

การศึกษาการเติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์  
ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมโพสิต

STUDY OF CARBON BLACK AND CARBON  
NANOTUBES/ POLYURETHANE NANOCOMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการเติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์  
ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมโพสิต

STUDY OF CARBON BLACK AND CARBON  
NANOTUBES/ POLYURETHANE NANOCOMPOSITES



00265718

TB00173

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF CARBON BLACK AND CARBON  
NANOTUBES/ POLYURETHANE NANOCOMPOSITES



NITCHANUN THOMANGEE  
PRAPAPHORN SAENGARON  
PATCHNAKAN WISATSUVAN

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

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

ACADEMIC YEAR 2016




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการเติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์  
 ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมพอสิต  
 Study of Carbon Black and Carbon Nanotube  
 /Polyurethane Nanocomposites

ชื่อนักศึกษา นางสาวนิชนันท์ โต๊ะมาลี รหัสนักศึกษา 56050518  
 นางสาวประภาพร แสงอรุณ รหัสนักศึกษา 56050529  
 นางสาวพัชฌันท์ วิเศษสุวรรณ รหัสนักศึกษา 56050541

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
 ภาควิชา เคมี  
 ปีการศึกษา 2559  
 อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต  
 (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการเติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมโพสิต		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนิชนันท์ ไต่ะมางี	รหัสนักศึกษา	56050518
	นางสาวประภาพร แสงอรุณ	รหัสนักศึกษา	56050529
	นางสาวพัชญ์ณกัญญา วิเศษสุวรรณ	รหัสนักศึกษา	56050541
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์		

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิยูรีเทน (PU), คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (MWCNT) และคาร์บอนแบล็ค (CB) โดยทำการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าและการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมโพสิตที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว ซึ่งพอลิยูรีเทนเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อกที่มีโครงสร้างส่วนนิมแตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB ที่ 1:1, 1:3, 1:5 และ 1:7 เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของนาโนคอมโพสิตด้วยเครื่อง LCR-meter พบว่า MWCNT:CB ที่ 1:7 ให้ค่านำไฟฟ้าสูงสุดทั้งใน PU-ester และ PU-ether นาโนคอมโพสิต โดย PU-ester มีค่าการนำไฟฟ้าดีที่สุดในสูตร 0.5Es1:7 เท่ากับ  $3.71 \times 10^{-4}$  S/cm ซึ่งสูงกว่า PU-ether ที่มีค่าดีที่สุดในสูตร 0.4Eth1:7 เท่ากับ  $3.12 \times 10^{-5}$  S/cm โดยค่าดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ DSC ที่บ่งชี้ว่าใน PU-ether นาโนคอมโพสิต MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิม ส่วน CB กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง แต่ PU-ester นาโนคอมโพสิต มีการกระจายตัวของ MWCNT และ CB อยู่ในโครงสร้างส่วนแข็งเหมือนกัน จึงมีโอกาที่จะเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายนำไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้มีค่านำไฟฟ้าสูงขึ้น ในส่วนของค่า Modulus พบว่า 0.5Es1:7 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 106% และ 0.4Eth1:7 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 68% เมื่อเทียบกับเมทริกซ์ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม เนื่องจาก MWCNT และ CB กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester ทำให้ช่วยเสริมความแข็งแรงได้มากกว่านั่นเอง นอกจากนี้การศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมโดยใช้ FESEM พบว่าแม้ความเข้มข้นของ MWCNT และ CB จะเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังคงกระจายตัวอยู่ใน PU เมทริกซ์ได้ดี

คำสำคัญ : คาร์บอนแบล็ค คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น นาโนคอมโพสิต พอลิยูรีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Study of Carbon Black and Carbon Nanotubes/Polyurethane Nanocomposites
<b>Students</b>	Miss Nitchanan Thomangee Student ID 56050518 Miss Prapaphorn Saengaroon Student ID 56050529 Miss Patchnakan Wisatsuvan Student ID 56050541
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2016
<b>Advisor</b>	Dr. Kittimon Jirakittidul

### Abstract

In this research, polyurethane (PU), multiwalled carbon Nanotubes (MWCNT) and carbon black (CB) nanocomposites were prepared by melt mixing to study electrical properties and dispersion of MWCNT and CB in PU matrices. PU used in this study had two different soft segments (polyester (PU-ester) and polyether (PU-ether)). The ratio of MWCNT:CB was studied at 1:1, 1:3, 1:5 and 1:7. As testing the electrical properties of nanocomposites with LCR-meter, it was found the highest conductivity of both PU nanocomposites at MWCNT:CB of 1:7. The highest conductivity of PU-ester was  $0.5Es1:7$  ( $3.71 \times 10^{-4}$  S/cm), which was higher than that of PU-ether nanocomposites at  $0.4Eth1:7$  ( $3.12 \times 10^{-5}$  S/cm). DSC results of PU-ether nanocomposites, MWCNT dispersed in soft segments while CB dispersed in hard segments. On the other hand, PU-ester nanocomposites found MWCNT and CB dispersed together in hard segments. Therefore, it could create the conductive network to increase conductivity. For modulus results,  $0.5Es1:7$  increased approximately 106% and  $0.4Eth1:7$  increased approximately 68% comparing to unfilled PU. It was contributed to MWCNT and CB dispersed in hard segments of PU-ester while MWCNT and CB dispersed in different segments of PU-ether. Therefore, PU-ester nanocomposites showed better mechanical property.

