆ และสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานอย่างต่อเนื่องได้ในกระบวนการเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกการผสมแบบหลอมเหลวในการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

2.3 พอลิยูรีเทน

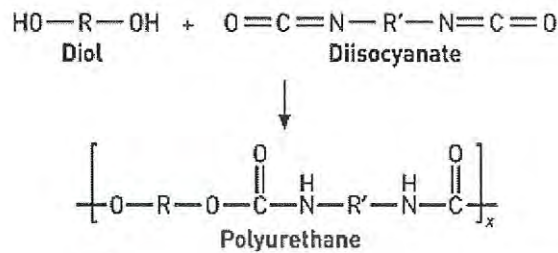
พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) เป็น Block copolymer มีทั้งชนิด Thermoplastic และ Thermoset เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Diol และ Diisocyanate โดย PU มีคุณสมบัติเด่น คือ เป็นฉนวนกันความร้อน ดูดซับเสียง ทนต่อสภาพอากาศ ทนน้ำมัน และยืดหยุ่น จึงเป็นพลาสติกที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในรูปต่างๆ ได้แก่ กาว (Adhesive), เส้นใย (Fiber), โฟม (Foam), อีลาสโตเมอร์ (Elastomer) และสารเคลือบผิว (Coating materials)

2.3.1 ปฏิกิริยาพื้นฐาน

PU เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างหมู่แอลกอฮอล์ (Alcohol) และหมู่ไอโซไซยาเนต (Isocyanate) ซึ่งหมู่แอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาต้องมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) มากกว่า 2 หมู่อยู่ใน 1 โมเลกุล ซึ่งเรียกว่า Diol หรือ Polyol ส่วนหมู่ Isocyanate ต้องมีหมู่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

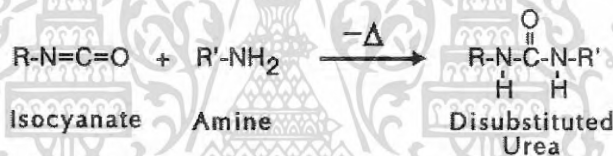
ว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า 1 หมู่ใน 1 สายโซ่ ซึ่งเรียกว่า Diisocyanate โดยการเกิดปฏิกิริยานั้นแสดงดังสมการด้านล่าง คือ [12]



รูปที่ 2.4 สมการการเกิด Polyurethane [4]

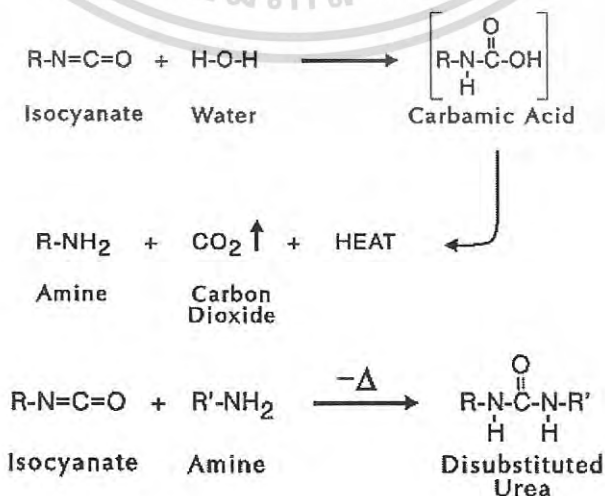
นอกจากนี้ Isocyanate สามารถทำปฏิกิริยากับสารต่างๆที่สำคัญดังนี้ [12]

1. Isocyanate ทำปฏิกิริยากับ Primary or secondary amines เกิดเป็น Urea ปฏิกิริยาแสดงดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.5 สมการการเกิด Urea [12]

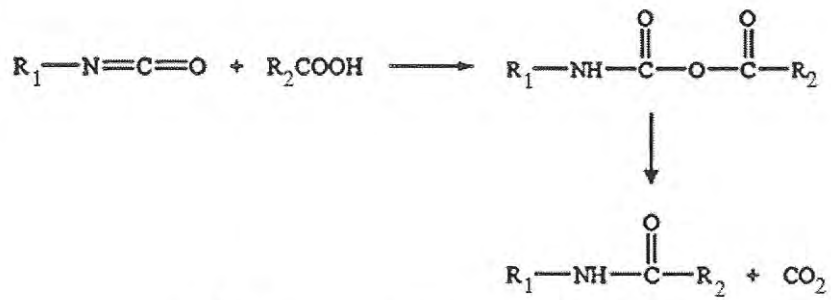
2. Isocyanate ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น Carbamic acid แล้วแตกตัวเป็น Carbon dioxide และ Amine ในขั้นตอนแรก จากนั้น Isocyanate ที่เหลือทำปฏิกิริยากับ Amine เกิดเป็น Polyurea foams



รูปที่ 2.6 สมการการเกิด Polyurea foams [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Isocyanate ทำปฏิกิริยากับ Carboxylic acid เกิดเป็น Amide



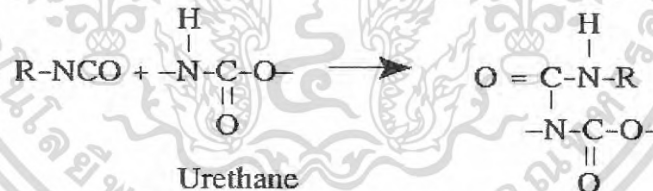
รูปที่ 2.7 สมการการเกิด Amide [12]

4. Isocyanate ทำปฏิกิริยากับ Urea เกิดเป็น Biuret



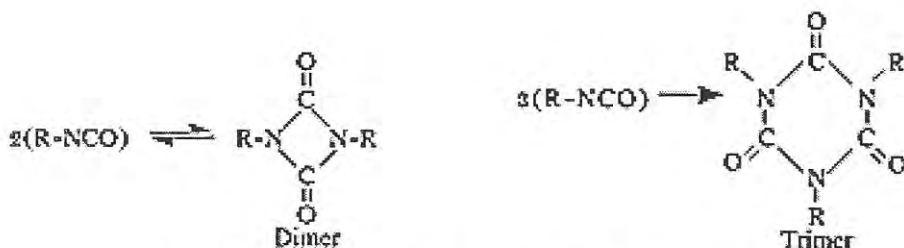
รูปที่ 2.8 สมการการเกิด Biuret [12]

5. Isocyanate ทำปฏิกิริยากับ Urethane เกิดเป็น Allophanate



รูปที่ 2.9 สมการการเกิด Allophanate [12]

6. Isocyanate ทำปฏิกิริยากับ Isocyanate เกิดเป็น Dimer และ Trimer



รูปที่ 2.10 สมการการเกิด Dimer และ Trimer [12]

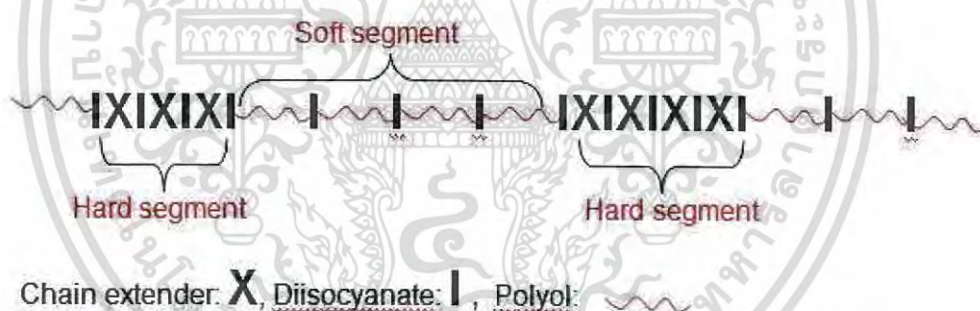
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PU แบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ [13]

1. โฟมนิ่มหรือโฟมยืดหยุ่น สามารถรองรับน้ำหนักได้ดี จึงนิยมทำเป็นเบาะรองรับสำหรับเฟอร์นิเจอร์ โฟมชนิดนี้ทนทานต่อตัวทำลายและความร้อนได้ดี
2. โฟมแข็ง (Rigid foam) คล้ายกับโฟมนิ่ม แต่มี Degree of crosslink ที่มากกว่า มีความต้านทานต่อการกด ใช้เสริมช่องว่างที่ต้องการน้ำหนักเบา เช่น ปีกเครื่องบิน โฟมชนิดนี้มีสมบัตินำความร้อนต่ำ จึงสามารถใช้เป็นฉนวนในกระติกน้ำแข็งหรือในตู้เย็น
3. ยางพอลิยูรีเทน (Polyurethane elastomer) มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยางนำไปใช้เป็นล้อยางหรือยางกันกระแทก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ Cast elastomer, Millable polyurethane และ Thermoplastic polyurethane

2.3.2 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU) เป็น Block copolymer สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยส่วนประกอบของโครงสร้างประกอบด้วย Isocyanate, Macro-glycol และ Chain extender ดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ Thermoplastic polyurethane [5]

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของ Thermoplastic polyurethane [13]

วัตถุดิบ	โครงสร้างทางเคมี
Isocyanate	$\text{OCN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NCO}$ Methylene-bis(4-phenyl isocyanate), MDI
Macro-glycol	OH-polyester-OH OH-polyether-OH
Chain extender	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ 1,4 butane diol

2.3.2.1 โครงสร้างส่วนนิ่ม

โครงสร้างส่วนนิ่มเป็นส่วนอสัณฐาน (Amorphous phase) เป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นสูงมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Polyol ที่มีหมู่ปิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ตัวอย่าง Polyol มีดังต่อไปนี้ Polyester polyol, Polyether polyol, Polycarbonate polyol และ Other polyol [14]

1. Polyester polyol

Polyester polyol ได้จากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง Di/trifunctional polyol กับ Dicarboxylic acid หรือ Acid anhydrides โดย Polyol ที่ใช้ทั่วไป คือ Ethylene glycol, 1,2-Propane diol, 1,4-Butanediol, 1,6-Hexanediol, Neopentyl glycol และ Glycerol โดย Dicarboxylic acid ที่ใช้ทั่วไป คือ Succinic acid, Glutaric acid, Adipic acid และ Phthalic anhydride โดย Polyester polyol มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดี มีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermo oxidative stability) และมีความต้านทานต่อน้ำมัน (Oil resistance) เนื่องจาก Polyester มีขั้ว ไม่ทำปฏิกิริยากับสารประเภทน้ำมัน ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว

2. Polyether polyol

Polyether polyol ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง Hydroxyl group กับ Cyclic ether หมู่ไฮดรอกซิลที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ Ethylene glycol, 1,2-Propane diol, Bisphenol A, Sucrose และ Water โดย Polyether polyol สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ต้านทานต่อการดูดน้ำ (Hydrolytic stability) ทำให้สามารถใช้งานได้ดีในที่มีความชื้นสูง เนื่องจากส่วนที่ไม่มีขั้วของ Polyether ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและต้านทานต่อจุลินทรีย์

3. Polycarbonate polyol

Polycarbonate polyol ส่วนใหญ่ได้จากกระบวนการ Transesterification ของ Dimethyl carbonate หรือ Diphenyl carbonate กับ Glycol เช่น 1,6-Hexanediol โดย Polycarbonate polyol มีความเหนียว ทนต่อสภาพอากาศ และทนต่อกระบวนการ Hydrolysis ได้สูง

4. Other polyol

Other polyol สังเคราะห์โดยใช้ Oligomer และ Polymer ที่มีหมู่ฟังก์ชัน -OH, -SH, -COOH และ -NHR ตัวอย่าง Polyol อื่นๆ คือ Polythioether, Polyacetal, Polyester amide, Alkyl resin และ Polysiloxane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 โครงสร้างส่วนแข็ง

โครงสร้างส่วนแข็งเป็น Crystalline phase เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Diisocyanate และ Chain extender สายโซ่ส่วนแข็งแสดงสมบัติด้านความแข็งแรง (Hardness) โมดูลัส (Modulus) และความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

1. Diisocyanate

Diisocyanate ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ TPU คือ 4,4'-Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) ซึ่งเป็นสารจำพวก Aromatic polyisocyanate เมื่อเปรียบเทียบกับ Aromatic polyisocyanate กับ Aliphatic และ Cycloaliphatic polyisocyanate พบว่า Aromatic polyisocyanate มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลและให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

2. Chain extender

Chain extender ทำปฏิกิริยากับ Diisocyanate เกิดเป็นส่วนของผลึก ช่วยเสริมความแข็งแรง โดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวางและเพิ่มความต้านทานความร้อน Chain extender ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ TPU คือ 1,4-Butanediol และ 1,4-Bis(2-hydroxyethoxy) benzene

2.3.3 วิธีการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

กระบวนการสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธี One-shot และ วิธี Prepolymer

[14]

1. วิธี One-shot

วิธี One-shot เป็นการเติม Diisocyanate, Polyol, Chain extender, Catalyst, สารช่วยให้ฟองคงรูป (Foam stabilizers), สารเสริมแรง (Reinforcing agents), สารตัวเติม (Fillers) และสารหน่วงการติดไฟ (Fire retardant) มาผสมในครั้งเดียว แล้วทำการ Post cure เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง

2. วิธี Prepolymer

ขั้นตอนแรกนำ Polyether หรือ Polyester polyol ทำปฏิกิริยากับ Diisocyanate ที่มากเกินไป เพื่อให้เกิดหมู่ Isocyanate อยู่ตรงปลายสายโซ่ (Isocyanate end-capped blocks) แล้วทำปฏิกิริยาขยายโซ่ในขั้นตอนที่สอง โดยทำปฏิกิริยากับ Chain extender เช่น Ethylene glycol หรือ 1,4-Butanediol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) ค้นพบครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) [17] CNT เป็นโมเลกุลของคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายแผ่นแกรฟีน ที่มีวนเป็นท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 นาโนเมตร โครงสร้างแต่ละหน่วยย่อยของผนังท่อประกอบขึ้นจากวงแหวนรูปหกเหลี่ยม คุณสมบัติเด่นของ CNT คือ มีค่าต้านทานแรงดึงสูง (Tensile strength) มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูง (Elastic modulus) และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า จึงมีการนำ CNT ไปประยุกต์ใช้งานมากมาย เช่น เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต วัสดุกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง อิเล็กโทรดในแบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุ และตัวตรวจจับก๊าซ [15]

2.4.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์

CNT สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด โดยพิจารณาตามจำนวนชั้นของผนังท่อ คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียวและคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.12






รูปที่ 2.12 การม้วนของแผ่นแกรฟีนเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ (a) SWCNT (b) MWCNT [7]

1. คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว

คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube, SWCNT) มีลักษณะเป็นแผ่นแกรฟีน 1 แผ่น ม้วนเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 นาโนเมตรมี 3 รูปแบบ โดยแบ่งตามทิศทางการม้วนของแผ่นแกรฟีน ได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral [6] ดังแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 รูปแบบโครงสร้าง Single-walled carbon nanotube [16]

รายการ	Armchair	Zigzag	Chiral
มุมมองจากด้านข้าง (Side view)			
ลักษณะการม้วน	เกิดจากการม้วน แผ่นแกรฟีนตาม แนวสมมาตรแกน ตั้ง	เกิดจากการม้วน แผ่นแกรฟีนตาม แนวสมมาตรแกน นอน	เกิดจากการม้วน แผ่นแกรฟีนด้วย มุมบิดอื่นๆ ต่าง จาก Armchair และ Zigzag

2. คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น

คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube, MWCNT) มีลักษณะเป็นแผ่นแกรฟีนม้วนเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-20 นาโนเมตร

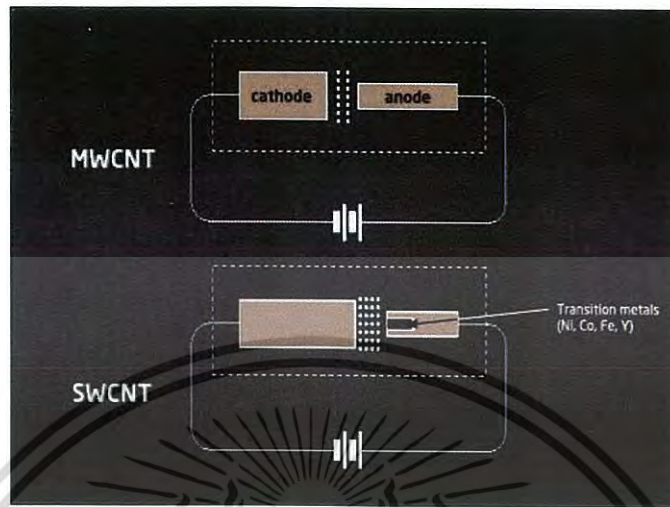
2.4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

วิธีการสังเคราะห์ CNT มีดังต่อไปนี้ [16]

2.4.2.1 Arc discharge

Arc discharge เป็นเทคนิคการสังเคราะห์ CNT โดยจ่ายกระแสไฟฟ้า กระแสตรงและความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่งแกรไฟต์ 2 แท่ง ที่ปลายแท่งวางห่างกันประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้ความดันต่ำและบรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียมหรืออาร์กอน ให้อุณหภูมิสูง บริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์เกิดการแตกตัวเป็นสถานะพลาสมาระเหย เอกสารที่กลายเป็นไอ แล้วควบแน่นกลายเป็น CNT โดยเทคนิคนี้สามารถสังเคราะห์ได้ทั้ง SWCNT และ MWCNT อย่างไรก็ตามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

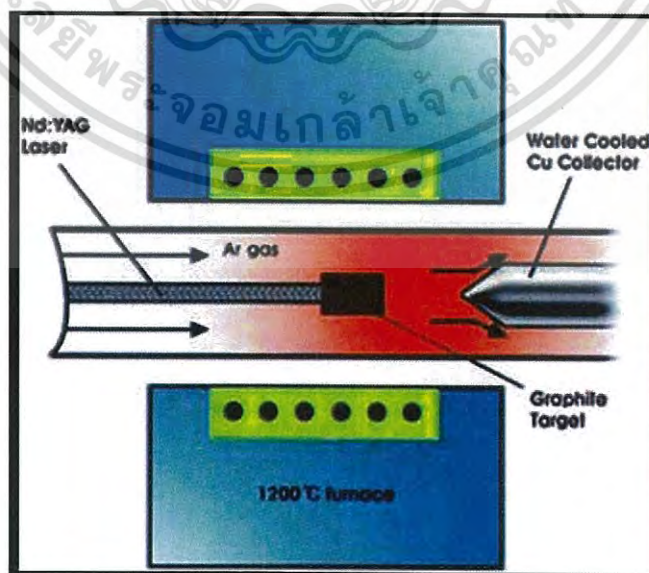
MWCNT หากไม่เติมผงโลหะคะตะลิสต์สังเคราะห์ได้ MWCNT ถ้าเติมผงโลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก โคบอลต์ หรือนิกเกิล ลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (แอโนด) จะสามารถสังเคราะห์ SWCNT ได้