**Keywords** : Carbon black, Multiwalled carbon nanotubes, Nanocomposite, Polyurethane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เอกรัฐ เดชศรี ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบโครงการพิเศษ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขรูปเล่มเป็นอย่างดีอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ Field Emission Scanning Microscope (FESEM) และ Differential Scanning Calorimeter (DSC)

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การสนับสนุนโอกาสทางการศึกษา และเป็นกำลังใจ จนโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเพื่อนๆที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ท้ายสุดนี้ หากมีความผิดพลาดประการใด ผู้เขียนต้องขออภัยเป็นอย่างสูง และผู้เขียนหวังว่าโครงการพิเศษเล่มนี้จะเป็นประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยสำหรับผู้สนใจ

นิชนันท์  
ประภาพร  
พัชณัญญ์

ไต้ะมาจี้  
แสงอรุณ  
วิเศษสุวรรณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 วัสดุคอมพอสิต.....	6
2.1.1 ความหมายของวัสดุคอมพอสิต.....	6
2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต.....	6
2.2 พอลิยูรีเทน.....	7
2.2.1 ปฏิกิริยาพื้นฐาน.....	8
2.2.2 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	9
2.3 อนุภาคนาโน.....	11
2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	11
1. ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	11
2. สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	12
3. การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	13
2.3.2 คาร์บอนแบล็ค.....	13
1. โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค.....	14
2. สมบัติของคาร์บอนแบล็ค.....	16
3. ประเภทของคาร์บอนแบล็ค.....	18
4. การประยุกต์ใช้คาร์บอนแบล็ค.....	20
2.4 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1	ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	21
2.4.2	กลไกการเกิดพอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า.....	22
2.4.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	23
2.5	การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.5.1	ผลกระทบจากความเข้มข้นของ MWCNT ต่อสมบัติเชิงกล.....	24
2.5.2	ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมผสมระหว่าง CB และ MWCNT ต่อสมบัติการนำไฟฟ้า.....	25
2.5.3	ผลกระทบจากอุณหภูมิในการเตรียมนาโนคอมพอสิตต่อจุดนำไฟฟ้า.....	28
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>29</b>
3.1	แผนการดำเนินงาน .....	29
3.2	สารเคมีและอุปกรณ์.....	29
3.3	วิธีการทดลอง.....	30
3.3.1	การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต.....	30
3.3.2	กระบวนการขึ้นรูปนาโนวัสดุคอมพอสิต.....	31
3.4	การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิต.....	32
3.4.1	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC .....	32
3.4.2	การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM.....	33
3.4.3	การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM .....	34
3.4.4	การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter .....	35
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>36</b>
4.1	ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	36
4.2	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM .....	40
4.3	ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM .....	48
4.4	ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter.....	53
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>58</b>
	เอกสารอ้างอิง .....	60
	ภาคผนวก.....	63
	ภาคผนวก ก ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหัก.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบหลักของสารตั้งต้นสำหรับ Thermoplastic polyurethane.....	9
2.2 แสดงสมบัติต่างๆของคาร์บอนแบล็คแต่ละชนิด .....	20
3.1 ชื่อเรียกสูตร PU/MWCNT/CB ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ.....	30
4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต .....	37
4.2 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต .....	38
4.3 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต .....	48
4.4 แสดงค่า Young's Modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต .....	49



## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมพอสิต .....	1
1.2 การเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า .....	2
1.3 สมการการเกิดพอลิยูรีเทน .....	3
1.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน .....	3
1.5 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค .....	4
2.1 โครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน .....	7
2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน .....	8
2.3 โครงสร้างของ Thermoplastic polyurethane .....	9
2.4 การม้วนของแผ่นกราฟีนเกิดเป็น SWCNT .....	12
2.5 การม้วนของแผ่นกราฟีนเกิดเป็น MWCNT .....	12
2.6 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ .....	13
2.7 โครงสร้างแอ็กกรีเกต กำลังขยายต่ำ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน .....	14
2.8 โครงสร้างผลึกของคาร์บอนแบล็ค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ความละเอียดสูง (HRTEM) .....	15
2.9 คาร์บอนแบล็คโครงสร้างสูง (High Structure) และโครงสร้างต่ำ (Low Structure) .....	15
2.10 การเกิดโครงสร้างแอ็กกรีเกตและแอ็กโกลเมอเรต .....	16
2.11 การหาโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คด้วยวิธี Vehicle Demand (a) กระบวนการ (b) กราฟแสดงจุดยุติในการหาโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค .....	16
2.12 หมู่ฟังก์ชันบริเวณริมแผ่นแกรไฟต์ของคาร์บอนแบล็ค .....	18
2.13 วิธีการผลิตคาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส .....	19
2.14 กราฟแสดงสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค .....	23
2.15 ค่า Percolation Threshold ที่แตกต่างกันของอนุภาคทรงกลมและอนุภาคเป็นท่อ .....	23
2.16 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม TPU นาโนคอมพอสิต .....	25
2.17 กราฟการนำไฟฟ้ากับความถี่ของโคพอลิเมอร์ที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่าง CB และ MWCNT โดยวิธีการผสมด้วย Haake Rheomix Polylab (1) และ twin-roller mixer (2) .....	26
2.18 (a) ภาพจำลองการรวมตัวกันของ CB ที่บริเวณปลายท่อของ MWCNT ในระบบ Ternary (b) ภาพแสดงการกระจายตัวของ CB และ MWCNT ในระบบ Ternary โดยใช้กล้อง TEM Microscope .....	27
2.19 กราฟแสดงค่า Percolation threshold ของทั้ง 3 ระบบ (Binary CB, Binary MWCNT, Ternary) .....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ที่เติมลงใน

(a) PU-ester นาโนคอมพอสิต และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต..... 28

3.1 ภาพแสดงเครื่อง DSC รุ่น 204 F1 Phoenix® ของบริษัท NETZSCH..... 32

3.2 ภาพแสดง FESEM รุ่น JEOL JSM-7610F ..... 33

3.3 ตัวอย่างรูปดัมเบลล์สำหรับการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ..... 34

3.4 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า ..... 35

4.1 กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ..... 36

4.2 กราฟ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ..... 37

4.3 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 20000$  เท่าของ (a) Es0.3 และ (b) Es3.5..... 40

4.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Es และ (b) 0.5Es..... 41

4.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Es1:7, (b) 0.4Es1:7 และ (c) 0.5Es1:7..... 42

4.6 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 20000$  เท่าของ (a1) Eth0.3 และ (b) Eth3.5..... 43

4.7 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Eth และ (b) 0.5Eth..... 44

4.8 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Eth1:7, (b) 0.4Eth1:7 และ (c) 0.5Eth1:7..... 46

4.9 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 30000$  เท่า,  $\times 40000$  เท่า และ  $\times 80000$  เท่า ของ (a) 0.5Es1:7, (b) 0.5Eth1:7 และ (c) 0.5Eth1:7 ..... 47

4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young’s Modulus กับปริมาณ MWCNT โดยใช้อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ต่างกัน (a) PU-ester และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต ..... 50

4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester ในสูตร 0.3Es, 0.3Es1:1, 0.3Es1:3, 0.3Es1:5, 0.3Es1:7 และ Es0.3..... 51