รูปที่ 2.13 เทคนิค Arc discharge [17]

2.4.2.2 Laser ablation

Laser ablation เป็นเทคนิคการสังเคราะห์ CNT โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังแกรไฟต์ในเตาเผา (Furnace) ที่มีอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันต่ำและบรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียมหรืออาร์กอน ทำให้โมเลกุลและอะตอมคาร์บอนระเหยกกลายเป็นไอ แล้วควบแน่นกลายเป็น CNT โดยเทคนิคนี้คล้ายกับเทคนิค Arc discharge เมื่อเติมผงโลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก โคบอลต์หรือนิกเกิล ลงในแท่งแกรไฟต์เพื่อสังเคราะห์ SWCNT

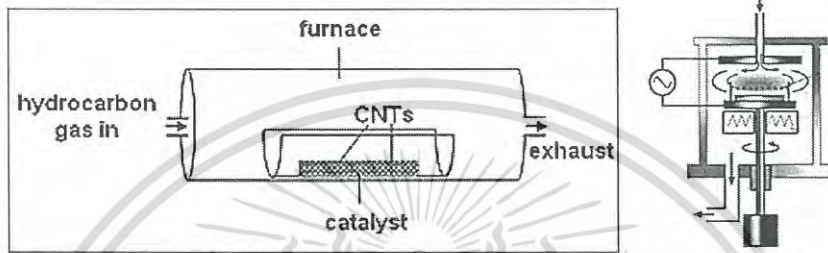


รูปที่ 2.14 เทคนิค Laser ablation [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 Chemical vapor deposition

Chemical vapor deposition (CVD) เป็นเทคนิคการสังเคราะห์ CNT โดยผ่านสารตั้งต้นซึ่งเป็นไอหรือก๊าซของแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น Methane, Acetylene, Ethylene, Ethane และ Carbon monoxide เข้าไปในแหล่งกำเนิดพลังงาน เช่น เต้าเผา พลาสมา และลวดนำไฟฟ้า ทำให้ไอของสารตั้งต้นเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน ไอเหล่านี้จะไปตกสะสมบนแผ่น Substrate ที่ทำจากซิลิกอนหรือซิลิกอนไดออกไซด์ โดยมีโลหะคละลิสต์ เช่น เหล็ก โคบอลต์ หรือนิกเกิล เคลือบอยู่บนผิว เพื่อสังเคราะห์ SWCNT และ MWCNT



รูปที่ 2.15 เทคนิค Chemical vapor deposition [16]

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสังเคราะห์ CNT ด้วยเทคนิคต่างๆ [16]

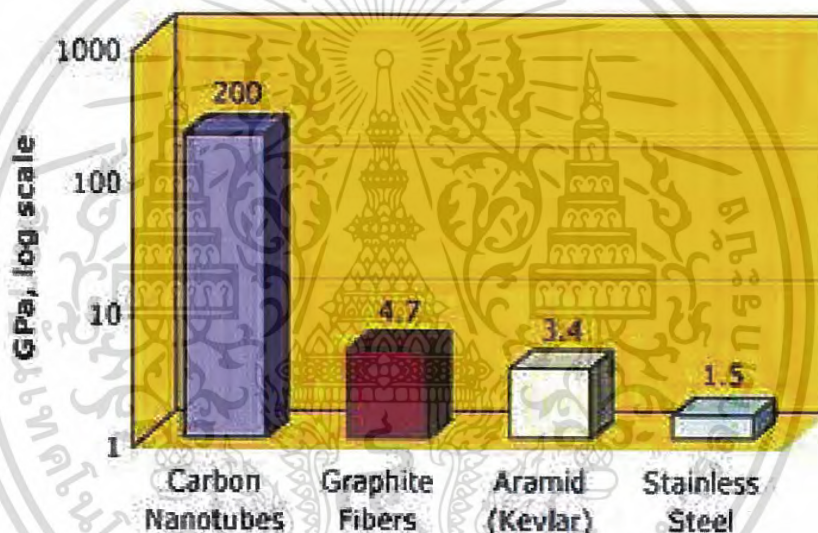
เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
Arc discharge	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นวิธีที่ง่าย 2. สามารถสังเคราะห์ SWCNT ที่มีความเป็นผลึกสูง 3. %Yield = 30-90 % 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ขนาดท่อไม่สม่ำเสมอ 2. ความยาวของท่อสั้น 3. มีสิ่งเจือปนสูง เช่น อสังฐานของคาร์บอนและซีเถ้า
Laser ablation	<ol style="list-style-type: none"> 1. ส่วนใหญ่ใช้สังเคราะห์ SWCNT ที่มีความยาวสูง 2. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3. %Yield สูงถึง 70 % 4. ได้ท่อที่มีคุณภาพสูง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ราคาแพง
CVD	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นวิธีที่ง่าย 2. สามารถสังเคราะห์ SWCNT และ MWCNT 3. %Yield = 20-100 % 4. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความยาวและจำนวนชั้นของผนังได้ดี 5. มีความบริสุทธิ์สูงถึง 90-98 % 6. ต้นทุนต่ำ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความมีระเบียบของโครงสร้างต่ำ ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะ โค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.4.3.1 สมบัติเชิงกล

เนื่องจากพันธะ C=C เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สุดในธรรมชาติ ดังนั้น CNT จึงมีความแข็งแรงต่อแรงดึงในแนวแกนของท่อและมีค่า Young's modulus สูง SWCNT มีค่า Young's modulus เกินกว่า 1 TPa ส่วน MWCNT มีค่า Young's modulus ประมาณ 1.25 TPa มีค่าความแข็งแรงต่อการดึงเท่ากับ 200 GPa ซึ่งมากกว่าเหล็กประมาณ 100 เท่า และมีน้ำหนักเบากว่าประมาณ 6 เท่า CNT เป็นอนุภาคที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้านทานการกัดกร่อนดีและมีค่า Tensile Strength สูง [16]



รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบค่า Tensile strength ของ CNT กับวัสดุต่างๆ [16]

2.4.3.2 สมบัติทางไฟฟ้า

CNT สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สมบัติทางไฟฟ้าของ CNT ขึ้นกับทิศทาง โดยการนำไฟฟ้าของ CNT ขึ้นอยู่กับทิศทางการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยมที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ โครงสร้างของ CNT ที่ต่างกันจึงส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ Armchair แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า โครงสร้างท่อแบบ Zigzag แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกึ่งตัวนำไฟฟ้า และโครงสร้างท่อแบบ Chiral มีสมบัติอยู่ระหว่าง Armchair และ Zigzag (โครงสร้างของ CNT ดังแสดงในตารางที่ 2.3) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.3 สมบัติทางความร้อน

CNT แสดงสมบัติการนำความร้อน โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้แลตทิซของของแข็งเกิดการสั่น (Lattice vibration) แล้วมีการปลดปล่อยพลังงานที่เรียกว่า โฟนอน (Phonon) จากผลกระทบของโฟนอนทำให้เกิดความสามารถนำความร้อนได้ เมื่อนำ CNT มาทำเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต [16]

2.4.4 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์

ตัวอย่างการใช้งาน CNT มีดังนี้ [16]

1. พลาสติกชนิดนำไฟฟ้า (Conductive plastic)
2. อุปกรณ์เซนเซอร์ (Nanotube actuators sensor)
3. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (Nanoelectronics)
4. วัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์กีฬา เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นสูง
5. จอภาพแบบรังสีแคโทดที่ใช้ในจอโทรทัศน์หรือจอคอมพิวเตอร์
6. อุปกรณ์ในเครื่องคอมพิวเตอร์ สายเคเบิล อุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์วัดระดับสารเคมี

2.5 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า

พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า (Electrically conductive polymer composites, ECPCs) เป็นลักษณะของการผสมกันของวัสดุพอลิเมอร์ (ทั้ง Thermoplastic หรือ Thermoset) เป็นเมทริกซ์ที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้ากับสารตัวเติมในกลุ่มที่มีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ เขม่าดำ แกรไฟต์ เส้นใยคาร์บอน และผงโลหะ เมื่อผสมกันแล้วทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีสมบัตินำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตขึ้นอยู่กับการเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาคของสารตัวเติม ค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแต่ละอนุภาคที่อยู่ใกล้กันและระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ [2]

2.5.1 กลไกการเกิดพอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า

กลไกการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยมีสารตัวเติมนำไฟฟ้ากระจายตัวแบบสุ่ม แบ่งได้เป็น 3 ทฤษฎี คือ [18]

1. ทฤษฎี Conductive path การสร้างโครงข่ายการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมในเนื้อเมทริกซ์ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งด้วยโครงข่ายของสารตัวเติม เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า ซึ่งโครงข่ายของสารตัวเติมเกิดจากอนุภาคหรือกลุ่มก้อนที่สัมผัสกันหรือติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

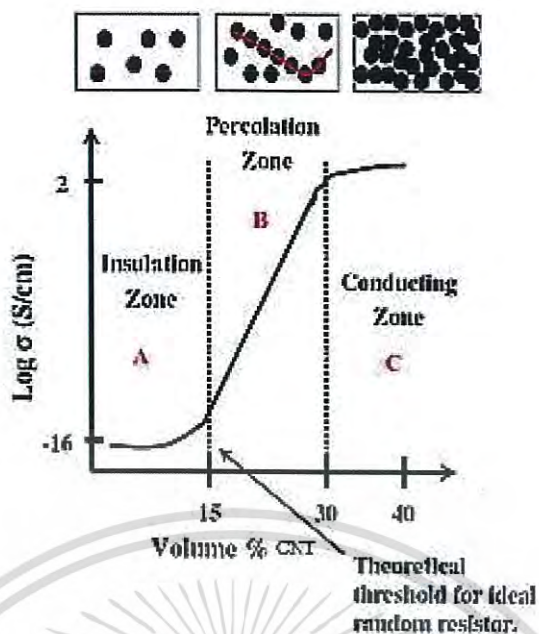
ดังนั้นการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนของสารตัวเติมสูงกว่าสัดส่วนวิกฤติ (Critical concentration หรือ percolation limit)

2. ทฤษฎี Electron tunneling การนำไฟฟ้าเกิดจากการที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดข้ามผ่านช่องว่างหรือ Tunneling ผ่านพลังงานของตัวกีดขวางระหว่างองค์ประกอบของเมทริกซ์ ซึ่งระยะห่างระหว่างช่องว่างอยู่ในช่วงที่กระโดดได้ (ระดับนาโนเมตร) ความแตกต่างระหว่างทฤษฎีแรกคือสัดส่วนสารตัวเติมวิกฤติของทฤษฎีนี้ต้องน้อยกว่าสัดส่วนวิกฤติของทฤษฎีแรก

3. ทฤษฎี Electric field radiation เป็นการนำไฟฟ้าที่มีการใช้สนามไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบ

จากทฤษฎี Conductive path สามารถอธิบายได้โดยพอลิเมอร์คอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยการเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าลงไปผสมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ด้วยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ต่างๆ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องในโครงสร้างโมเลกุลของอนุภาคนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต การที่พอลิเมอร์มีสภาพนำไฟฟ้านั้นต้องเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าในปริมาณมาก คือประมาณ 20-80% โดยปริมาตร หรือ 70% โดยน้ำหนัก เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจนเกิดการเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า (Conductive network) ทั่วตลอดพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงไปผสมในเมทริกซ์ต้องมีปริมาณเกินกว่าสัดส่วนวิกฤติ (Critical volume fraction) ที่เรียกว่า สัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (The percolation threshold) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุคอมพอสิตเปลี่ยนจากความเป็นฉนวนไฟฟ้าเป็นสารกึ่งนำไฟฟ้าหรือตัวนำไฟฟ้าได้ส่งผลให้ค่าความต้านทานของคอมพอสิตลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิตมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนโดยปริมาตร และโครงสร้างการเรียงติดกันของเฟสกระจายตัวของสารตัวเติม

ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตขึ้นกับสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยบริเวณ A มีสัดส่วนของสารตัวเติมปริมาณน้อย วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติเป็นฉนวน เรียกว่า บริเวณที่เป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation zone) เนื่องจากสารตัวเติมกระจายอยู่ในเมทริกซ์โดยไม่มีการสัมผัสกันของแต่ละอนุภาคสารตัวเติม บริเวณ B เป็นช่วงที่มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นค่าหนึ่ง เรียกว่า บริเวณการเกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (Percolation zone) และบริเวณ C มีการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมขึ้นอีกค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้าในคอมพอสิตที่สมบูรณ์ เรียกว่า บริเวณที่สามารถนำไฟฟ้าได้ (Conducting zone) [2]

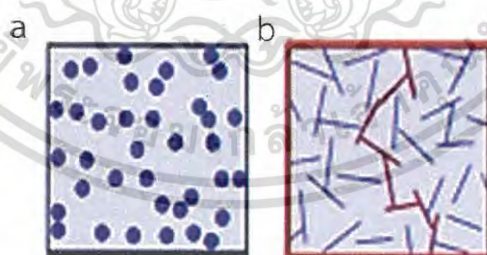


รูปที่ 2.17 กราฟแสดงสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค [2]

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีหลายปัจจัย ดังนี้ [19]

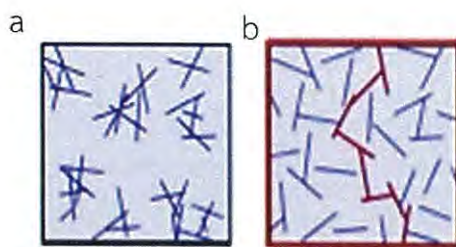
1. Aspect ratio : อนุภาคที่เป็นท่อ (Tubes particles) มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio, l/d) ที่มากกว่าอนุภาคทรงกลม (Spherical particles) มีค่าสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคต่ำกว่า (Lower percolation threshold) อนุภาคทรงกลม



รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่อกันของอนุภาค (a) อนุภาคทรงกลมและ (b) อนุภาคที่เป็นท่อ [19]

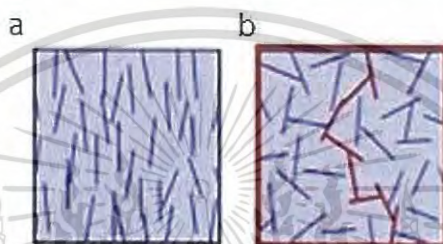
2. การกระจายตัว (Dispersion) : กลุ่มก้อน (Agglomerates) ของอนุภาคที่เป็นท่อเกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคได้ดีกว่าที่อนุภาคอยู่เป็นกลุ่มก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การกระจายตัวของอนุภาค (a) กลุ่มก้อนและ (b) อนุภาคเดี่ยว [19]

3. การจัดเรียงตัว (Orientation) : การจัดเรียงตัวแบบสุ่มเกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคมากกว่าการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคได้ดีกว่า



รูปที่ 2.20 การจัดเรียงตัวของอนุภาค (a) แบบเป็นระเบียบและ (b) แบบสุ่ม [19]

4. Tunnel effect : เป็นลักษณะการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่เป็นท่อ เมื่อผนังท่อมีความบางในระดับนาโนเมตร พบว่าอิเล็กตรอนบางส่วนสามารถเกิด Tunneling ผ่านมาอีกฝั่งหนึ่งของผนังกันได้

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต เช่น กระบวนการขึ้นรูปคอมพอสิต เนื่องจากมีผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารตัวเติม ซึ่งส่งผลกระทบต่อทิศทางการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต และสมบัติของผิวหน้าของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต เนื่องจากพลังงานอิสระของผิวหน้าของสารตัวเติมและเมทริกซ์มีอิทธิพลต่อการสัมผัสกันระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยวัสดุที่มีค่าพลังงานผิวหน้าอิสระต่างกันน้อยทำให้สามารถสัมผัสเข้ากันได้ดีกว่าทำให้มีค่าสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคต่ำกว่า [19]

2.5.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ค่าการนำไฟฟ้า (DC bulk conductivity) ของคอมพอสิตใกล้กับจุดที่คอมพอสิตเปลี่ยนจาก Insulator เป็น Conductor อธิบายได้จากสมการ Scaling power law ดังนี้

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

จากสมการ σ_c คือ ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต

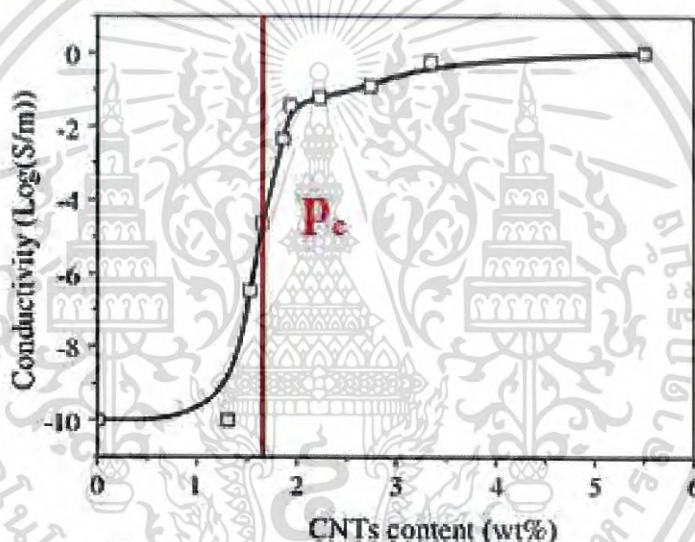
σ_o คือ ค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมนำไฟฟ้า

p คือ ความเข้มข้นของสารตัวเติมนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p_c คือ ความเข้มข้นของจุดที่เกิดการนำไฟฟ้า (Percolation threshold)
 t คือ เลขชี้กำลังวิกฤต (Critical exponents)

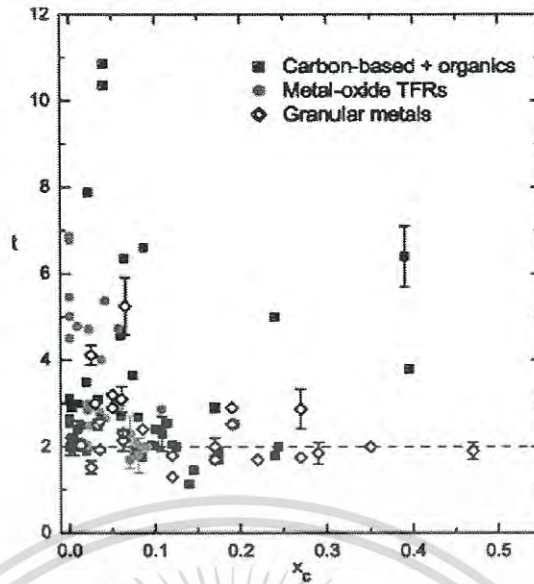
จากปรากฏการณ์ Critical percolation สามารถแบ่งการนำไฟฟ้าออกเป็น 3 ช่วง คือ Metallic or Conductor ($p > p_c$), Transition ($p \approx p_c$) และ Insulator or Dielectric ($p < p_c$) ในช่วง Conductor คอมพอสิตแสดงพฤติกรรมเหมือนโลหะไม่บริสุทธิ์ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ CNT ที่เติมลงในคอมพอสิต [19]

ในรูปที่ 2.22 แสดงกราฟระหว่างค่า Critical exponent และค่า Percolation threshold ของคอมพอสิตชนิดต่างๆ ที่วัดได้ระหว่าง Insulator-conductor จากผลการทดลองนี้ พบว่าค่า Critical exponent และค่า Percolation threshold อยู่ในช่วง $1.5 \leq t \leq 11$ และ $0.05 \leq p_c \leq 0.5$ ซึ่งประกอบด้วยคอมพอสิตต่างๆ ได้แก่ เซรามิก/พอลิเมอร์คอมพอสิต, ออกไซด์ของตัวต้านทานแบบฟิล์มหนาและฟิล์มโลหะ/สารอินทรีย์คอมพอสิต และคอมพอสิตของโลหะ/สารอินทรีย์ที่เป็นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



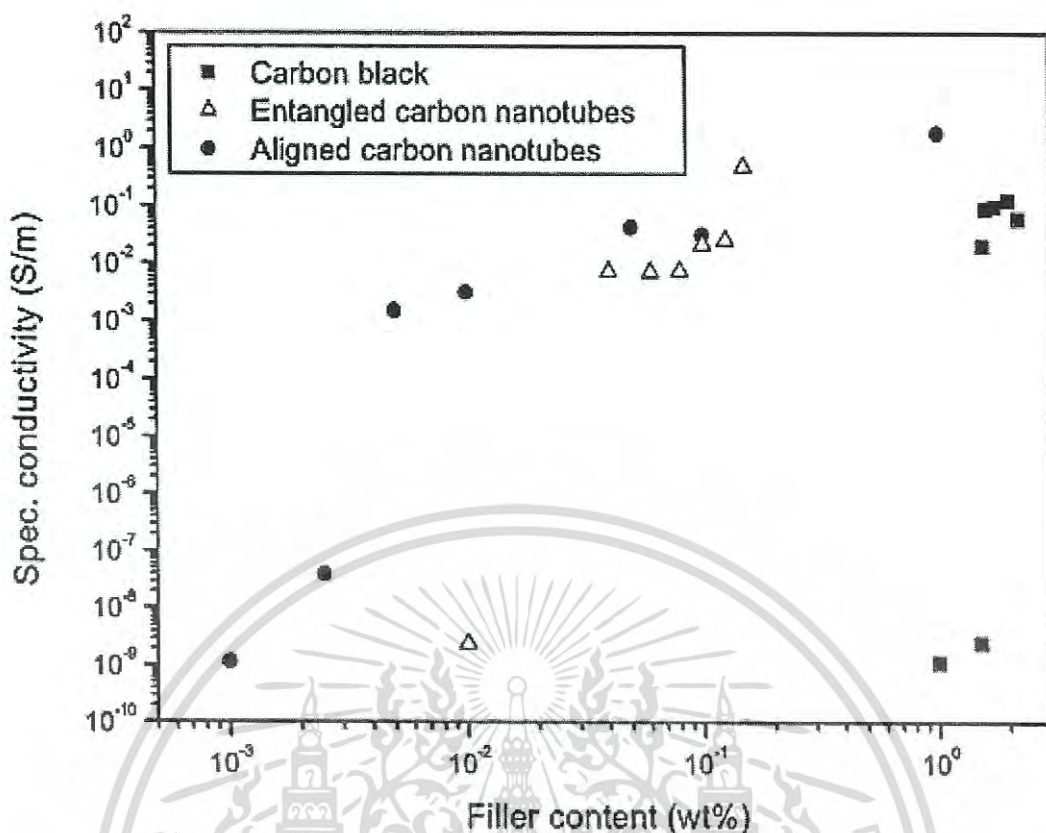
รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Critical exponent และค่า Percolation threshold ของคอมพอสิตต่างๆ ที่วัดได้ระหว่าง Insulator-conductor [20]

2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ผลกระทบจากชนิดสารตัวเติมนำไฟฟ้า

Sandler และคณะ [21] ทำการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของอีพอกซีคอมพอสิตที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกัน คือ MWCNT และ Carbon black ผลการศึกษาพบว่า MWCNT มีค่า Percolation threshold ต่ำกว่า Carbon black และมีการนำไฟฟ้าสูงสุดมากกว่า Carbon black เนื่องจากอนุภาคของ MWCNT มีลักษณะเป็นท่อจึงมีค่า Aspect ratio มากกว่า Carbon black ซึ่งมีอนุภาคทรงกลม ดังนั้น MWCNT จึงมีส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคต่ำกว่า Carbon black นอกจากนี้ Sandler และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาต่อเนื่องโดยเตรียมอีพอกซีคอมพอสิตที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน คือ Aligned MWCNT และ MWCNT ซึ่งมีสัดส่วนโดยน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 1 %wt พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการปั่นกวนด้วยแรงเฉือนสูง Aligned MWCNT มีการกระจายตัวดีกว่า MWCNT ผลการศึกษาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติม Aligned MWCNT ปริมาณมากขึ้น และหาค่า Percolation threshold ของ Aligned MWCNT คอมพอสิตจากสมการ Percolation scaling law ได้ค่าประมาณ 0.0025 %wt จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า Percolation threshold ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยก่อนหน้า [21] พบว่า Aligned MWCNT มีค่า Percolation threshold ต่ำที่สุดเมื่อทำการเตรียมภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยการผสมแบบสารละลายในตัวทำละลายเอทานอล ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าการนำไฟฟ้าของอีพอกซีคอมพอสิตกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.23

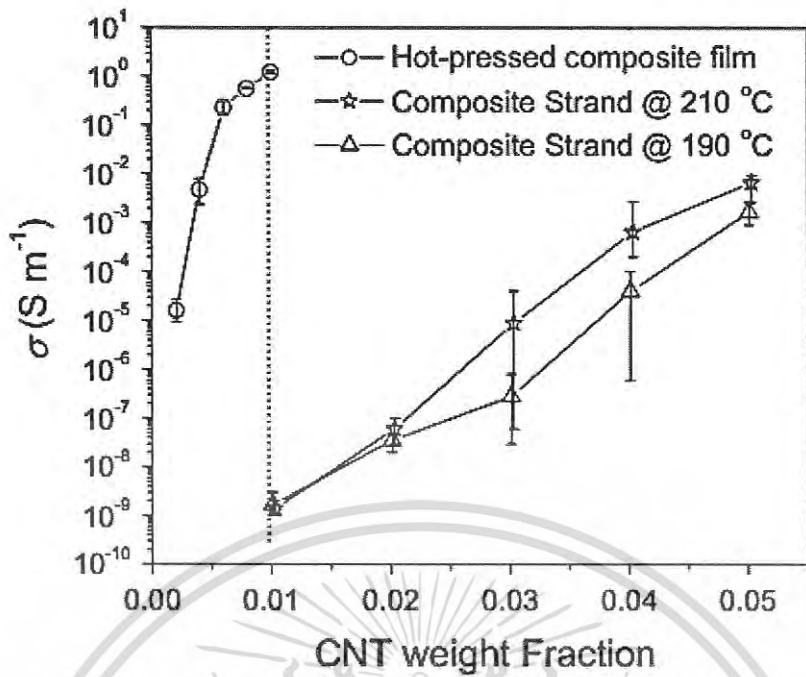
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงค่าการนำไฟฟ้าของอีพอกซีคอมพอสิตกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ (งานวิจัยของ Sandler และคณะ [22])

2.6.2 ผลกระทบจากวิธีการเตรียมนาโนคอมพอสิต

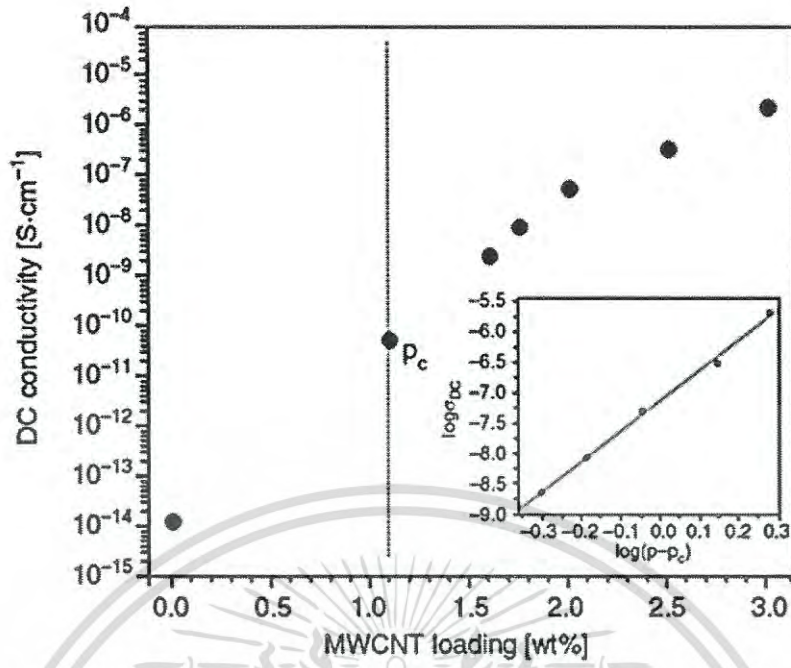
Zhang และคณะ [23] ทำการศึกษาการเกิดโครงข่ายนำไฟฟ้าใน MWCNT/PU นาโนคอมพอสิตที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปต่างกัน 2 วิธี คือ Hot-pressed films และ Extruded strands ที่อุณหภูมิ 190°C และ 210°C จากผลการศึกษาพบว่า Hot-pressed composite films มีค่า Percolation threshold ต่ำมาก (0.13 %wt) ส่วน Composite strands มีค่า Percolation threshold สูงกว่ามาก (3–4 %wt) เนื่องจาก Hot-pressed composite films ผ่านกระบวนการขึ้นรูปทั้ง 2 วิธี จึงเกิดการจัดเรียงตัวของ MWCNT 2 ครั้ง ทำให้ MWCNT มีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้าได้ดีกว่า Composite strands ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วย Extruded strands ค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของ MWCNT ดังแสดงในรูปที่ 2.24



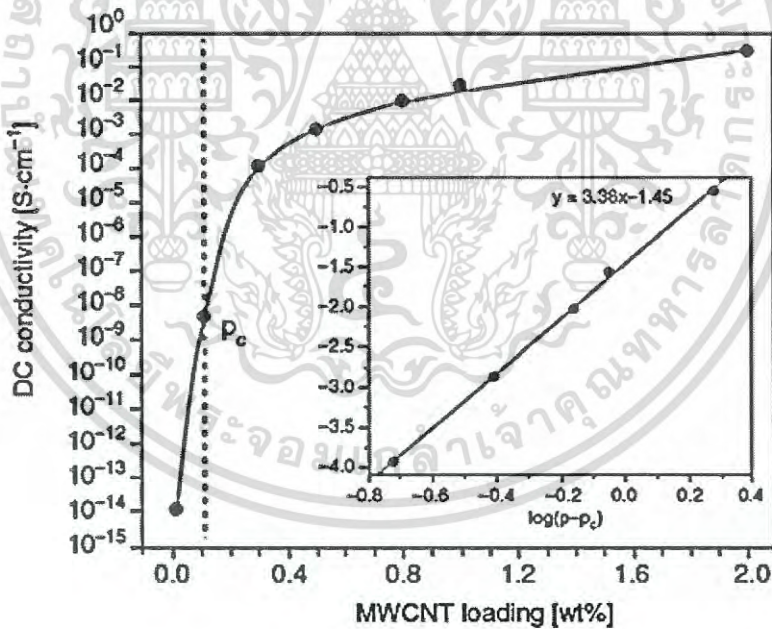
รูปที่ 2.24 กราฟแสดงค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของ MWCNT ที่ขึ้นรูปแบบ Hot-pressed films และ Extruded strands (งานวิจัยของ Zhang และคณะ [23])

2.6.3 ผลกระทบจากพารามิเตอร์ในกระบวนการเตรียมนาโนคอมพอสิต

Maiti และคณะ [24] ทำการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ polycarbonate(PC)/MWCNT นาโนคอมพอสิตด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว โดยทำการเติม MWCNT ปริมาณ 0.3 ถึง 2.0 %wt ลงใน PC โดยใช้อุณหภูมิในการผสมแตกต่างกัน คือ 280°C และ 350°C จากการศึกษาพบว่า PC/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ผสมด้วยอุณหภูมิ 350°C มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น เท่ากับ $1.38 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 0.5 %wt ซึ่งมีค่าสูงกว่านาโนคอมพอสิตที่ผสมด้วยอุณหภูมิ 280°C และมีค่า Percolation shreshold เท่ากับ 0.11 %wt ซึ่งมีค่าต่ำกว่านาโนคอมพอสิตที่ผสมด้วยอุณหภูมิ 280°C ดังแสดงในรูปที่ 2.25 เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความหนืดของ PC ในระหว่างการผสมลดลง ส่งผลให้ MWCNT สามารถกระจายตัวใน PC เมทริกซ์ได้ดีขึ้น จึงมีส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค MWCNT ต่ำกว่าการผสมที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นนาโนคอมพอสิตที่ผสมด้วยอุณหภูมิ 350°C จึงมีจุดนำไฟฟ้าต่ำและมีค่าการนำไฟฟ้าสูง



(a)



(b)

รูปที่ 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านำไฟฟ้ากับปริมาณของ MWCNT ใน PC/MWCNT นาโนคอมพอสิตเตรียมที่ (a) 280°C และ (b) 350°C (งานวิจัยของ Maiti และคณะ [24])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบ หลอมเหลว ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเตรียมนาโนคอมพอสิตต่อความเข้มข้นของ MWCNT ที่ทำให้เกิดจุดนำไฟฟ้าใน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต

ตอนที่ 2 เปรียบเทียบจุดนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต ใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนเติมที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

1. PU-ester : Desmopan 3695AU DPS101 ของบริษัท Bayer มีค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 550 kg/cm^2 , มอดุลัสที่ 100% เท่ากับ 120 kg/cm^2 และความหนาแน่น เท่ากับ 1.20 g/cm^3 [25]
2. PU-ether : Utechllan UE-95AU ของบริษัท Bayer มีค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 450 kg/cm^2 , มอดุลัสที่ 100% เท่ากับ 130 kg/cm^2 และความหนาแน่น เท่ากับ $1.14 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ [25]
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. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) รุ่น PL 2100 ของบริษัท Brabender Plasti-Corder
10. เครื่องกดอัด (Compression machine) ของบริษัท Mach Group (1992)
11. Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น 204 F1 Phoenix ของบริษัท Netzsch
12. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7610F ของบริษัท JEOL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. LCR Meter รุ่น E4980A ของบริษัท Agilent

14. Universal Testing Machine รุ่น Model LRK-2kN Load cell 2 kN ของบริษัท NTS Technology

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต

เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตระหว่าง PU และ MWCNT โดยการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่อง Brabender มีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. เตรียมเม็ด PU โดยนำเม็ด PU ทั้ง 2 ชนิด อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. อบไล่ความชื้น MWCNT ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. ชั่ง PU แต่ละสูตร สูตรละ 55 กรัมและชั่ง MWCNT โดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการเตรียม ดังนี้
 - 3.1 ความเข้มข้นของ MWCNT = 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2 และ 1.5 %wt
 - 3.2 PU-ester/MWCNT อุณหภูมิในการผสม 190°C และ 200°C เป็นเวลา 10 นาที และ PU-ether/MWCNT อุณหภูมิในการผสม 200°C และ 210°C เป็นเวลา 8 นาที
 - 3.3 กำหนดให้ความเร็วในการหมุนสกรู 60 rpm

3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต

หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตแล้ว นำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดด้วย Compression machine โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 1 mm และมีสภาวะในการขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต

วัสดุนาโนคอมพอสิต	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการ Preheat (นาที)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)	เวลาในการหล่อเย็น(นาที)
PU-ester/MWCNT	200	16	5	5
PU-ether/MWCNT	200	16	5	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอลสิต

3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

DSC (Differential Scanning Calorimeter) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์วัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก และการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ตัวอย่างถูกวางบนจานอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาควบคุมอุณหภูมิ โดยภายในเตามีสารอ้างอิงซึ่งเป็นจานอะลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน ความสามารถในการวิเคราะห์ของ DSC ได้แก่ จุดหลอมเหลว (Melting points) ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ค่าพลศาสตร์ (Kinetics) ความบริสุทธิ์ของวัสดุ (Purity of materials) ความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal stability) การเปลี่ยนสถานะ (Phase transition) และสภาพเป็นผลึก (Crystallinity) [26]

ข้อมูลที่ได้จากเทคนิค DSC ใช้ในการศึกษาการแยกตัวของ PU ในวัฏภาคโครงสร้าง ส่วนแข็งและส่วนนิ่มในวัสดุนาโนคอมพอลสิต ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ คือ PU-ester, PU-ether และ PU/MWCNT นาโนคอมพอลสิตที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการตัดชิ้นงานให้มีน้ำหนักประมาณ 12-13 มิลลิกรัม ใส่ในจานอะลูมิเนียมชนิดมีฝาปิด ในการทดสอบ กำหนดสภาวะการทดสอบแบบ Heat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิทดสอบระหว่าง -70 ถึง 250°C อัตราการเพิ่มหรือลดของอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ลักษณะสภาวะการทดสอบ



รูปที่ 3.1 เครื่อง DSC รุ่น 204 F1 Phoenix ของบริษัท Netzsch [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM

FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านั้นผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี ทำให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ออกมาจากแต่ละจุดบนวัตถุซึ่งมุมและความเร็วของอิเล็กตรอนทุติยภูมิสัมพันธ์กับโครงสร้างพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ แล้วถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป ภาพที่ได้จาก FESEM เป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีความลึกและมีความละเอียด (Resolution) สูงถึง 1.5 nm [28]