4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester ในสูตร 0.4Es, 0.4Es1:1, 0.4Es1:3, 0.4Es1:5 และ 0.4Es1:7 ..... 52

4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester ในสูตร 0.5Es, 0.5Es1:1, 0.5Es1:3, 0.5Es1:5, 0.5Es1:7 และ Es3.5..... 53

4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether ในสูตร 0.3Eth, 0.3Eth1:1, 0.3Eth1:3, 0.3Eth1:5, 0.3Eth1:7 และ Eth0.3..... 53

4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether ในสูตร  
 0.4Eth, 0.4Eth1:1, 0.4Eth1:3, 0.4Eth1:5 และ 0.4Eth1:7 ..... 54

4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether ในสูตร  
 0.5Eth, 0.5Eth1:1, 0.5Eth1:3, 0.5Eth1:5, 0.5Eth1:7 และ Eth3.5..... 55

4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT/CB ที่เติมลงใน  
 PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่ความถี่ 272.4 Hz ..... 55

4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT/CB ที่เติมลงใน  
 PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ความถี่ 272.4 Hz..... 56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย
CB	คาร์บอนแบล็ค
CNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์
DSC	Differential scanning calorimetry
ECPs	Electrically conductive polymer composites
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope
HRTEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง
MWCNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น
PU	พอลิยูรีเทน
SWCNT	คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว
UTM	Universal Testing Machine

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
g	กรัม
Hz	เฮิรตซ์
J	จูล
NCO	หมู่ไอโซไซยาเนต
-NHCO-O-	พันธะยูรีเทน
nm	นาโนเมตร
°C	องศาเซลเซียส
%wt	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
$p_c$	ความเข้มข้นของจุดที่เกิดการนำไฟฟ้า
S/cm	ซีเมนต์/เซนติเมตร
m <sup>2</sup> /g	ตารางเมตร/กรัม
ml/g	มิลลิลิตร/กรัม
T <sub>gSS</sub>	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนี้
T <sub>gMP</sub>	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนี้และส่วนแข็งที่ผสมกัน
T <sub>MMT</sub>	อุณหภูมิการเกิด microphase mixing
$\Delta H_{MMT}$	พลังงานที่ใช้ในการเกิด microphase mixing

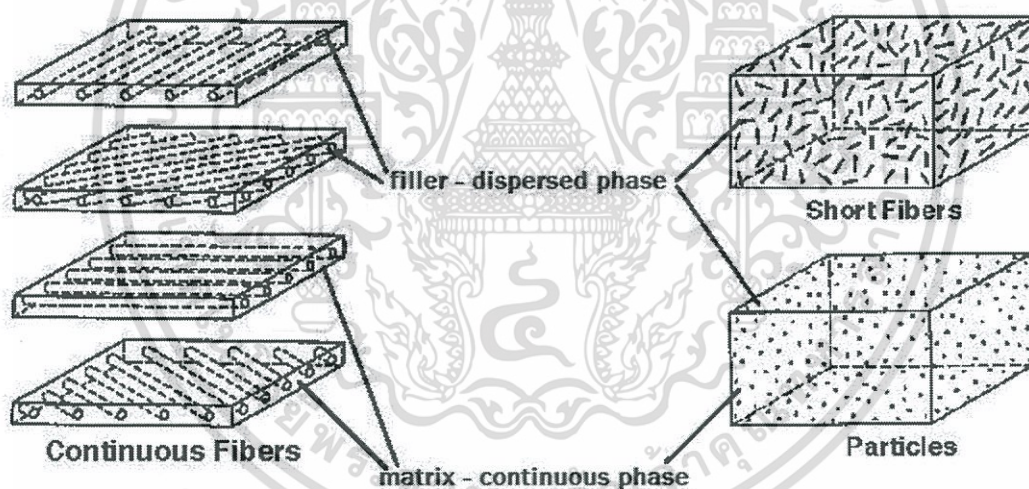
## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) เป็นวัสดุที่ในปัจจุบันมีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเรามีความต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายอย่างรวมอยู่ด้วยกัน สมบัติเด่นที่สำคัญได้แก่ ความหนาแน่นต่ำ ซึ่งทำให้ได้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ความเป็นฉนวนไฟฟ้า อีกทั้งต้นทุนการผลิตต่ำ ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีและสภาพอากาศ มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ [1]

วัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ เนื้อหลัก (Matrix) และวัฏภาคกระจายตัว (Dispersed phase) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



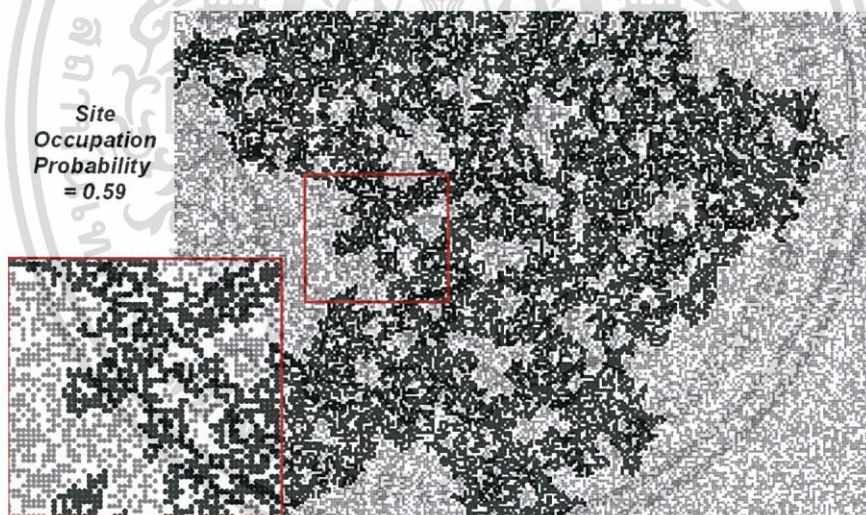
รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต [2]

1.เนื้อหลักจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) ช่วยหล่อหุ้มและยึดสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก เช่น Polyurethane, Rubber และ Epoxy เป็นต้น