ในงานวิจัยนี้ใช้ FESEM ในการศึกษารายละเอียดของโครงสร้างภายนอกหรือผิวของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างสำหรับ FESEM ทำโดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทดสอบเชิงกลจนแตกหักแล้วตัดให้มีลักษณะเป็นแท่งประมาณ 2-3 mm เคลือบผิวตัวอย่างด้วย Platinum จากนั้นถ่ายภาพเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไป



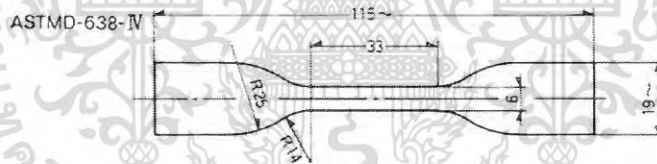
รูปที่ 3.2 FESEM รุ่น JSM-7610F ของบริษัท JEOL [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM

UTM (Universal Testing Machine) เป็นเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลชนิด Static สามารถทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ทดสอบแรงกด (Compressive test) ทดสอบแรงดึง (Tensile test) ทดสอบแรงบิด (Torsion test) ทดสอบแรงดัด (Bending test) และทดสอบแรงเฉือน (Shear test) ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบแรงดึง โดยวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ได้แก่ มอดูลัสที่ 100%, ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และ (Toughness) การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่ขนาดและรูปร่าง ตามมาตรฐาน ที่นิยม ได้แก่ ชิ้นงานตัวอย่างมีรูปร่างคล้าย “ดัมเบลล์” (Dumb-bell) โดยใช้ที่จับหรือปากจับ (Grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงและความเร็วในการดึงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทำโดยตัดชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นรูป ดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้ Load cell เท่ากับ 2 kN และ Crosshead speeds 50 mm/min ซึ่งปลายของตัวอย่างถูกยึดด้วยที่จับและถูกดึงให้ยืดออกจนขาด นำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain curve) [30]



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างรูปร่างดัมเบลล์สำหรับการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV [31]

3.4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter

LCR Meter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า โดยสามารถวัดการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance, L), ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C) และความต้านทาน (Resistance, R) ของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง LCR Meter ในการวัดความต้านทานในช่วงความถี่ 20×10^6 Hz ทำการทดสอบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ กำหนดฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบ คือ Lp-Rp และความต่างศักย์ 10 V

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้าทำโดยตัดชิ้นงานนาโนคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปให้มีความกว้าง 10 mm ความยาว 10 mm และความหนา 1 mm นำสายไฟมาต่อกับชิ้นงานตัวอย่างด้วยกาวอีพอกซีชนิดนำไฟฟ้า แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อบ่มกาว (Curing) จากนั้นทา Silver paint ให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดที่ต่อกับสายไฟ ชิ้นงาน

ตัวอย่างที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง LCR ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Meter นำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้แปลงเป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume resistivity) โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นแปลงเป็นค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) โดยใช้สมการที่ 2 แล้วนำค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความถี่ [32]



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า

$$\text{Volume resistivity} = \frac{\text{Resistance} \times \text{Cross section area}}{\text{Length}} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

$$\text{Conductivity (S/cm)} = \frac{1}{\text{Volume resistivity}} \quad (\text{สมการที่ 2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

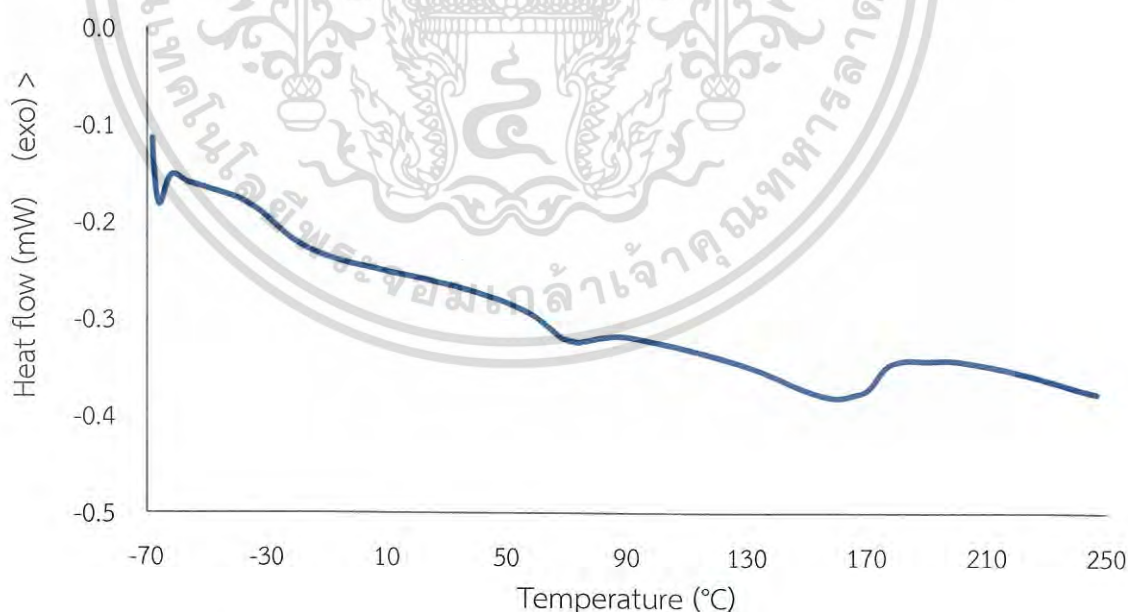
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

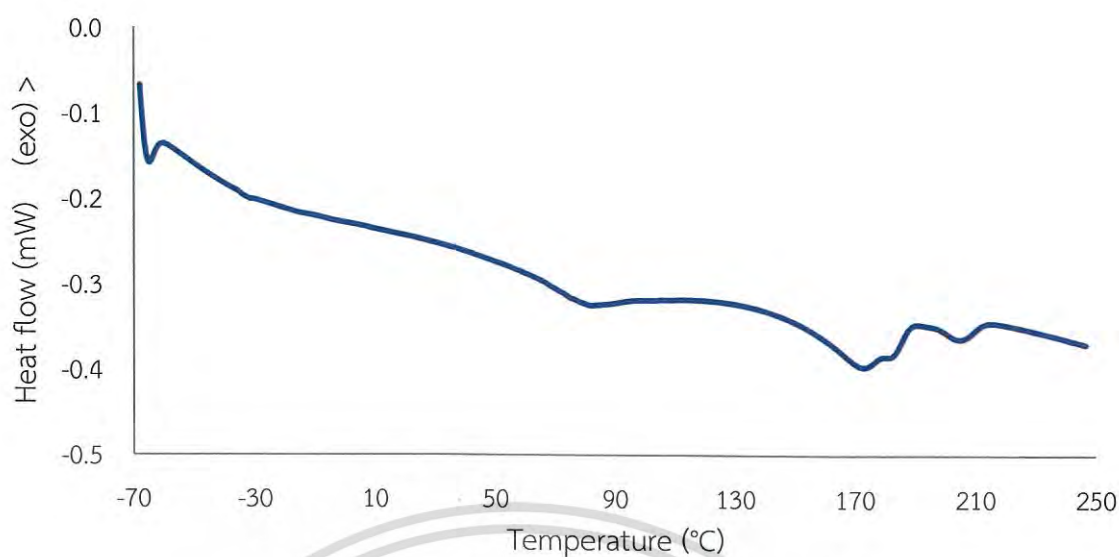
PU เป็น Block copolymer ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ โครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็ง นอกจากนั้นอาจจะพบบริเวณที่โครงสร้างทั้งสองผสมกันอยู่ (Mixed phase) ได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ PU ด้วยเทคนิค DSC ทำให้สามารถพบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนต่างๆ ได้ดังนี้ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่ม ($T_{g(SS)}$), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนแข็ง ($T_{g(HS)}$), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็งที่ผสมกัน ($T_{g(MP)}$), อุณหภูมิในการหลอมเหลว หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อุณหภูมิที่เกิด Microphase mixing (T_{MMT}), และอุณหภูมิในการเกิดผลึก หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อุณหภูมิที่เกิด Microphase separation (T_{MST})

ในการทดสอบภายใต้สภาวะการให้ความร้อนจะสามารถพบค่า $T_{g(SS)}$, $T_{g(MP)}$, T_{MMT} และ $\Delta H_{(MMT)}$ (พลังงานที่ใช้ในการหลอมให้โครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็งผสมกัน) ลักษณะกราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟ DSC ของ MWCNT/PU-ester นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟ DSC ของ MWCNT/PU-ether นาโนคอมพอสิต

ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ PU-ester/MWCNT และ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต

สูตร	T _{g(SS)}	T _{g(MP)}	T _{MMT}		ΔH _(MMT)
			A	B	
Unfilled Es-190	-22.7	67.4	165.3	-	14.41
0.3 Es-190	-24.3	66.4	162.7	-	14.16
0.5 Es-190	-25.5	66.8	162.8	-	12.71
0.8 Es-190	-25.1	65.3	160.8	-	12.03
1.2 Es-190	-31.9	64.3	160.1	-	13.67
1.5 Es-190	-24.3	66.1	163.0	-	13.14
2.0 Es-190	-25.4	63.0	160.5	-	12.67
5.0 Es-190	-25.2	63.3	160.5	-	11.76
Unfilled Es-200	-25.2	67.6	161.8	-	14.61
0.3 Es-200	-27.0	69.5	161.7	-	12.58
0.5 Es-200	-26.1	69.0	160.0	-	12.35
0.8 Es-200	-25.4	65.2	162.9	-	12.94
1.2 Es-200	-26.2	66.8	161.3	-	12.82
1.5 Es-200	-29.0	63.8	161.6	-	11.65
2.0 Es-200	-26.5	62.8	163.0	-	12.69
5.0 Es-200	-27.3	64.7	157.6	-	12.21

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 188.5 ไร่ ประโยชน์ 12.21 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

สูตร	$T_{g(MP)}$	T_{MMT1}		T_{MMT2}	$\Delta H_{(MMT)}$
		A	B		
Unfilled Et-200	75.0	173.3	182.8	-	15.34
0.3 Et-200	73.8	173.0	182.6	208.7	12.46
0.5 Et-200	70.4	174.5	182.5	207.3	11.10
0.8 Et-200	68.9	173.7	-	206.7	10.93
1.2 Et-200	70.1	173.9	182.4	206.7	11.06
1.5 Et-200	74.1	171.3	183.4	205.0	10.51
Unfilled Et-210	69.8	174.4	182.9	-	15.09
0.3 Et-210	67.4	173.2	184.9	206.1	9.44
0.5 Et-210	75.0	173.9	183.9	208.5	11.81
0.8 Et-210	70.5	174.6	184.4	207.8	10.91
1.2 Et-210	71.4	173.7	183.2	205.3	11.51
1.5 Et-210	69.2	173.1	182.5	205.1	10.21

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต พบ $T_{g(SS)}$, $T_{g(MP)}$, T_{MMT} และ $\Delta H_{(MMT)}$ ค่า $T_{g(SS)}$ ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตต่ำกว่า $T_{g(SS)}$ ของ Unfilled PU-ester ที่ทำการผสมด้วยอุณหภูมิ 190 และ 200 °C แสดงว่าโครงสร้างส่วนนี้มีการแยกตัวออกมามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT พบว่าค่า $T_{g(SS)}$ ไม่มีแนวโน้มอย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วไปแล้วหากวัสดุมีความเป็นผลึกมาก ค่า T_{MMT} หรือ $\Delta H_{(MMT)}$ จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเติม MWCNT นาโนคอมพอสิตมีค่า T_{MMT} และ $\Delta H_{(MMT)}$ ต่ำลง อีกทั้งยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT แสดงว่า MWCNT ที่เติมลงไปจะเข้าไปกระจายในโครงสร้างส่วนแข็ง ทำให้ขีดขวางการเกิดผลึก แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการผสมเป็น 200 °C พบว่าค่า T_{MMT} และ $\Delta H_{(MMT)}$ ไม่มีแนวโน้มที่มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT แต่ที่ MWCNT 5.0 %wt พบค่า T_{MMT} สองค่า (พีก T_{MMT} แยกเป็น 2 พีก) แสดงถึงโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและมีการเกิดผลึก ดังนั้นสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิการผสม 200 °C MWCNT สามารถเข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งได้มากกว่าที่อุณหภูมิการผสม 190 °C ดังนั้นที่อุณหภูมิการผสม 200 °C จึงอาจไม่มีแนวโน้มที่มีนัยสำคัญของค่า T_{MMT} และ $\Delta H_{(MMT)}$ เมื่อปริมาณ MWCNT มากขึ้น

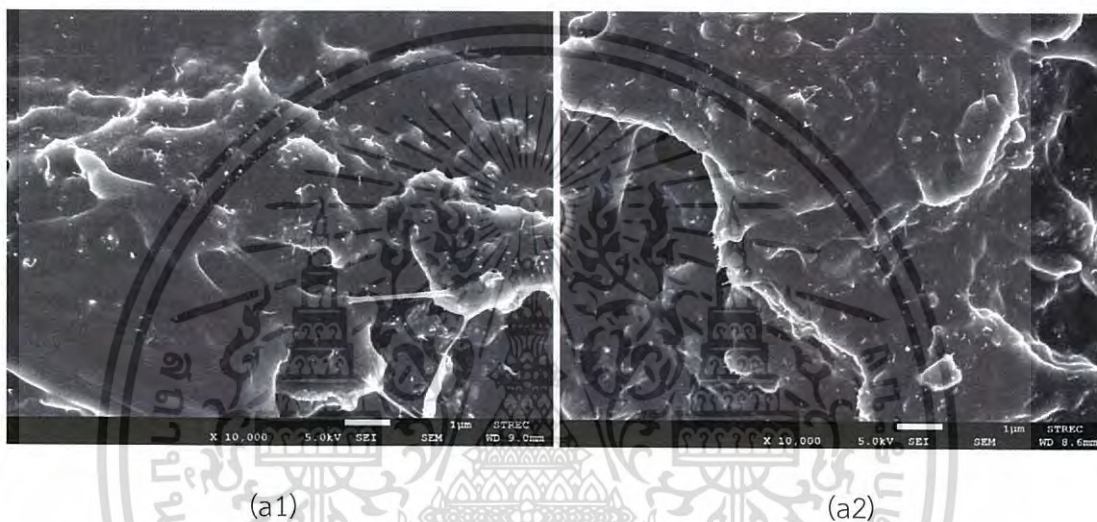
ในตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต พบ $T_{g(MP)}$, T_{MMT} และ $\Delta H_{(MMT)}$ กล่าวถึงมีแนวโน้มของ $T_{g(MP)}$ ลดลงเมื่อเติม MWCNT แสดงถึงการเกิด Microphase separation โครงสร้างส่วนแข็งมีการแยกตัวออกมา นอกจากนี้เมื่อทำการเติม MWCNT ให้เป็นนาโนคอมพอสิต พบการแยกเป็น 2 พีกของ T_{MMT} (T_{MMT1} และ T_{MMT2}) เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MWCNT ที่เติมลงไปเข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนึ่ม จึงส่งผลให้เกิดผลึกของโครงสร้างส่วนแข็งมากขึ้น

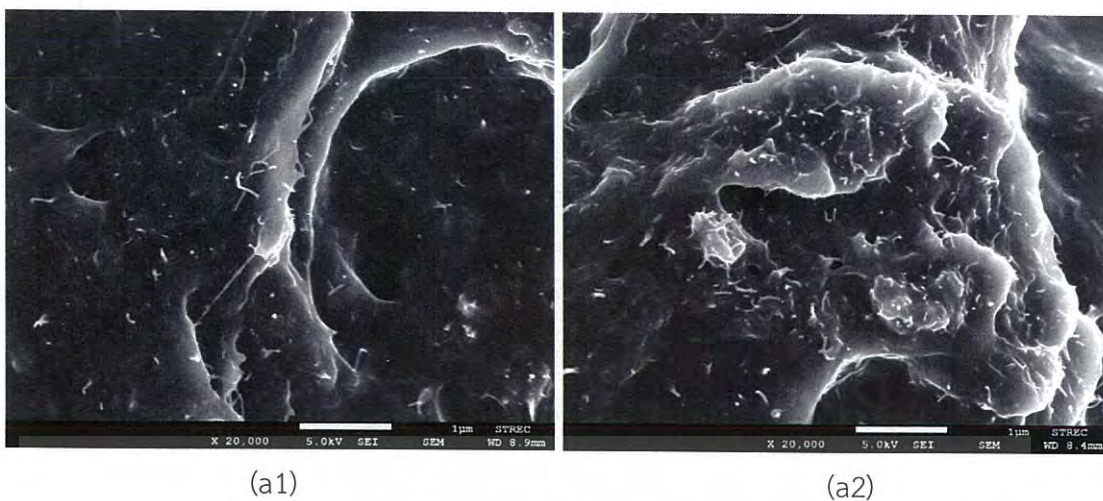
4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM

ในการวิจัยนี้ใช้ FESEM เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค MWCNT ในวัสดุนาโนคอมพอสิต ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 โดยบริเวณที่เป็นจุดสว่าง คือ MWCNT



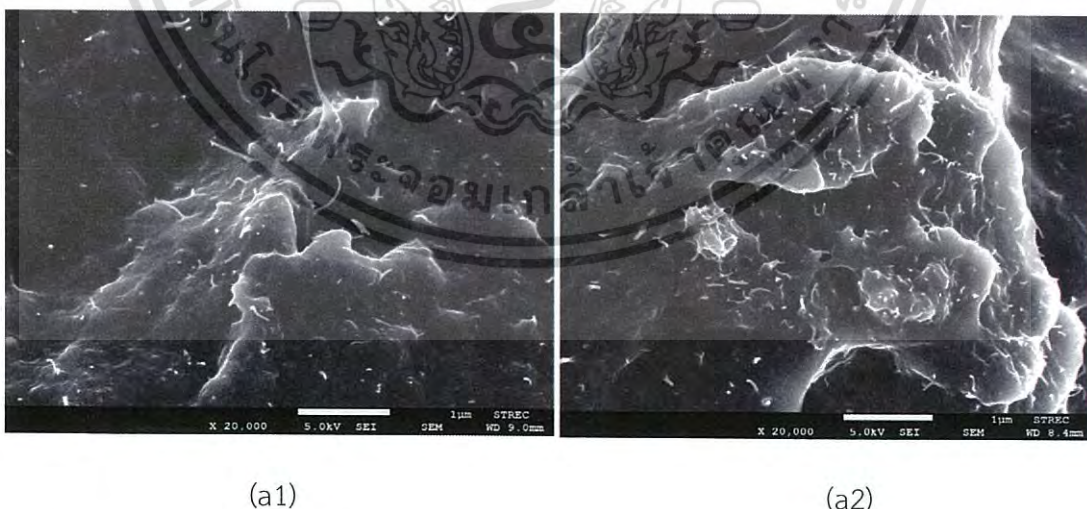
รูปที่ 4.3 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 10000$ เท่าของ (a1) 1.5 Es-190 และ (a2) 1.5 Es-200

จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT ในชิ้นงาน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตโดยรูป (a1) และ (a2) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 1.5 %wt โดยใช้อุณหภูมิการผสมต่างกันที่ 190°C และ 200°C ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ MWCNT ที่อุณหภูมิการผสม 200°C มีการกระจายตัวอยู่ใน PU-ester เมทริกซ์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิการผสม 190°C ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมิการผสมสูงขึ้น ส่งผลให้ MWCNT เกิดการกระจายตัวใน PU-ester เมทริกซ์ได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 และ (a2) 0.3 Et-210

จากรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT ในชิ้นงาน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตโดยรูป (a1) และ (a2) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.3 %wt โดยใช้อุณหภูมิการผสมต่างกันที่ 200°C และ 210°C ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ MWCNT ที่อุณหภูมิการผสม 210°C มีการกระจายตัวอยู่ใน PU-ether เมทริกซ์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิการผสม 200°C โดยผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ PU-ester นาโนคอมพอสิตที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ MWCNT สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความหนืดหลอมเหลวของ PU เมทริกซ์ลดลง MWCNT จึงสามารถกระจายตัวได้ดีนั่นเอง



รูปที่ 4.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (a2) PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบความเข้ากันระหว่าง MWCNT กับ PU ในชิ้นงาน PU/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยรูป (a1) เป็น PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตและ (a2) เป็น PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต สังเกตเห็นว่ารูป (a1) เห็นท่อ MWCNT ยื่นออกมาอย่างชัดเจน แสดงว่า MWCNT กับ PU-ester เข้ากันไม่ได้ดี ส่วนรูป (a2) สังเกตเห็น PU-ether เมทริกซ์มีการห่อหุ้ม MWCNT ในชิ้นงานที่แตกหัก แสดงว่า MWCNT กับ PU-ether เข้ากันได้ดี

4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM

ในการวิจัยนี้ใช้ UTM เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุนาโนคอมพอสิต ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.3

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

สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Toughness (J/m ³)
Unfilled Es-190	10.0±0.5	46.6±3.0	497.3±26.9	129.4±9.4
0.3 Es-190	8.9±2.6	35.4±0.1	491.5±24.7	117.8±12.6
0.5 Es-190	12.5±0.9	38.5±4.4	361.9±17.3	95.5±8.1
0.8 Es-190	12.4±0.2	38.8±3.3	398.7±33.1	126.0±12.1
1.2 Es-190	12.3±0.3	42.7±4.1	456.8±70.8	137.6±7.8
1.5 Es-190	12.5±0.7	36.2±4.4	451.4±28.5	127.3±14.6
Unfilled Es-200	8.3±0.3	35.9±5.3	493.5±27.0	126.5±15.4
0.3 Es-200	10.2±2.6	35.3±4.7	501.4±63.7	182.6±0.3
0.5 Es-200	9.6±0.5	35.2±2.0	465.2±49.8	95.3±12.9
0.8 Es-200	9.4±0.6	38.3±7.2	455.7±55.7	82.1±6.9
1.2 Es-200	10.3±0.6	38.4±6.7	475.7±30.2	116.9±11.4
1.5 Es-200	11.4±0.5	39.3±10.2	479.6±33.4	123.5±16.3

จากตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติเชิงกลต่างๆ (Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness) ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ MWCNT ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้อุณหภูมิในการผสม 190°C และ 200°C พบว่าค่าที่ Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ไม่มีแนวโน้มที่มียัยสำคัญ โดย Tensile strength มีค่าอยู่ในช่วง 35-46 MPa, % Elongation at break มีค่าอยู่ในช่วง 360-500 % และ Toughness มี

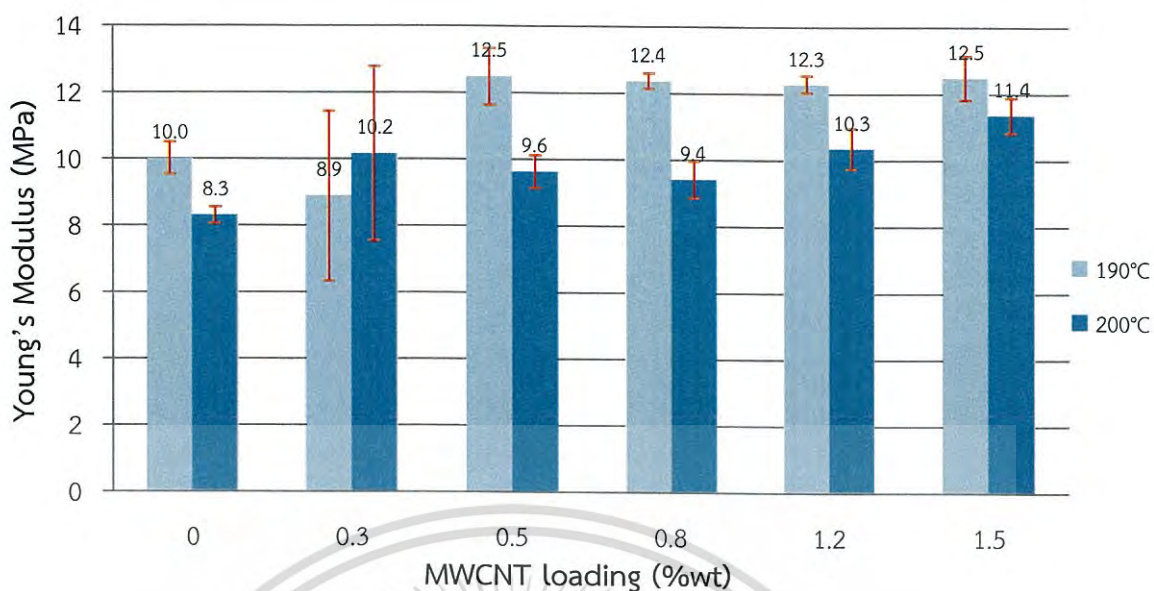
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอยู่ในช่วง 82-183 J/m^3 ส่วนค่า Young's Modulus มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น MWCNT ดังแสดงในรูปที่ 4.6a

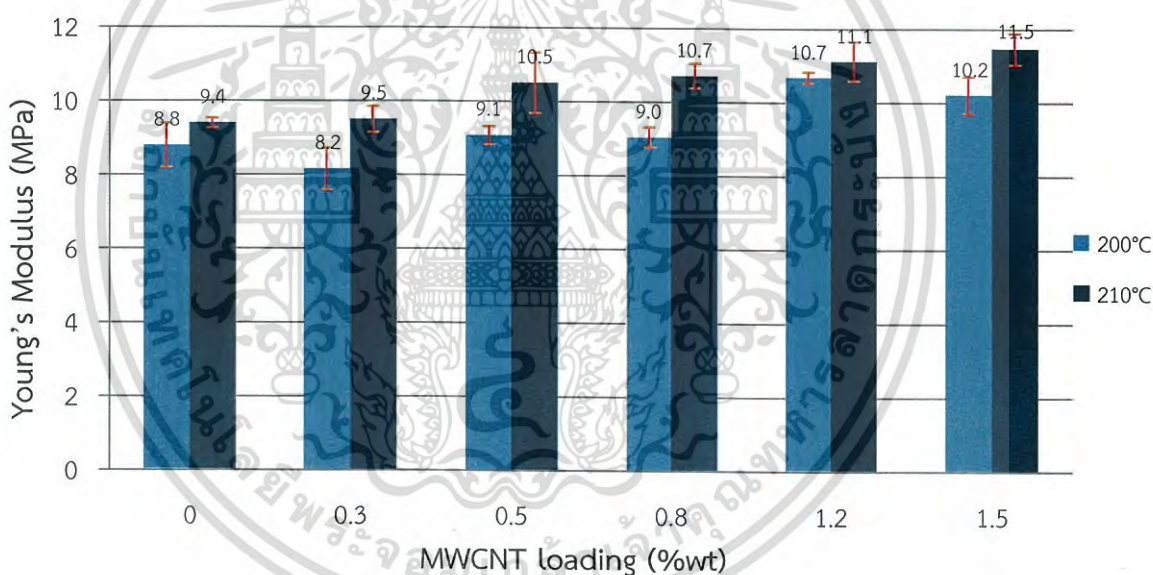
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต

สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Toughness (J/m^3)
Unfilled Et-200	8.8±0.6	28.4±3.7	465.1±22.5	100.4±8.4
0.3 Et-200	8.2±0.6	25.2±5.0	415.4±0.4	84.1±14.4
0.5 Et-200	9.1±0.3	25.3±3.4	449.6±26.5	106.0±5.6
0.8 Et-200	9.0±0.3	24.1±1.4	439.8±11.7	86.8±5.5
1.2 Et-200	10.7±0.2	31.1±4.5	479.3±6.3	119.9±3.3
1.5 Et-200	10.2±0.5	25.9±3.5	539.4±21.5	130.5±8.9
Unfilled Et-210	9.4±0.1	41.0±5.3	599.3±17.4	115.9±13.6
0.3 Et-210	9.5±0.4	31.2±5.2	504.5±31.4	94.5±14.8
0.5 Et-210	10.5±0.8	33.5±2.6	469.5±26.8	130.6±4.3
0.8 Et-210	10.7±0.3	35.3±2.1	453.0 ±37.2	109.4±16.7
1.2 Et-210	11.1±0.5	27.9±4.3	477.3±23.6	133.7±21.3
1.5 Et-210	11.5±0.4	26.8±1.1	520.5±40.6	135.6±7.3

จากตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติเชิงกลต่างๆ (Young's Modulus, Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness) ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ MWCNT ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้อุณหภูมิในการผสม 200°C และ 210°C พบว่าค่า Tensile strength, % Elongation at break และ Toughness ไม่มีแนวโน้มที่มียสำคัญ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับที่พบใน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดย Tensile strength มีค่าอยู่ในช่วง 25-41 MPa, % Elongation at break มีค่าอยู่ในช่วง 415-600% และ Toughness มีอยู่ในช่วง 84-135 J/m^3 ส่วน Young's Modulus มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ MWCNT ดังแสดงในรูปที่ 4.6b



(a)



(b)

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับปริมาณ MWCNT โดยใช้อุณหภูมิในการผสมต่างกัน (a) PU-ester และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต

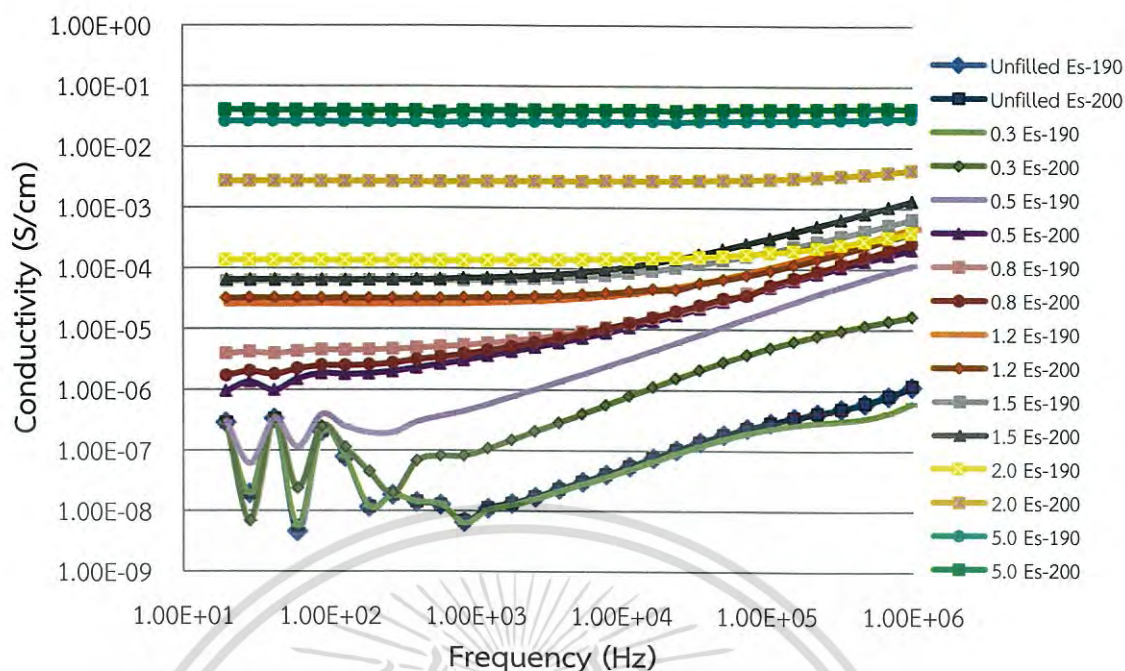
จากค่า Young's Modulus ในรูปที่ 4.6a ของ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ใช้ อุณหภูมิในการผสม 190°C และ 200°C พบว่าในทั้งสองอุณหภูมิการผสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้น MWCNT ตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.5 %wt ค่า Young's Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 25% เนื่องจาก MWCNT เกิดการกระจายตัวใน PU เมทริกซ์ส่วนแข็ง ดังนั้น MWCNT จึงช่วยเสริมแรง PU เมทริกซ์ ส่งผลให้วัสดุนาโนคอมพอสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น โดย PU-ester/MWCNT นาโน

เอกสารไม่เพียงแต่ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลอื่นๆ อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การนำ MWCNT มาใช้ร่วมกับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต อาจต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ของ MWCNT เช่น การกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ การเกิด agglomeration และการนำไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุได้

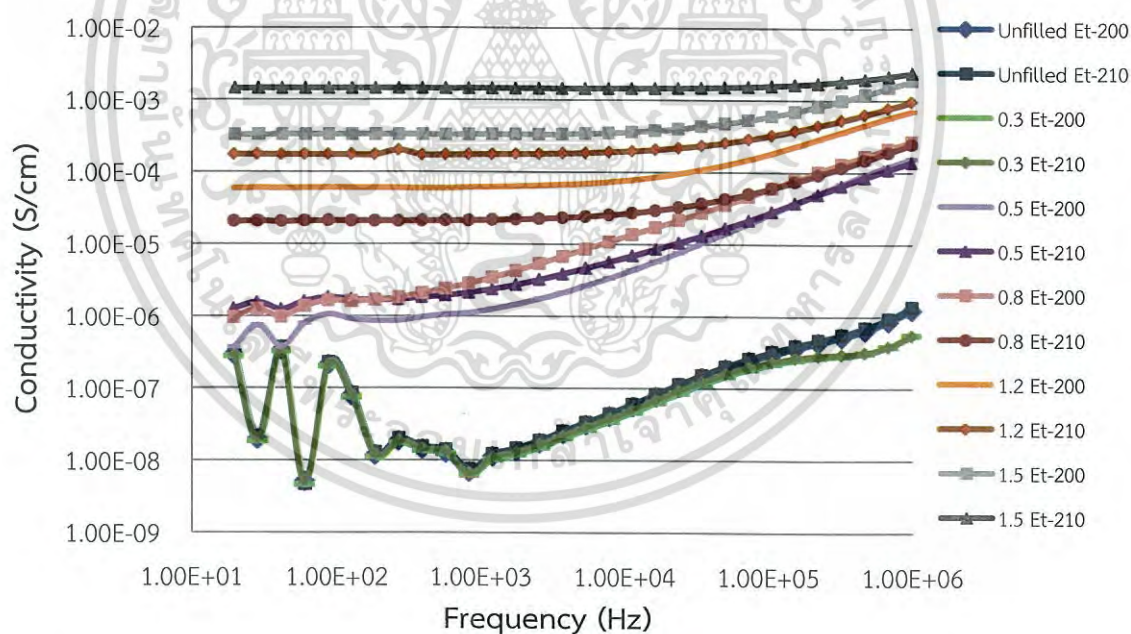
คอมพอสิตพบค่า Young's Modulus สูงสุดที่ 1.5 %wt (12.5 ± 0.7 MPa) ณ อุณหภูมิการผสม 190°C ส่วนรูปที่ 4.6b แสดงค่า Young's Modulus ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่ใช้ อุณหภูมิในการผสม 200°C และ 210°C พบว่าที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น MWCNT ตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.5 %wt ค่า Young's Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 10% ในทั้งสองอุณหภูมิการผสม เนื่องจาก MWCNT เกิดการกระจายตัวใน PU เมทริกซ์ส่วนนิ่ม โดย PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตพบ ค่า Young's Modulus สูงสุดที่ 1.5 %wt (11.5 ± 0.4 MPa) ณ อุณหภูมิการผสม 210°C จึงสรุปได้ ว่าที่ความเข้มข้น MWCNT เท่ากัน PU-ether ใช้อุณหภูมิในการผสมสูงกว่า PU-ester เนื่องจาก MWCNT กระจายตัวในส่วนนิ่มซึ่งมีความเหนียวและมีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ MWCNT เกิดการกระจายตัวได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิในการผสมที่สูงกว่า PU-ester เพื่อให้ MWCNT สามารถเกิดการกระจายตัวในส่วนนิ่มและเกิดการเสริมแรงใน PU เมทริกซ์ดีขึ้น เพื่อให้วัสดุนาโนคอมพอสิตมีค่า Young's Modulus สูงขึ้น

4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter

การศึกษาค่านำไฟฟ้าของ MWCNT/PU-ester และ MWCNT/PU-ether นาโนคอมพอสิต โดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่ 20 ถึง 1×10^6 Hz เมื่อนำไปแปลงเป็นค่าการนำไฟฟ้า พบว่า MWCNT/PU-ester นาโนคอมพอสิตที่เติม MWCNT ปริมาณ 5.0 %wt และทำการผสมที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่ 4.32×10^{-2} S/cm ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ส่วน MWCNT/PU-ether นาโนคอมพอสิตที่เติม MWCNT ปริมาณ 1.5 %wt และทำการผสมที่อุณหภูมิ 210°C มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.39×10^{-3} S/cm ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester นาโนคอมพอสิต

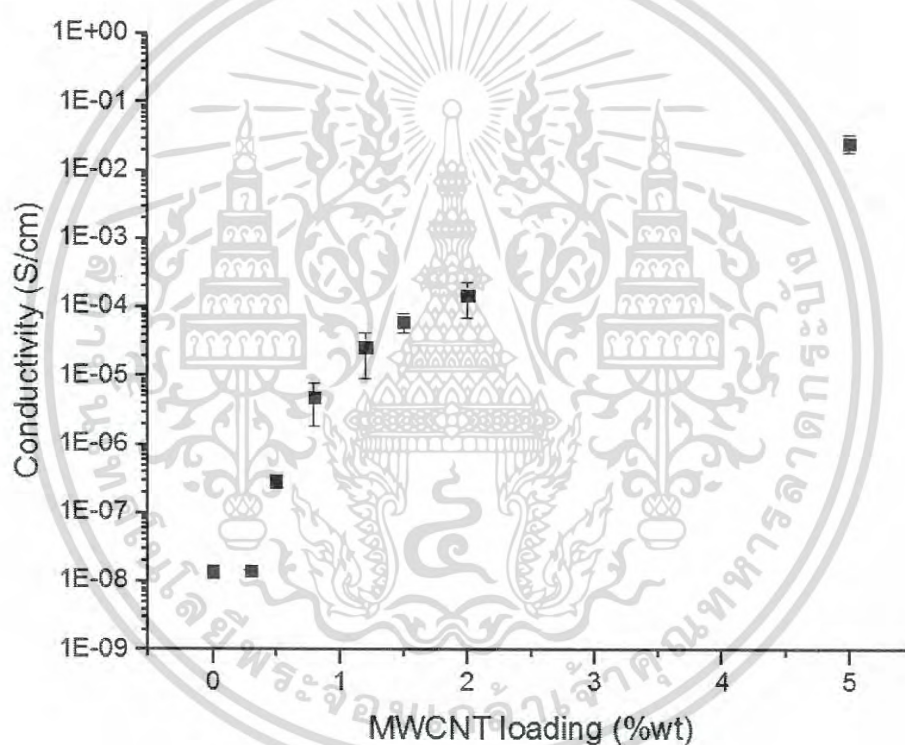


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.7 เห็นได้ว่า PU-ester ที่ไม่เติม MWCNT (Unfilled Es-190 และ Unfilled Es-200) และ MWCNT/PU-ester นาโนคอมพอสิตที่เติม MWCNT ปริมาณ 0.3 %wt ในช่วงความถี่ 1 ถึง 200 Hz มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเริ่มคงที่และเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จนถึง 5.0 %wt พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ตลอดทั้งช่วง

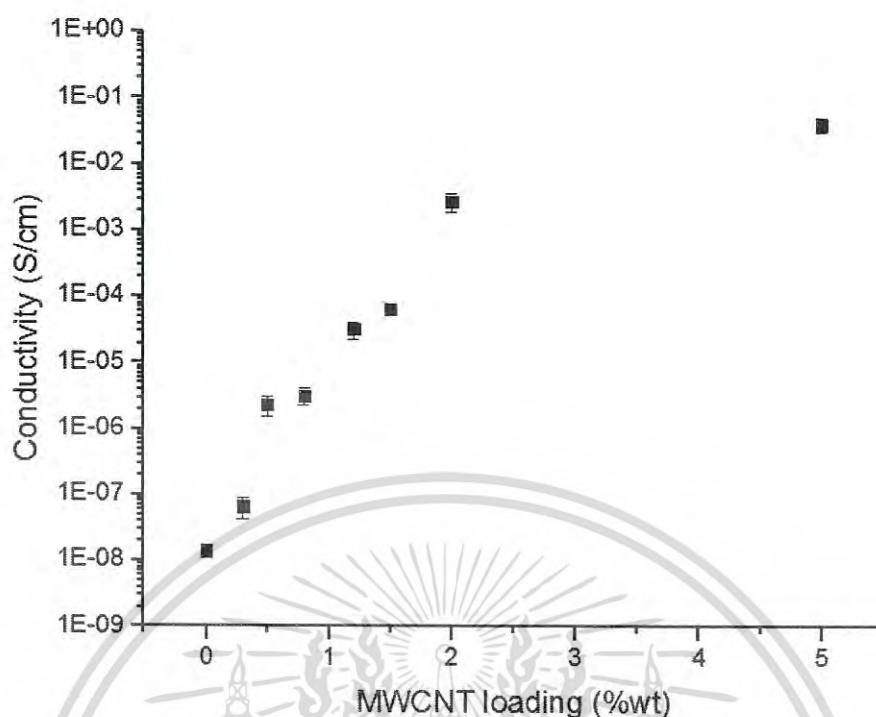
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ แสดงว่าเมื่อเติม MWCNT ลงใน PU-ester ปริมาณ 5.0 %wt ความถี่ไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิต ส่วนรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่า MWCNT/PU-ether นาโนคอมพอสิตที่ไม่เติม MWCNT (Unfilled Et-200 และ Unfilled Et-210) และ MWCNT/PU-ether นาโนคอมพอสิตที่เติมปริมาณ MWCNT จนถึง 0.5 %wt ในช่วงความถี่ 1 ถึง 200 Hz มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ หลังจากนั้นค่าการนำไฟฟ้าเริ่มคงที่และเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ MWCNT จนถึง 1.5 %wt พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ตลอดทั้งช่วงความถี่ แสดงว่าเมื่อเติม MWCNT ลงใน PU-ether ปริมาณ 1.5 %wt ความถี่ไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิต จึงกำหนดค่าความถี่ที่ 395.6 Hz เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ที่เติมลงในนาโนคอมพอสิต เนื่องจากนาโนคอมพอสิตที่เติม MWCNT ปริมาณต่างๆ แสดงว่าการนำไฟฟ้าคงที่



(a)

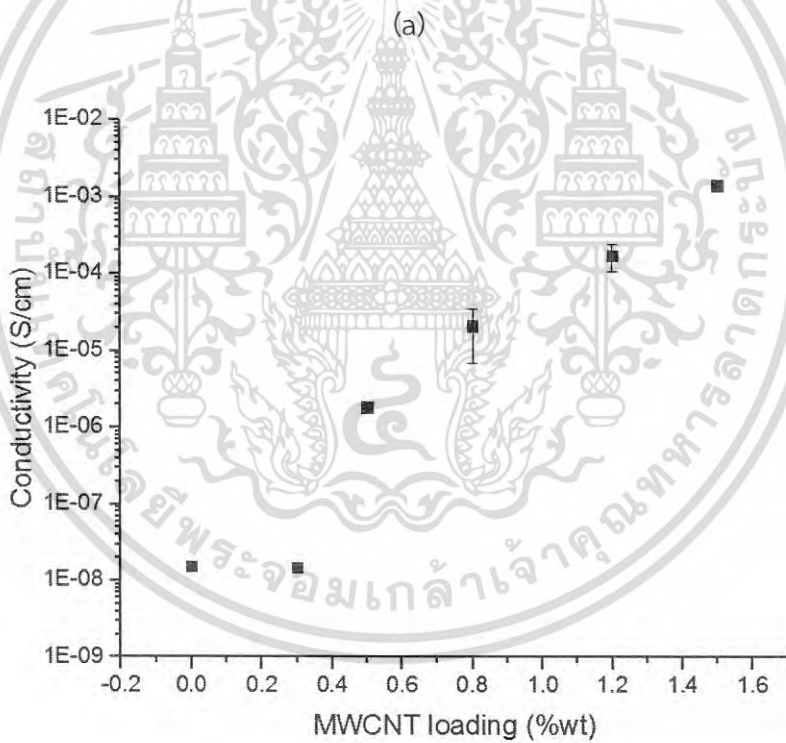
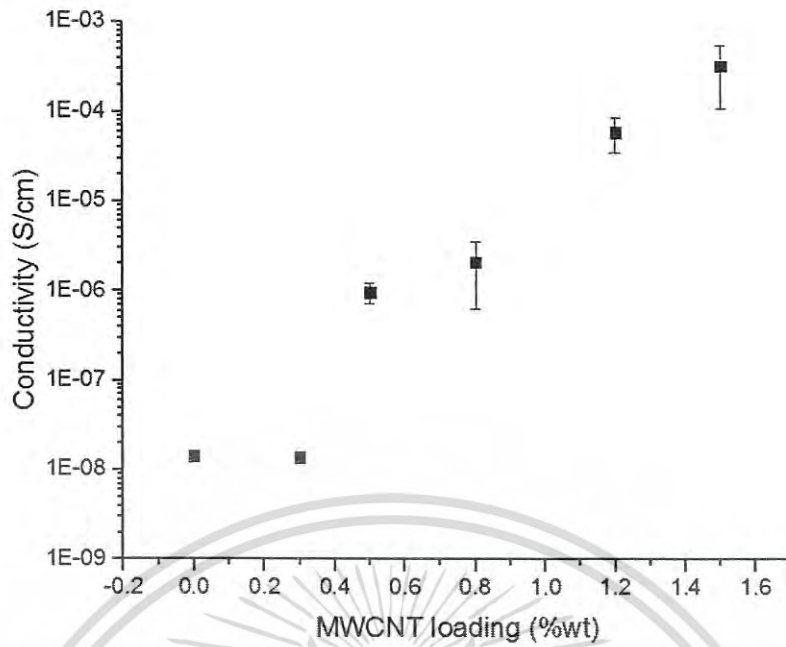
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ที่เติมลงใน PU-ester นาโนคอมพอสิต โดยใช้อุณหภูมิในการผสม (a) 190°C และ (b) 200°C

จากรูปที่ 4.9a แสดงให้เห็นว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 190°C เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 0.5 %wt มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1 Magnitude ของ Unfilled PU-ester โดยค่าการนำไฟฟ้าเริ่มเปลี่ยนจากฉนวนไฟฟ้าไปเป็นตัวนำไฟฟ้าและเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.62×10^{-2} S/cm เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 5.0 %wt ส่วนรูปที่ 4.9b แสดงให้เห็นว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 200°C มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยเพิ่มขึ้น 2 Magnitude ของ Unfilled PU-ester ซึ่งเปลี่ยนจากฉนวนไฟฟ้าไปเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เติม MWCNT ปริมาณ 0.5 %wt และมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดที่ 4.03×10^{-2} S/cm เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 5.0 %wt

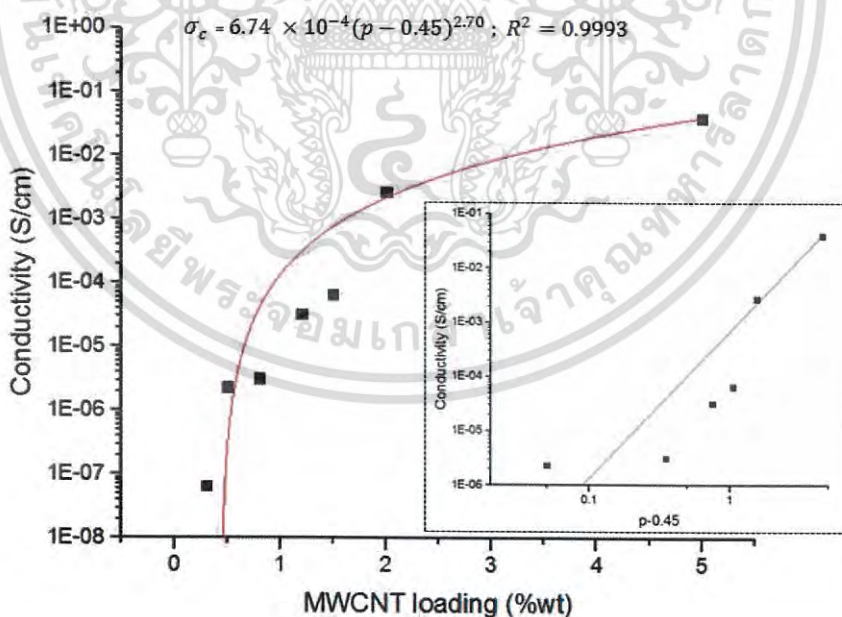
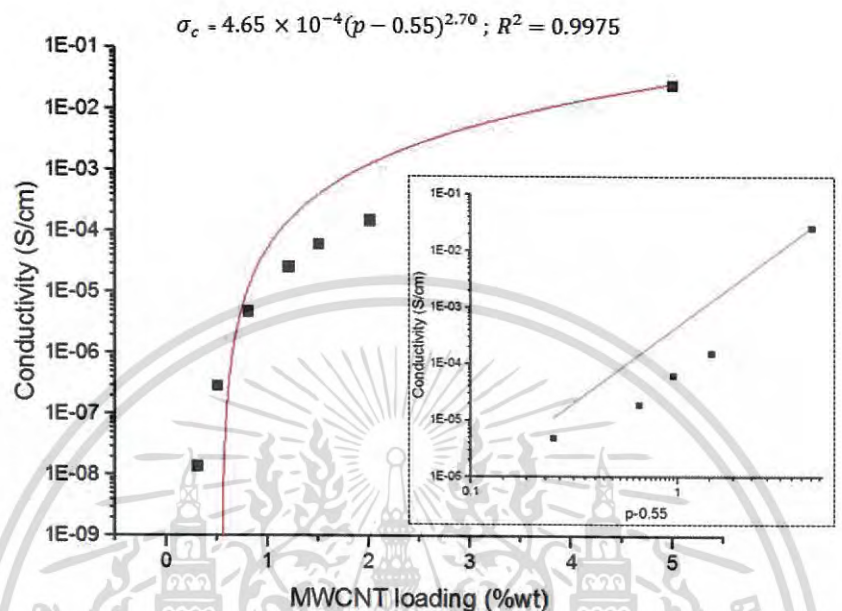


(b)

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ที่เติมลงใน PU-ether นาโนคอมพอสิต โดยใช้อุณหภูมิในการผสม (a) 200°C และ (b) 210°C

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 200°C และ 210°C มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 Magnitude ของ Unfilled PU-ether เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 0.5 %wt ซึ่งเปลี่ยนจากฉนวนไฟฟ้าไปเป็นตัวนำไฟฟ้า และมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าสูงสุดที่ 3.30×10^{-4} S/cm และ 1.44×10^{-3} S/cm ตามลำดับ เมื่อเติม MWCNT ปริมาณ 1.5 %wt



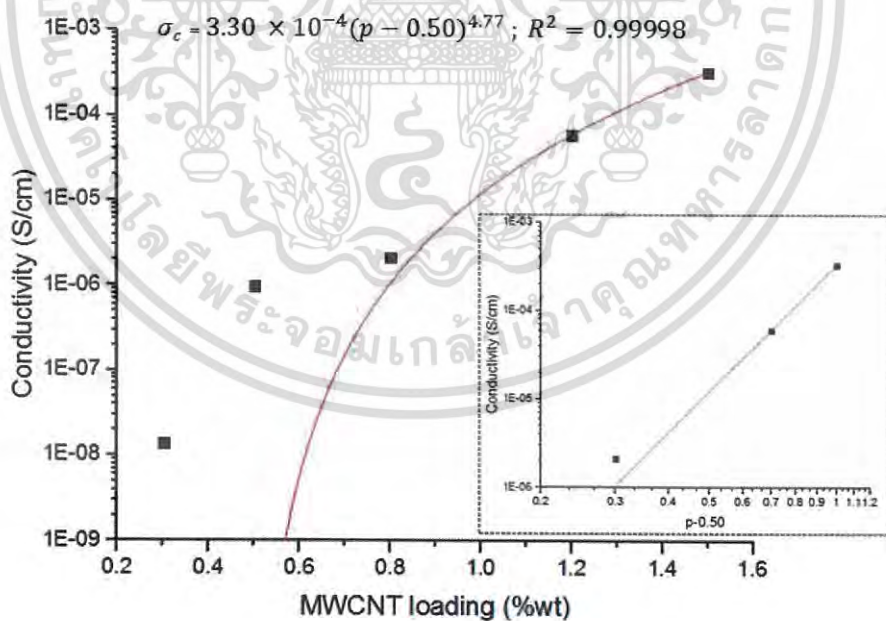
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ด้วย

Percolation theory ใน PU-ester นาโนคอมพอสิต โดยใช้ข้อมูลทฤษฎีในการผสม (a) 190°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ และ (b) 200°C ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

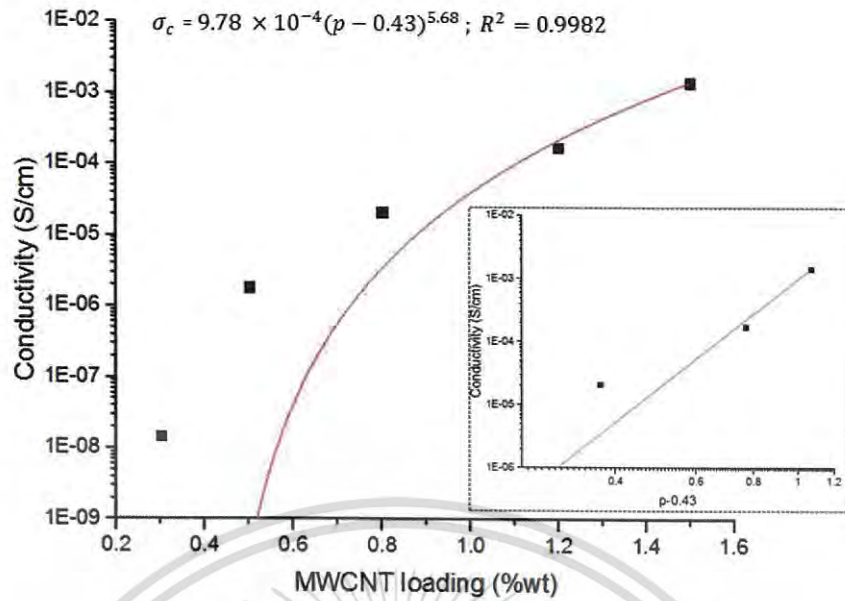
จากรูปที่ 4.11 แสดงการทำ Curve fitting เพื่อวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าของนาโนคอมพอสิต, ค่า p_c (Percolation threshold) และค่า t (t exponent) ด้วย Percolation theory โดยใช้โปรแกรม Origin และใช้ค่า $p-p_c$ ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 %wt ซึ่งเป็นช่วงที่กราฟมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ดังแสดงในรูปที่ 4.11a) โดยเปลี่ยนจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้า ในการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับ $p-p_c$ แล้วปรับเส้นกราฟจนได้กราฟเส้นตรงที่เหมาะสมกับข้อมูลที่สุด (ค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด) จากการวิเคราะห์พบว่า PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 190°C ได้ค่า p_c เท่ากับ 0.55 %wt และค่า t เท่ากับ 2.70 แสดงดังรูปที่ 4.10a ส่วน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 200°C ได้ค่า p_c เท่ากับ 0.45 %wt และค่า t เท่ากับ 2.70 ดังแสดงในรูปที่ 4.11b