2.วัฏภาคที่กระจายตัว หรืออาจเรียกว่า วัฏภาคเสริมแรง (Reinforced phase) เนื่องจากโดยส่วนใหญ่แล้ววัฏภาคที่กระจายตัวจะทำหน้าที่ช่วยเสริมแรงให้กับเนื้อหลัก ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีขึ้น ทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้า วัสดุที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยมใช้เป็นวัสดุภาคเสริมแรง เช่น คาร์บอนแบล็ค คาร์บอนนาโนทิวบ์ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว เส้นใยเคฟลาร์ เส้นลวดโลหะ เป็นต้น เมื่อพิจารณาสมบัติด้านการนำไฟฟ้าจะพบว่า โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์จะมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อทำการเติมสารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้า เช่น คาร์บอนแบล็ค คาร์บอนนาโนทิวบ์ หรือผงโลหะ จึงจะช่วยปรับปรุงให้เกิดเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น [3]

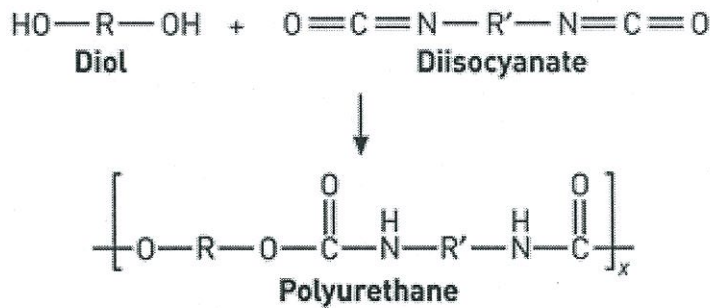
กลไกที่ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถนำไฟฟ้าได้ เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างอิสระต่อเนื่องทั้งในและระหว่างโมเลกุลของอนุภาคสารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้า ซึ่งอาจเกิดจากอนุภาคสารตัวเติมมีการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า (Conductive network) ทั่วตลอดเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยค่าการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ การกระจายตัว การเชื่อมโยงกัน และปริมาณของอนุภาคสารตัวเติมที่เติมลงในเมทริกซ์ ซึ่งจะต้องมีปริมาณเกินกว่า สัดส่วนวิกฤตที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (Percolation threshold) โดยจุดวิกฤตนี้เป็นจุดที่วัสดุคอมโพสิตเริ่มเกิดความสามารถในการนำไฟฟ้าขึ้น นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตยังขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัส (Contact resistance) ระหว่างวัสดุของอนุภาคสารตัวเติมที่อยู่ใกล้กัน และความต้านทานระหว่างวัสดุของอนุภาคสารตัวเติมกับเมทริกซ์อีกด้วย [4]



รูปที่ 1.2 การเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า [5]

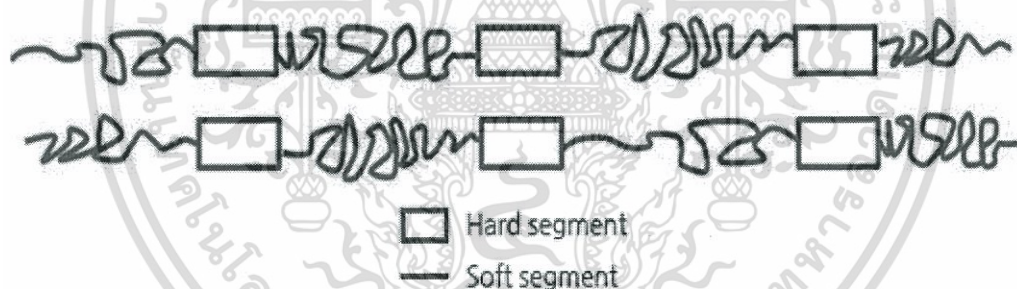
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าและการกระจายตัวของ MWCNT/CB ในพอลิยูรีเทน พอลิยูรีเทนจัดเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่สามารถเป็นได้ทั้ง เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermosetting) โดยสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) กับไดออล (Diols) สมการการเกิดพอลิยูรีเทน[6] แสดงได้ดังรูป 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 สมการการเกิดพอลิยูรีเทน [6]

โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymer) สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ โครงสร้างส่วนนิ่ม (Soft segment) เป็นส่วนโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Polyol เช่น Polycaprolacton diol, Polytetramethylene ether glycol, Polycarbonate diol, Polyester polyol และ Polyether polyol เป็นต้น และโครงสร้างส่วนแข็ง (Hard segment) เป็นส่วนโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ประกอบด้วย Diisocyanate และ Chain extender เช่น TDI, MDI, amine และ hydroxyl [7] ดังแสดงในรูป 1.4

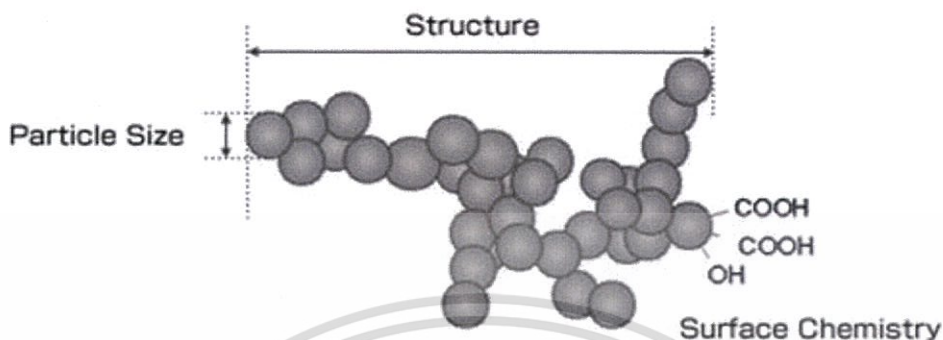


รูปที่ 1.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [7]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes, CNTs) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black, CB) เป็นสารตัวเติม (Filler) ที่มีความน่าสนใจและมีสมบัติเด่นทางด้านเชิงกลและทางไฟฟ้า จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต โดย CNT จะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงและให้ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และ Young's modulus ที่สูงขึ้น ด้านสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า CNT มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ทำให้สามารถส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้ดี [8]

ในส่วนของ CB เป็นสารตัวเติมที่มีสมบัติต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่า CNT สามารถส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้ดี แต่กลับเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้อย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูก และสามารถช่วยเสริมแรงได้อย่างมาก ทำให้มีค่าความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งยังมีเอกสคุณสมบัติช่วยในการขึ้นรูป (Processability) อีกด้วย [9] โดยจากกรูใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนราคาไม่ต่ำกว่าหมื่นใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการตรวจดูลักษณะทางโครงสร้างของ CB พบว่ามีโครงสร้างที่ซับซ้อนเนื่องจากการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregate) ซึ่งเกิดจากการหลอมติดกันของอนุภาคทรงกลมหน่วยที่เล็กที่สุดที่เรียกว่า “Primary Particle” [10] ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค [11]

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงสรุปได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์และคาร์บอนแบล็ค มีสมบัติเด่น คือ มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา สามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จึงเป็นสารตัวเติมที่น่าสนใจในการนำมาเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตกับพอลิยูรีเทน เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทน จากงานวิจัยก่อนหน้าของชลธิชา หอมวันและคณะ [12] ได้มีการพบจุดนำไฟฟ้า ( $p_c$ ) ของ PU/MWCNT นาโนคอมโพสิต ที่เตรียมโดยการผสมแบบหลอมเหลวใน PU ที่มีโครงสร้างส่วนนิ่มแตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) โดยที่ PU-ester นาโนคอมโพสิตพบว่ามีค่า  $p_c = 0.45$  และ PU-ether นาโนคอมโพสิตมีค่า  $p_c = 0.43$  ในงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาค่าการใส่สารตัวเติมระหว่าง CB และ MWCNT โดยกำหนดช่วงการศึกษาที่ความเข้มข้นของ MWCNT ระหว่าง 0.30 - 0.50 %wt

นอกจากนั้นแล้วงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ CB และ MWCNT ใน PU/MWCNT/CB นาโนคอมโพสิตที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว โดย MWCNT จะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่เหนือกว่า CB และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำมากแต่มีราคาแพง จึงทำการเติม CB ที่มีราคาถูกกว่า MWCNT แต่จะมีสมบัติความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่าง MWCNT:CB ที่ 1:1, 1:3, 1:5 และ 1:7 เพื่อศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง MWCNT/CB ที่ทำให้พอลิยูรีเทนนาโนคอมโพสิตสามารถเกิดการนำไฟฟ้าได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาผลของความเข้มข้นของ CB ต่อสมบัติเชิงกล, ความร้อนและการนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมโพสิต
- 2) ศึกษาผลของความเข้มข้นของ MWCNT ต่อสมบัติ PU/MWCNT/CB นาโนคอมโพสิต
- 3) เปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนึ่งที่ต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับ PU, MWCNT, CB, วิธีการเตรียมคอมพอสิตแบบหลอมเหลว (Melt mixing) และปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุนาโนคอมพอสิต
- 2) เตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่าง PU/MWCNT/CB โดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่อง Internal mixer ซึ่งกำหนดความเข้มข้นของ MWCNT:CB เป็น 1:1, 1:3, 1:5 และ 1:7 โดยใช้น้ำหนักของ MWCNT เป็น 0.3, 0.4 และ 0.5 %wt
- 3) เตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่าง PU/MWCNT/CB ด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่อง Internal mixer โดยใช้พอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนึ่งที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether
- 4) ขึ้นรูปชิ้นงานโดยกระบวนการกดอัดด้วยเครื่อง Compression molding
- 5) ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ด้วยเทคนิค FESEM และทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง MWCNT/CB ที่ส่งผลต่อสมบัตินำไฟฟ้าของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต
- 2) สามารถทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในโครงสร้างของ PU ที่อาจส่งผลต่อสมบัติของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต
- 3) สามารถทราบถึงความเป็นไปได้ในการลดปริมาณการใช้ MWCNT ด้วยการแทนที่ด้วย CB ใน PU นาโนคอมพอสิต โดยยังคงสมบัติทางเชิงกล, ความร้อน และการนำไฟฟ้าที่ดี

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 วัสดุคอมพอสิต

### 2.1.1 ความหมายของวัสดุคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials) คือ วัสดุผสมที่เกิดขึ้นจากการนำเอาวัสดุพื้นฐานที่มีสมบัติเชิงเคมีและสมบัติเชิงฟิสิกส์แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปหรือมากกว่ามาใช้ร่วมกันทำให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างใหม่ซึ่งมีสมบัติและประสิทธิภาพสูงมากกว่าวัสดุใช้งานเดิม [13] โดยทั่วไปวัสดุคอมพอสิตจะประกอบ 2 ส่วน คือ วัฏภาคต่อเนื่อง(Continuous phase) หรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัฏภาคกระจายตัว (Dispersed phase) โดยเมทริกซ์ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักล้อมรอบวัฏภาคกระจายตัวไว้ วัฏภาคกระจายตัวจะทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ หรืออาจเรียกว่า วัฏภาคเสริมแรง (Reinforced phase) [14]

### 2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต

การแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ได้ 3 ประเภท ได้แก่ Metal-Matrix Composites (MMCs) , Ceramic-Matrix Composites (CMCs), Polymer-Matrix Composite (PMCs) [13]

#### 1. Metal-Matrix Composites

MMCs เป็นวัสดุคอมพอสิตที่มีโลหะหรือโลหะผสมเป็นเมทริกซ์ ส่วนวัสดุที่หน้าที่เสริมแรงนั้นเป็นได้ทั้งอนุภาค หรือเส้นใย ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง ข้อดีของ MMCs คือ สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ ซึ่งดีกว่า PMCs แต่มีราคาแพง มักถูกนำไปใช้เฉพาะงานที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงเฉพาะ การนำความร้อน การทนต่อการสึกหรอ ไม่ดูดซับความชื้น หรือความเสถียรของขนาด (Dimensional stability) เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน MMCs เช่น ชิ้นส่วนประกอบของเครื่องบิน ดาวเทียม ชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

#### 2. Ceramic-Matrix Composites

CMCs เป็นวัสดุเซรามิก ที่มีสมบัติเด่นมากในด้านการทนทานต่อความร้อน ทนการกัดกร่อนจากสภาพอากาศและจากสารเคมี ซึ่งเป็นสมบัติที่เด่นกว่า MMCs และ PMCs แต่มีข้อจำกัดคือ ค่าความต้านทานต่อการแตกหักต่ำเมื่อเทียบกับ MMCs จึงต้องผสม CMCs ด้วยเส้นใยที่มีความทนทานและเหนียวมากกว่า เพื่อเพิ่มความทนแรงกระแทกของเซรามิก ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน CMMs เช่น ใบพัดระบายแก๊สร้อน เตาเผา แผงให้ความร้อน เป็นต้น