จากค่า t ซึ่งเป็นค่าแบบ Universal แสดงว่านาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 190°C และ 200°C ทำให้อุณหภูมิ MWCNT เกิดการสร้างโครงข่ายนำไฟฟ้าเป็นรูปแบบ 5 มิติ (Hypercubic) ใน PU เมทริกซ์ส่วนแข็ง เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการเตรียมนาโนคอมพอสิตทั้ง 2 อุณหภูมิจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 200°C มีค่า p_c ต่ำกว่าที่ 190°C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ PU มีความหนืดลดลง ทำให้ MWCNT กระจายตัวใน PU เมทริกซ์ได้ดีขึ้น จึงเกิดเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องใน PU เมทริกซ์ได้มากกว่า ดังนั้น PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 200°C จึงมีจุดที่เกิดการนำไฟฟ้าต่ำกว่าการเตรียมที่ 190°C



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ด้วย Percolation theory ใน PU-ether นาโนคอมพอสิต PU-ether โดยใช้ข้อมูลในการผสม (a) 200°C และ (b) 210°C

จากรูปที่ 4.12 แสดงการทำ Curve fitting เพื่อหาค่า $p-p_c$ และ t โดยใช้ค่า p_c ในช่วง 0.3 ถึง 0.6 %wt เนื่องจากในรูปที่ 4.10 ช่วงนี้เป็นช่วงที่กราฟมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัด จึงทำการวิเคราะห์ด้วย Percolation theory เหมือนกับที่วิเคราะห์ใน PU-ether นาโนคอมพอสิต พบว่า PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 200°C ได้ค่า p_c เท่ากับ 0.50 %wt และค่า t เท่ากับ 4.77 แสดงดังรูปที่ 4.12a ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 210°C ได้ค่า p_c เท่ากับ 0.43 %wt และค่า t เท่ากับ 5.68 ดังแสดงในรูปที่ 4.12b

จากค่า t ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยทั้ง 2 อุณหภูมิ พบว่าค่า t เป็นแบบ Non-universal แสดงว่าอนุภาค MWCNT มีการเกิด Tunneling effect เนื่องจาก MWCNT มีอนุภาคเป็นท่อนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการเตรียมนาโนคอมพอสิตทั้ง 2 อุณหภูมิจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 210°C มีค่า p_c ต่ำกว่าที่ 200°C และมีค่า t สูงกว่าที่ 200°C เนื่องจาก MWCNT กระจายตัวใน PU ส่วนนึ่งซึ่งมีความเหนียวและมีความหนืดสูงเมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลว แต่เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ PU มีความหนืดลดลง ทำให้ MWCNT กระจายตัวใน PU ส่วนนึ่งได้ดีขึ้น จึงเกิดเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้าแพร่กระจายใน PU เมทริกซ์ส่วนนึ่งได้มากกว่า ดังนั้น PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 210°C จึงมีจุดที่เกิดการนำไฟฟ้าต่ำกว่าการเตรียมด้วย 200°C ซึ่งผลที่ได้นี้คล้ายคลึงกับที่พบใน PU-ester นาโนคอมพอสิต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาจุดนำไฟฟ้า (p_c) ของ PU/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลวใน PU ที่มีโครงสร้างส่วนนํ้ามันแตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) และยังคงศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการผสมต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิตอีกด้วย โดย PU-ester นาโนคอมพอสิตทำการผสมที่อุณหภูมิ 190 หรือ 200°C ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตทำการผสมที่อุณหภูมิ 200 หรือ 210°C พบว่า PU-ester นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 190 และ 200°C มีค่า $p_c = 0.55$ และ 0.45 ตามลำดับ โดยมีค่า t exponent = 2.70 ทั้งสองอุณหภูมิการผสม จากค่า t ที่เป็นแบบ Universal แสดงว่านาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 190 และ 200°C ทำให้อนุภาค MWCNT เกิดการสร้างโครงข่ายนำไฟฟ้าเป็นรูปแบบ 5 มิติ (Hypercubic) ใน PU เมทริกซ์ส่วนแข็ง แสดงให้เห็นว่า MWCNT สามารถกระจายตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิในการเตรียมที่สูงขึ้น ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตมีค่า $p_c = 0.50$, t exponent = 4.77 และ $p_c = 0.43$, t exponent = 5.68 ที่อุณหภูมิการเตรียม 200 และ 210°C ตามลำดับ จากค่า t ของ PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยทั้ง 2 อุณหภูมิ แสดงว่าอนุภาค MWCNT มีการเกิด Tunneling effect เนื่องจาก MWCNT มีอนุภาคเป็นท่อนจึงส่งผลให้ค่า t เป็นแบบ Non-universal จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการเตรียมที่สูงขึ้นส่งผลให้ MWCNT มีจุดนำไฟฟ้าที่ต่ำลงและมีโครงข่ายเชื่อมโยงการนำไฟฟ้าที่แพร่กระจายมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FESEM ที่พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสมสูงขึ้น MWCNT กระจายตัวอยู่ใน PU เมทริกซ์ดีขึ้น ค่า Young's Modulus ของ PU-ester นาโนคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 25% ส่วนค่า Young's Modulus ของ PU-ether นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 10% เนื่องจากใน PU-ester นาโนคอมพอสิต MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งจึงทำให้สามารถเสริมความแข็งแรงได้มากกว่า PU-ether นาโนคอมพอสิตที่ MWCNT มีการกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนํ้ามัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทนคาร์บอนนาโนทิวบ์คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว โดยมีปัจจัยศึกษาต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิในการผสม และปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถสรุปข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาเปรียบเทียบจุดนำไฟฟ้าในวัสดุนาโนคอมพอสิตชนิดอื่น
2. ศึกษาเปรียบเทียบจุดนำไฟฟ้าของวัสดุพอลิยูรีเทนนาโนคอมพอสิตด้วยวิธีผสมแบบอื่นเพิ่มเติม
3. ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน DSC โดยใช้สภาวะ heat-cool-heat เพื่อตรวจวิเคราะห์ T_{MST} , $\Delta H_{(MST)}$, $T_{(SS)}$, $T_{(MMT)}$ และ $\Delta H_{(MMT)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้นั้นเป็นการที่ขอให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. University of York. 2013. **Composites**. [Online]. Available : <http://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html>.
2. Clingerman, M.L. 1998. "Development and Modelling of Electrically Conductive Composite Materials." Ph.D. dissertation in Chemical Engineering, Michigan Technological University.
3. Yeetsorn, R. Fowler, M.W. and Tzoganakis, C. 2011. **A Review of Thermoplastic Composites for Bipolar Plate Materials in PEM Fuel Cells**. [Online]. Available : <http://www.intechopen.com/books/nanocomposites-with-unique-properties-and-applications-in-medicine-and-industry/a-review-of-thermoplastic-composites-for-bipolar-plate-materials-in-pem-fuel-cells>.
4. Borica. 2016. **Polyurethane Catalysts**. [Online]. Available : http://www.borica.com/Tytan/t_PU.aspx.
5. IIT Delhi. 2011. **Elastomeric fibre**. [Online]. Available : <http://nptel.ac.in/courses/116102006/module5/chapter%205.1.htm>.
6. อภิชาติ ตำนานวิทยากุล. 2553. "ท่อนาโนคาร์บอน วัสดุในอนาคต." *เทคโนโลยีวัสดุ*. 61 :13-18.
7. Vidu, R. Rahman, M. Mahmoudi, M. Enachescu, M. Poteca, T. D. and Opris, I. 2014. **Nanostructures : a Platform for Brain Repair and Augmentation**. [Online]. Available : <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnsys.2014.00091/full#B68>.
8. Particle Sciences. 2011. **Hot Melt Extrusion**. [Online]. Available : <http://www.particlesciences.com/news/technical-briefs/2011/hot-melt-extrusion.html>.
9. Schwartz, M.M. 1996. **Composite Materials : Processing of Composite Materials**. 2nd ed. London : A Pearson Education Company.
10. Ishida, H. Campbell, S. and Blackwell, J. 2000. **Chemistry of Materials : General Approach to Nanocomposite Preparation**. New York : Van Nostrand Reinhold.
11. Singh, N.B. Rai, S. and Agarwal S. 2014. **Polymer Nanocomposites and Cr(VI) Removal from Water**. [Online]. Available : <http://www.symbiosisonlinepublishing.com/nanoscience-technology/nanoscience-technology04.php>.

12. Oak Harbor Chemistry. 2016. **Solution**. [Online]. Available :
<https://sites.google.com/site/oakharborchemistry/OHHSChemistry/unit-8---solutions>.
13. Norbert, A. Geza, A. Wolfgang, F. Manfred, G. Eckehard, W. Michael, H. Friedrich, W.W. Donald, R.L. Udo, M. Sven, M.A. Karl, L.N. and Hans, G.W. 2005.
 “Polyurethanes.” *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2 : 1-56.
14. สีนินาฏ ไทยบุญรอด. 2551. “การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต.” ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
15. Iijima, S. 1991. “Helical Microtubules of Graphitic Carbon.” *Nature*. 22(3): 56-58.
16. Yeetsorn, R. 2004. “Carbon Nanotubes : a New Advanced Material Rapidly Interested Scientists.” *The Journal of KMITNB*. 14(4) : 60-63.
17. Hanwha Chemical. 2016. **Carbon Nanotube**. [Online]. Available :
https://hcc.hanwha.co.kr/eng/business/nano_cnt.jsp.
18. เบญจพร หนูคล้าย. 2551. “วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและตัวเติมนาโนเป็นตัวตรวจรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์.” ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
19. Valthem, P. V. 2015. **Carbon Nanotube for Electrical Properties Improvement of Phenoxy**. [Online]. Available : <http://www.gabrielchem.com/blog/wp-content/uploads/2014/01/Poster-Phenoxy-CarbonNanotubes.jpg>.
20. Cattani, M. and Salvadori, M. C. (2009). **Insulator-conductor Transition : A Brief Theoretical Review**. [Online]. Available : <http://arxiv.org/abs/0903.3587>.
21. Sandler, J., Shaffer, M.S.P., Prasse, T., Bauhofer, W., Schulte, K. and Windle, A.H. (1999). “Development of a Dispersion Process for Carbon Nanotubes in an Epoxy Matrix and the resulting electrical properties.” *Polymer*. 40(21) : 5967– 5971.
22. Sandler, J.K.W., Kirk, J.E., Kinloch, I.A., Shaffer, M.S.P. and Windle, A.H. (2003). “Ultra-low Electrical Percolation Threshold in Carbon- nanotube-epoxy Composites.” *Polymer*. 44(19) : 5893–5899.
23. Zhang, R., Dowden, A., Deng, H., Baxendale, M. and Peijs, T. (2009). “Conductive Network Formation in the Melt of Carbon Nanotube/thermoplastic Polyurethane Composite.” *Composites Science and Technology*. 69(10) :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

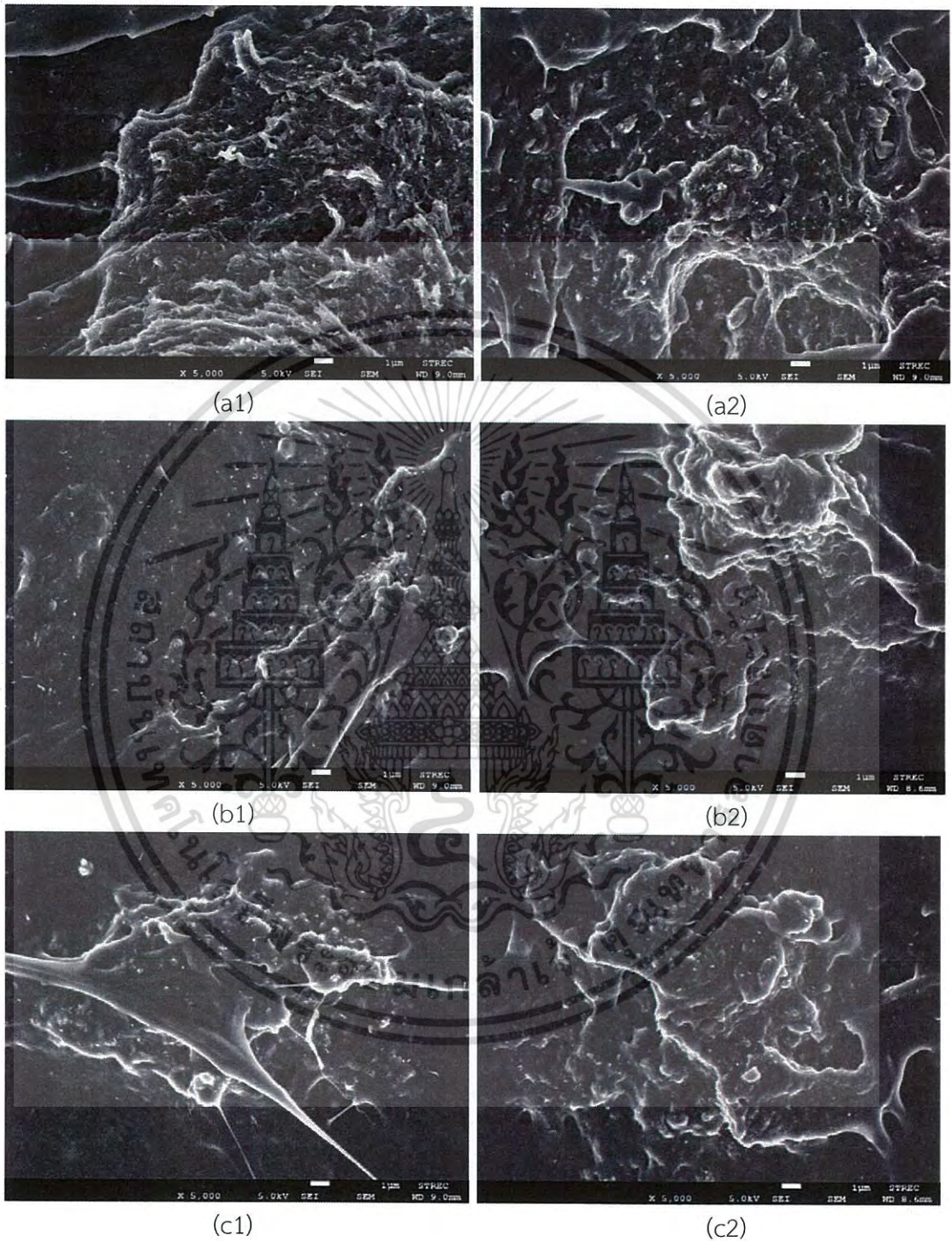
- 1499-1504.
24. Maiti, S., Shrivastava, N. K., Suin, S. and Khatua, B. B. (2003). "A Strategy for Achieving Low Percolation and High Electrical Conductivity in Melt-blended Polycarbonate (PC)/multiwall Carbon Nanotube (MWCNT) Nanocomposites : Electrical and Thermo-mechanical Properties." *Express Polymer Letters*. 7(6) : 505-518.
 25. กฤตยา ทรงสกุลม, กัณณิกา คงขาว และกุสุมาลย์ เนินปลอด. 2557. "การศึกษาการกระจายตัวแบบเลือกตำแหน่งของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว." ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
 26. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2015. เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Analysis Technique, TA). [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/38-thermal-analysis-th>.
 27. Netzsch. 2016. DSC 204 F1 Phoenix®. [Online]. Available : <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/differential-scanning-calorimetry/dsc-204-f1-phoenix>.
 28. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2016. Equipment List. [Online]. Available : <http://www.strec.chula.ac.th/equipment>.
 29. Jeol. 2015. JSM-7610F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope. [Online]. Available : <http://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-7610F.html#spec>.
 30. Prospector. 2016. Tensile Properties - ASTM D638. [Online]. Available : <https://plastics.ulprospector.com/properties/ASTMD638>.
<https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/38-thermal-analysis-th>.
 31. Dumbbell co., ltd. 2016. Super Dumbbell Cutters Available (Extracted) List of Corresponding Standards. [Online]. Available : http://www.dumbbell.co.jp/english/super_dumbbell01.html.
 32. Banfield, D. (2000). "Understanding and Measuring Electrical Resistivity in Conductive Inks and Adhesives." *SGIA Journal*.
 33. Christensen, K. (2002). "Percolation Theory."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



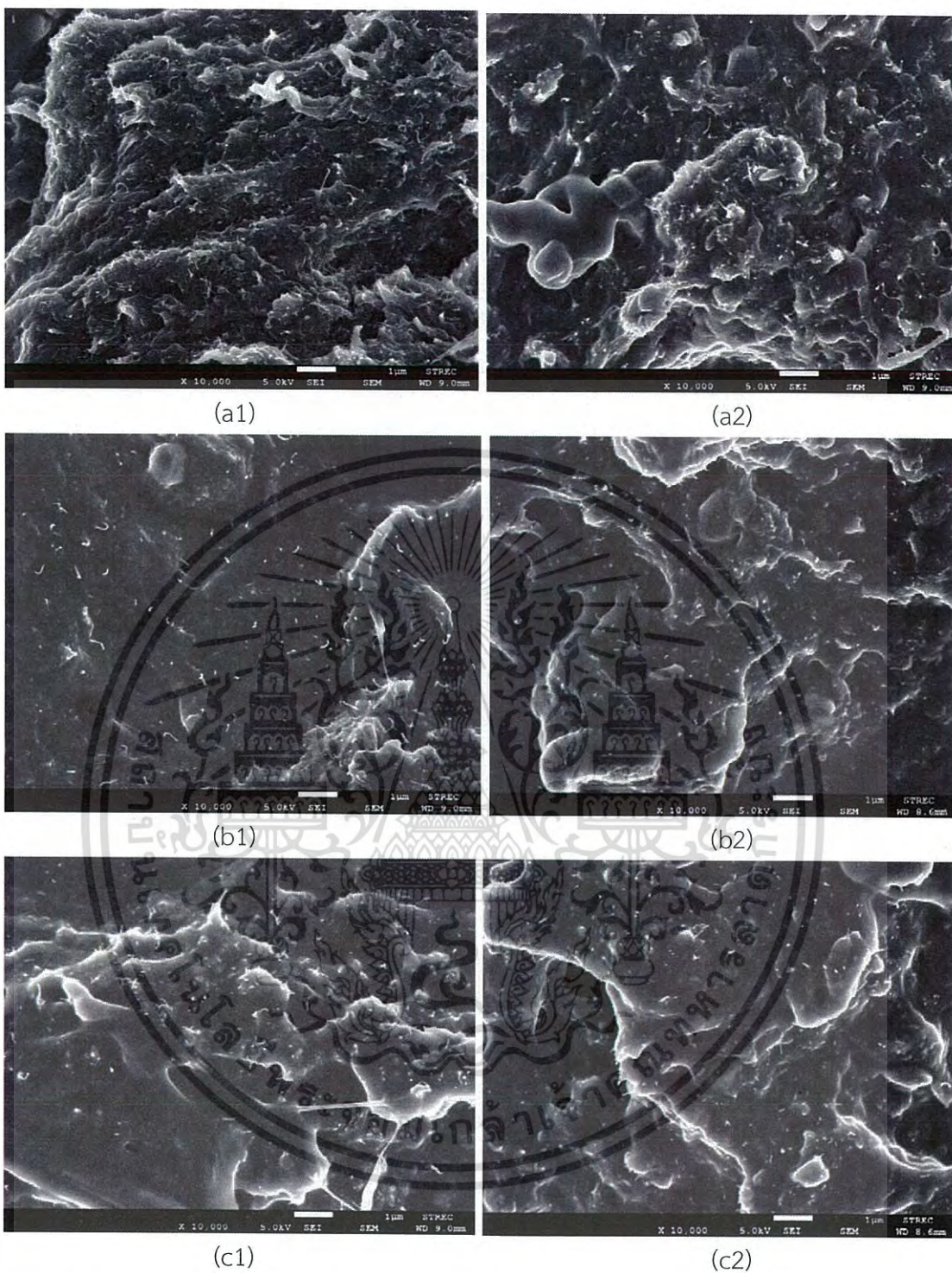
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก



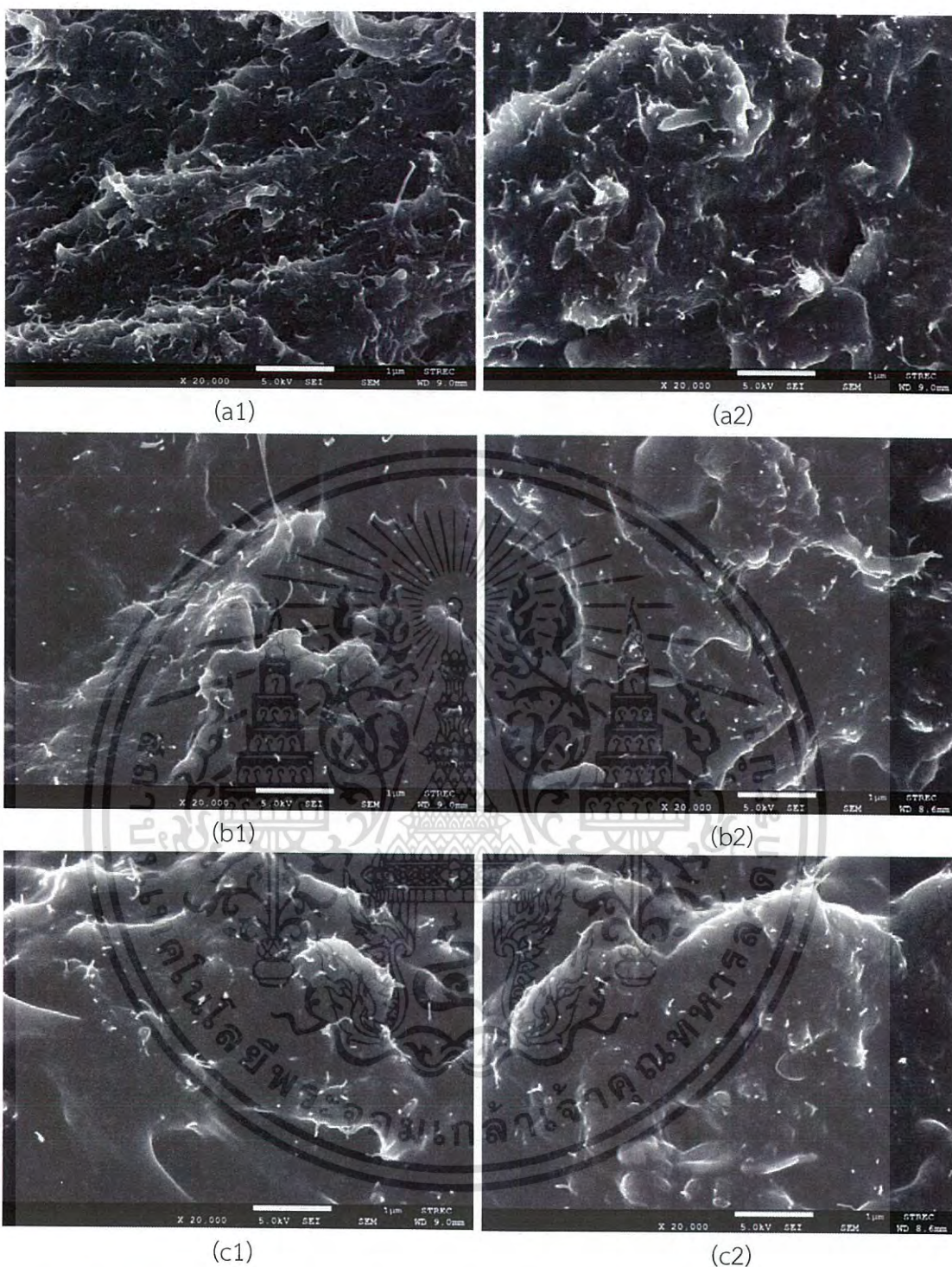
รูปที่ ก.1 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 5000$ เท่าของ (a1) 0.3 Es-190 (a2) 0.3 Es-200 (b1) 0.8 Es-190 (b2) 0.8 Es-200 (c1) 1.5 Es-190 และ (c2) 1.5 Es-200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



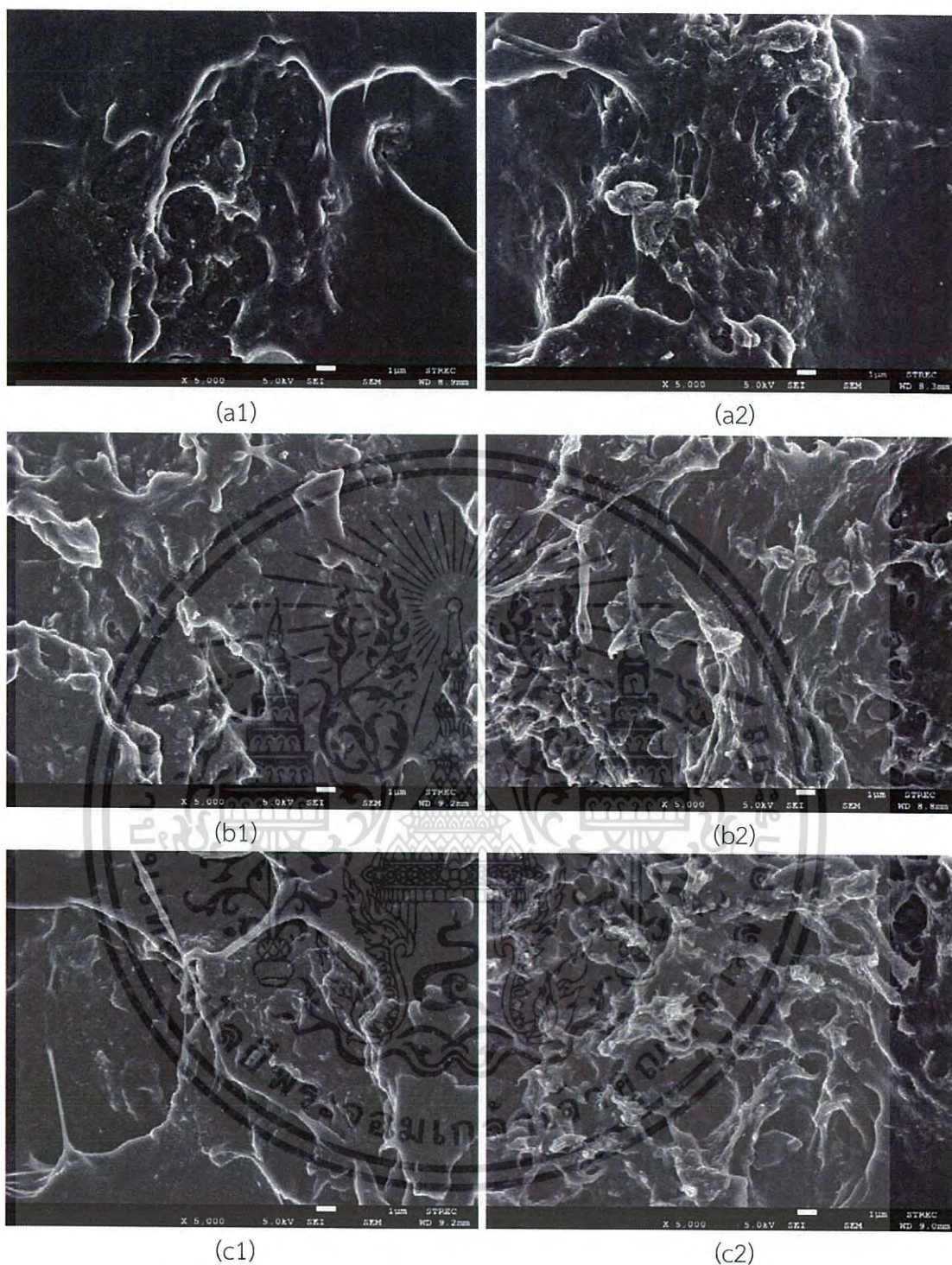
รูปที่ ก.2 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 10000$ เท่าของ (a1) 0.3 Es-190 (a2) 0.3 Es-200 (b1) 0.8 Es-190 (b2) 0.8 Es-200 (c1) 1.5 Es-190 และ (c2) 1.5 Es-200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



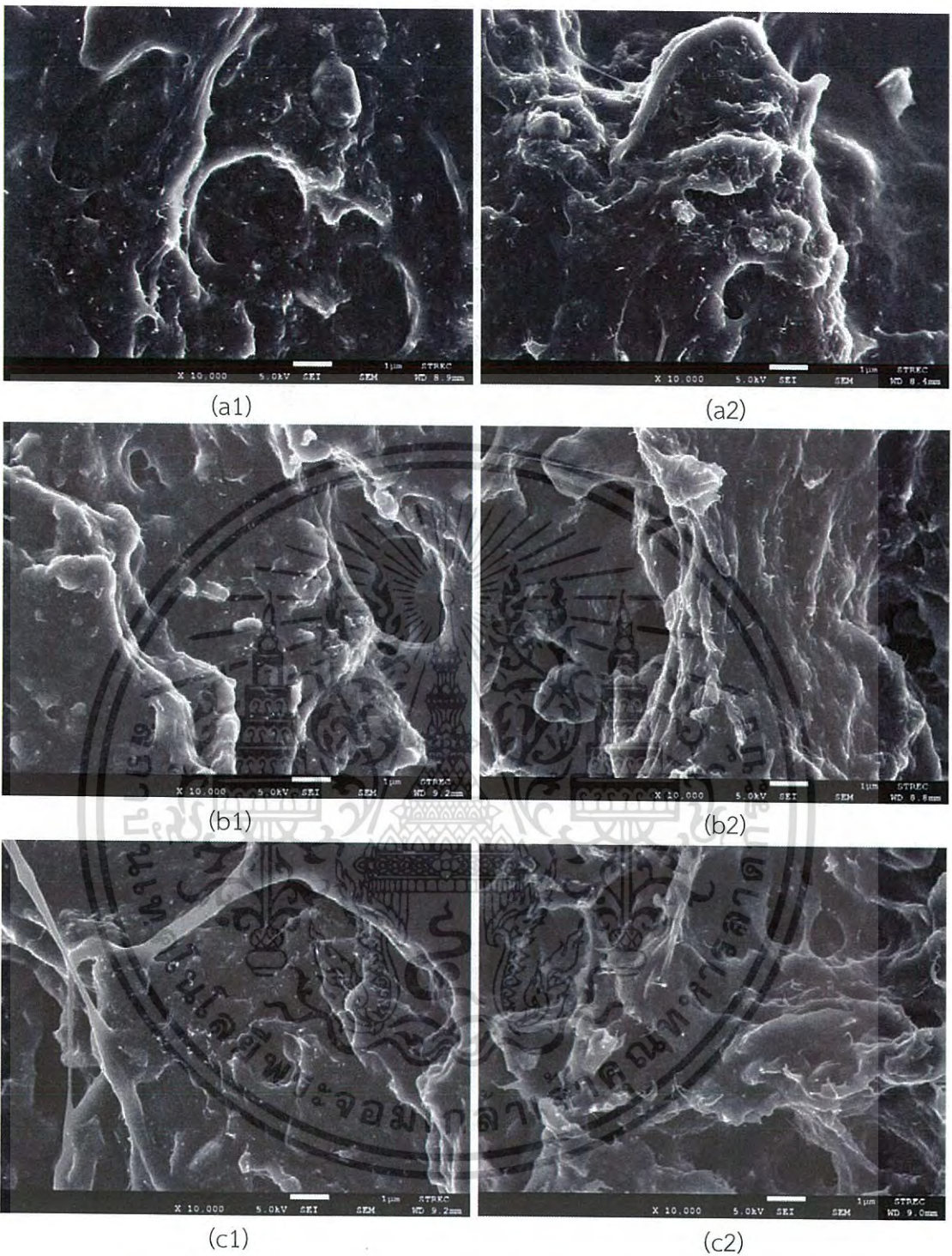
รูปที่ ก.3 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) 0.3 Es-190 (a2) 0.3 Es-200 (b1) 0.8 Es-190 (b2) 0.8 Es-200 (c1) 1.5 Es-190 และ (c2) 1.5 Es-200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



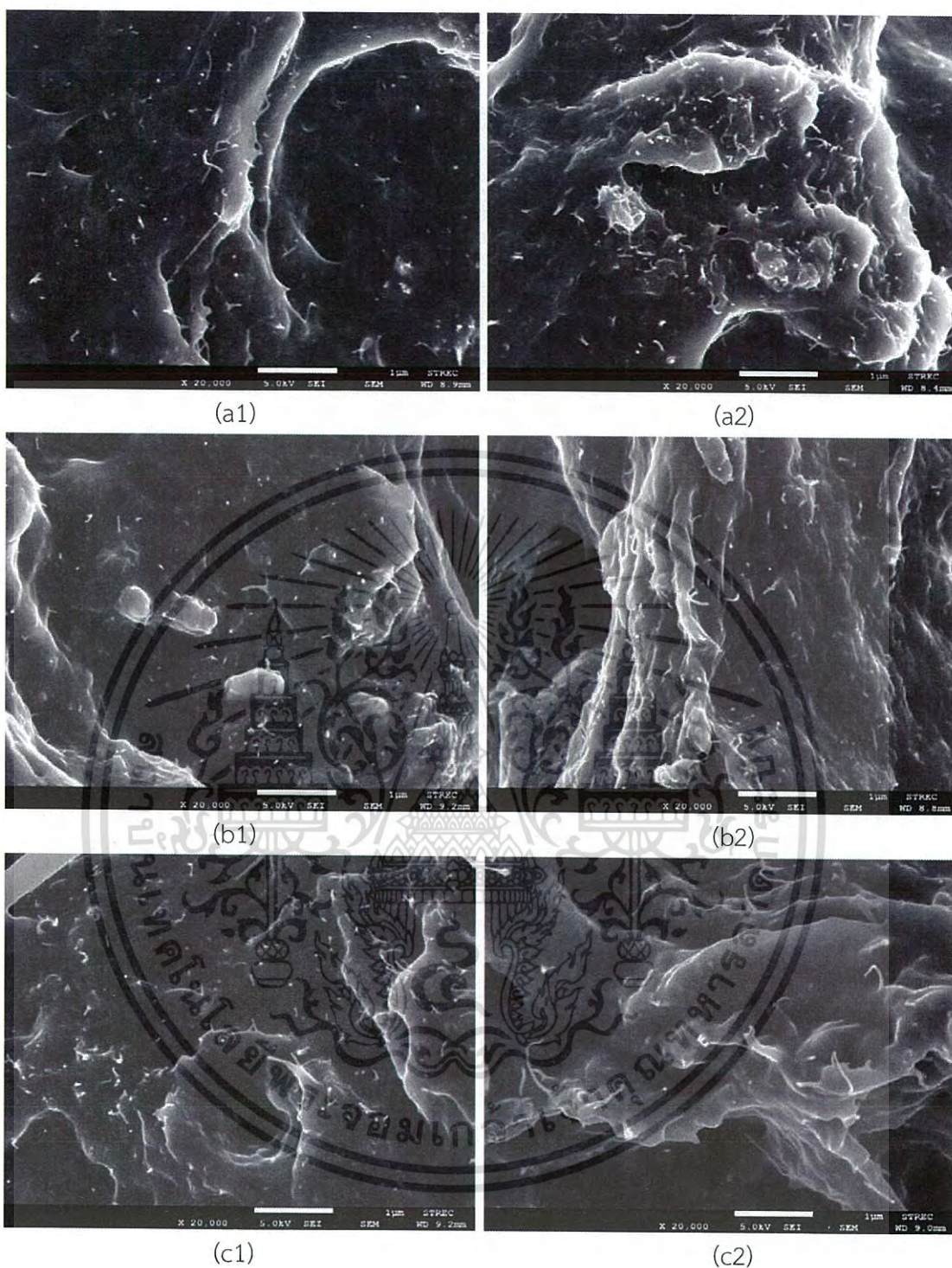
รูปที่ ก.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 5000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 (a2) 0.3 Et-210 (b1) 0.8 Et-200 (b2) 0.8 Et-210 (c1) 1.5 Et-200 และ (c2) 1.5 Et-210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 10000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 (a2) 0.3 Et-210 (b1) 0.8 Et-200 (b2) 0.8 Et-210 (c1) 1.5 Et-200 และ (c2) 1.5 Et-210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย $\times 20000$ เท่าของ (a1) 0.3 Et-200 (a2) 0.3 Et-210 (b1) 0.8 Et-200 (b2) 0.8 Et-210 (c1) 1.5 Et-200 และ (c2) 1.5 Et-210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 แสดงค่า t exponents ตาม Percolation theory ของมิติต่างๆ

Lattice	# nn	Site percolation	Bond percolation
1d	2	1	1
2d Honeycomb	3	0.6962	$1 - 2 \sin(\pi/18) \approx 0.65271$
2d Square	4	0.592746	1/2
2d Triangular	6	1/2	$2 \sin(\pi/18) \approx 0.34729$
3d Diamond	4	0.43	0.388
3d Simple cubic	6	0.3116	0.2488
3d BCC	8	0.246	0.1803
3d FCC	12	0.198	0.119
4d Hypercubic	8	0.197	0.1601
5d Hypercubic	10	0.141	0.1182
6d Hypercubic	12	0.107	0.0942
7d Hypercubic	14	0.089	0.0787
Bethe lattice	z	$1/(z-1)$	$1/(z-1)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้