### 3. Polymer-Matrix Composite

PMCs เป็นวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ และส่วนเสริมแรงสามารถใช้ได้หลากหลายทั้งแก้ว คาร์บอน อะรามิด เป็นต้น ข้อดีของ PMCs คือ ทนการสึกกร่อนจากสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศได้ดีกว่ากว่า MMCs ทนการกระแทกสูง มีความเสถียรเชิงรูปร่างขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังมีราคาถูกและขึ้นรูปง่าย พอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นเมทริกซ์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท [13] ได้แก่

#### 1) Thermosetting polymer

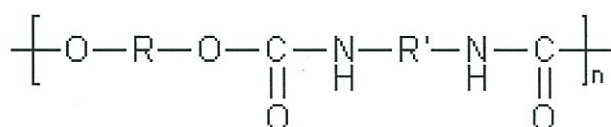
พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิต พลาสติกที่ได้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้และไม่ละลายในตัวทำละลาย เนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวัสดุนั้นเป็นโครงสร้างแหสามมิติ เกิดการเชื่อมโยง(Crosslinking) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป พอลิเมอร์เทอร์โมเซตที่ใช้ส่วนใหญ่ เช่น Epoxy , Polyester และ Vinyl ester เป็นต้น

#### 2) Thermoplastic polymer

พอลิเมอร์กลุ่มนี้มีจุดหลอมเหลว จุดอ่อนตัวที่แตกต่างจากพอลิเมอร์กลุ่มเทอร์โมเซต มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงหรือโซ่กิ่ง สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เกิดการอ่อนตัวและหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง พลาสติกชนิดนี้สามารถนำมาหลอมซ้ำได้ ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมพอสิตจึงขึ้นอยู่กับชนิดและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ส่วนใหญ่ เช่น Polyurethane , Polyethylene และ Polystyrene [16] เป็นต้น

## 2.2 พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) เป็นเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ชนิดเดียวที่สามารถเตรียมให้มีลักษณะตั้งแต่แข็งเหนียวไปจนกระทั่งนุ่มฟูแบบฟองน้ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายลักษณะตัวอย่างเช่น เส้นใย ยางเทียม จนกระทั่งใช้เป็นกาวหรือสารเคลือบผิวโดยโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทนแสดงดังในรูปที่ 2.1

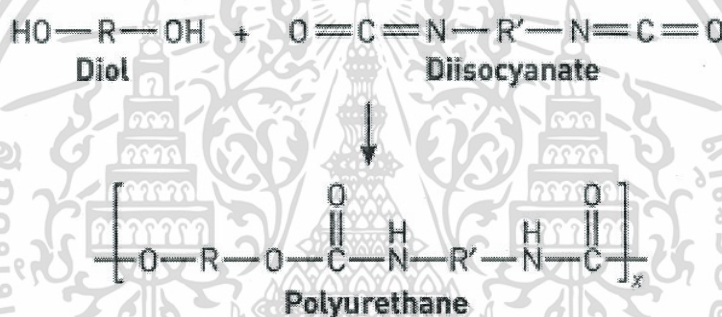


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.1 ปฏิกริยาพื้นฐาน

พอลิยูรีเทนสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกริยาการควบแน่นระหว่างสารตั้งต้นพื้นฐานคือ ไดไอโซไซยาเนตและไดออล ดังภาพที่ 2.2 [6] โดยไดไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ได้แก่ โทลูอินไดไอโซไซยาเนต ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยาเนต และเฮกซะเมทิลีน ไดไอโซไซยาเนต ส่วนไดออลที่ใช้คืออะลิฟาติกไดออล แต่ในปัจจุบันนิยมใช้สารประกอบพอลิเมอริกไฮดรอกซี เช่น พอลิเอสเทอร์ หรือพอลิอีเทอร์ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติการนำไปใช้งานที่หลากหลาย โดยสามารถทำให้มีสมบัติได้หลากหลาย โดยเกิดจากปริมาณสัดส่วนระหว่าง diol และ diisocyanate ในโมเลกุล การมีปริมาณกลุ่ม diisocyanate ที่สูงมีผลทำให้พอลิยูรีเทน มีความแข็งแรงสูง ดังนั้นพอลิยูรีเทนโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ สามารถกล่าวได้ว่า ที่อุณหภูมิสูงจะมีสภาพเป็นเทอร์โมพลาสติก (สามารถแปรรูปได้) และที่อุณหภูมิต่ำจะมีสภาพเป็นเทอร์โมเซตเทียม (มีความแข็งแรงสูงมาก ทนต่อสารเคมี ทนต่อการขีดขีด)



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน [6]

ด้วยสมบัติของพอลิยูรีเทนที่สามารถเตรียมให้เป็นโฟมที่ยืดหยุ่นได้ (flexible urethane foam) และยืดหยุ่นไม่ได้ (rigid urethane foam) จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ในงานหลายด้าน เช่น ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เบาะรถยนต์ ตัวอินซูลเลเตอร์ (Insulators) สำหรับใช้เป็นฉนวนความร้อนในตู้เย็น ภาชนะเก็บของร้อนและเย็น และเป็นส่วนประกอบของเรือเพื่อลดน้ำหนักของเรือ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิยูรีเทนสามารถเตรียมให้เป็นอีลาสโตเมอร์ได้ ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นยางรถยนต์ (ยางตัน) พื้นรองเท้า และยางทนน้ำมัน เพราะคุณสมบัติที่ทนต่อแรงเสียดทานได้มาก มีความยืดหยุ่นดี สามารถต่อต้านน้ำมันและตัวทำละลายทั่วไปได้ดี

พอลิยูรีเทน แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ [6]

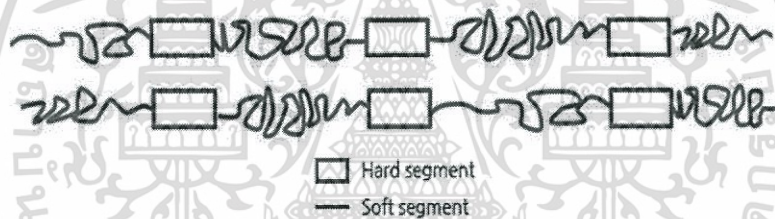
1. โฟมนิ่มหรือโฟมยืดหยุ่น สามารถรองรับน้ำหนักได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นเบาะรองรับ สำหรับเฟอร์นิเจอร์ โฟมชนิดนี้ทนทานต่อตัวทำละลายและความร้อนได้ดี

2. โฟมแข็ง (Rigid foam) คล้ายกับโฟมนิ่ม แต่มีองศาการเชื่อมโยงที่มากกว่า มีความต้านทานต่อการกด ใช้สำหรับเสริมช่องว่างที่ต้องการน้ำหนักเบา เช่น ปีกเครื่องบิน โดยโฟมชนิดนี้จะมีสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ จึงนิยมใช้เป็นฉนวนในกระติกน้ำแข็งหรือในตู้เย็น

3. ยางพอลิยูรีเทน (Polyurethane elastomer) มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง สามารถนำไปใช้เป็นล้อยางหรือยางกันกระแทก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ Cast elastomer, Millable polyurethane และ Thermoplastic polyurethane

### 2.2.2 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU) มีลักษณะเป็น Block copolymer ที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนแข็ง (hard segment) และส่วนนิ่ม (soft segment) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยส่วนแข็งเป็นพันธะยูรีเทนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไดไอโซไซยาเนตและสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น MDI กับไดออล เช่น 1,4-butane-diol ส่วนนิ่มเป็นพันธะเคมีของสายโซ่พอลิเอสเทอร์หรือพอลิอีเทอร์ โดยส่วนประกอบของโครงสร้างของ Isocyanate, Macro-glycol และ Chain extender ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Thermoplastic polyurethane [7]

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของสารตั้งต้นสำหรับ Thermoplastic polyurethane [6]

วัตถุดิบ	โครงสร้างทางเคมี
Isocyanate	<chem>OCN-C6H4-CH2-C6H4-NCO</chem> Methylene-bis(4-phenyl isocyanate), MDI
Macro-glycol	OH-polyester-OH OH-polyether-OH
Chain extender	HO-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -OH 1,4 butane diol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. โครงสร้างส่วนนิ่ม

โครงสร้างส่วนนิ่มเป็นส่วนอสัณฐาน (Amorphous phase) จัดเป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นสูงเกิดจากส่วนของ polyol ที่มีมวลโมเลกุลสูง มีแรง Van der Waals ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล มีลักษณะนิ่มคล้ายยางและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง โดยส่วนประกอบทางเคมีและมวลโมเลกุลของ polyol จะส่งผลต่อสมบัติของ PU ตัวอย่างของ Polyol ต่างๆมีดังนี้ [6]

### 1) Polyether polyol

Polyether polyol เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีหมู่ Hydroxyl กับ Cyclic ether เช่น propylene oxide (PO) และ ethylene oxide (EO) โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ Ethylene glycol (EG), 1,2-propanediol (PG), bisphenol A (BPA), trimethylpropane (TMP) และ glycerol (GLY) เป็นต้น โดย Polyether polyol สามารถใช้งานได้ดีในที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากส่วนที่ไม่มีขั้วของ Polyether ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและมีความต้านทานต่อจุลินทรีย์

### 2) Polyester polyol

Polyester polyol ผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง di/trifunctionalhydroxyl กับ dicarboxylic หรือ acid anhydride โดย di/trifunctionalhydroxyl ที่ใช้ทั่วไปได้แก่ ethylene glycol, 1,2-propanediol, 1,4-butanediol, 1,6-hexanediol, neopentyl glycol, diethylene glycol, glycerol และ trimethylolpropane ส่วนกรด dicarboxylic ที่นิยมใช้ได้แก่ succinic acid, glutaric acid, adipic acid, phthalic anhydride, isophthalic acid และ terephthalic acid โดย Polyester polyol จะมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดี มีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermo oxidative stability) และมีความต้านทานต่อน้ำมัน (Oil resistance) เนื่องจาก Polyester มีขั้ว ไม่ทำปฏิกิริยากับสารประเภทน้ำมัน ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว

### 3) Polycarbonate polyol

Polycarbonate polyol ผลิตได้จากกระบวนการ transesterification เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง dimethylene carbonate (DMC) หรือ diphenyl carbonate (DPC) กับ glycol เช่น 1,6-Hexanediol หรือสามารถผลิตได้จากกระบวนการ copolymerization ระหว่าง alkylene oxide กับ carbondioxide แต่วิธีนี้ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม โดย Polycarbonate polyol มีความเหนียว ทนทานต่อสภาพอากาศและทนต่อกระบวนการ hydrolysis ได้ดี

#### 4) Other polyol

Other polyol สังเคราะห์โดยใช้ Oligomer หรือ Polymer ที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภท Hydroxyl, Carboxylic, Sulfhydryl หรือ Amine ตัวอย่าง Polyol อื่นๆ เช่น Polythioether, Polyacetal, Polyester amide, Alkyl resin และ Polysiloxane เป็นต้น

### 2. โครงสร้างส่วนแข็ง

โครงสร้างส่วนแข็ง เป็นส่วนของ chain extender และ diisocyanate สายโซ่ส่วนแข็งเกิดจากการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้มีความแข็งแรงสูง ซึ่งส่งผลให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติด้านต่างๆดีขึ้น ได้แก่ ด้านความแข็งแรง (Hardness) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) และมอดุลัส (Modulus)

#### 1) Diisocyanate

Diisocyanate ที่ใช้สำหรับสังเคราะห์พอลิยูรีเทนมีทั้ง aromatic, aliphatic และ cycloaliphatic diisocyanate แต่ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ TPU คือ 4,4' - Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) เป็นสารประเภท Aromatic isocyanate ซึ่งมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ hydroxyl ทำให้พอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี

#### 2) Chain extender

Chain extender คือส่วนที่มีหมู่ amine หรือ hydroxyl เป็นองค์ประกอบทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวาง ทำให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติทนความร้อนและสารเคมีมากขึ้น โดยทำปฏิกิริยากับ Diisocyanate จะเกิดเป็นส่วนของผลึก ช่วยเสริมด้านความแข็งแรง ตัวอย่างของ Chain extender ที่นิยมใช้ ได้แก่ 1,4-butanediol

## 2.3 อนุภาคนาโน (Nanoparticles)

### 2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT)

คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกค้นพบขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) [17] โดยการใช้ high resolution transmission electron microscopy (HRTEM) คาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็กๆ ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนจำนวน 6 อะตอมมาจัดเรียงตัวกันเป็นวงแหวนรูป 6 เหลี่ยม จำนวนมากมายมาเรียงตัวกันเป็นผนังท่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนานาเมตร โดยอะตอมเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันแบบ  $sp^2$

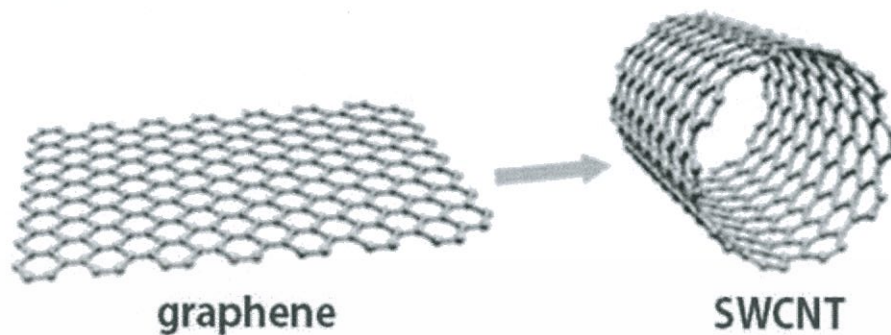
#### 1. ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น

##### 1) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes : SWCNT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากการนำแผ่นกราฟีน 1 แผ่น ในแนวระนาบ 2 มิติ ม้วนแบบไร้ตะเข็บเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีโครงสร้าง 3 รูปแบบ คือ armchair, zigzag และ chiral [18]



รูปที่ 2.4 การม้วนของแผ่นกราฟีนเกิดเป็น SWCNT [19]

2) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes : MWCNT)

ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นจะคล้ายกับแบบผนังชั้นเดียวแต่จะมีจำนวนชั้นกราฟีนที่มากกว่ามาซ้อนทับกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-20 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [19]



รูปที่ 2.5 การม้วนของแผ่นกราฟีนเกิดเป็น MWCNT [19]

## 2. สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

### 1) สมบัติทางไฟฟ้า

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถนำไฟฟ้าได้สูงถึง  $10^9$  A/cm<sup>2</sup> ขณะที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้เพียง  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> นอกจากนี้แล้วคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

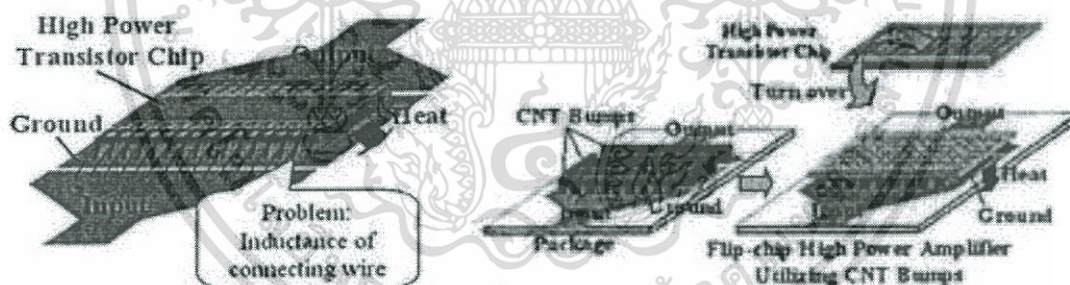
โนทิวบ์ ในสภาวะสุญญากาศได้ ซึ่งสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยมที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่างกันจึงส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน [20]

## 2) สมบัติเชิงกล

โครงสร้างของเพชรมีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อทางพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของแกรไฟต์เกิดจากคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกันกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกัน และอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป โดยพันธะในระนาบเดียวกันของแกรไฟต์จะมีความแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนัก ด้วยลักษณะโครงสร้างที่ม้วนเป็นท่อ รวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าพันธะระหว่างคาร์บอนในเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์แข็งแรงกว่าเพชรและแกรไฟต์ [20]

## 3) สมบัติทางความร้อน

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการนำความร้อนสูงถึง 6000 W/mK นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และทนอุณหภูมิได้ 750 °C ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งในเชิงกายภาพ ดังรูปที่ 2.6 เป็นการนำคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของท่อคาร์บอนมาใช้ผลิตตัวระบายความร้อนให้กับชิปที่ใช้งานกำลังสูง [20]



รูปที่ 2.6 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิป [21]

## 3. การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์

ตัวอย่างการใช้งานคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีดังนี้ ใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน (energy storage), อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (field emission devices), ทรานซิสเตอร์ (transistors), โพรบวัดนาโนและนาโนเซนเซอร์ (nanoprobes and nanosensors), เบบ้าขนาดนาโน (nanotemplates), วัสดุผสม (composite materials) และใช้งานทางด้านเซนเซอร์ (sensors) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

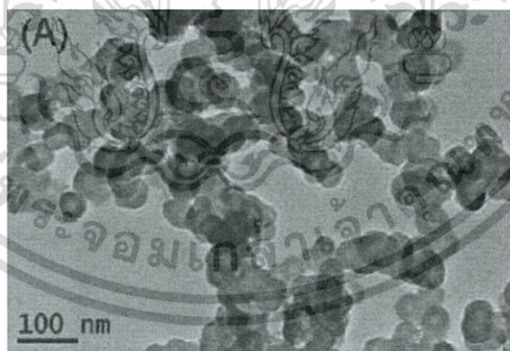
### 2.3.2 คาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็ค เรียกอีกชื่อว่าเขม่าดำ มีลักษณะทางกายภาพเป็นสีดำเนื่องจากเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ โดยคาร์บอนแบล็คจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญและมีปริมาณการใช้งานอย่างมากในอุตสาหกรรมวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านการเสริมแรง เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ช่วยลดต้นทุน และยังมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า [22]

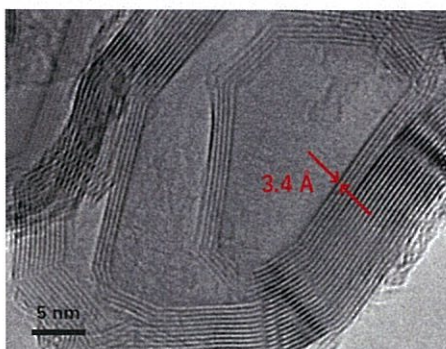
#### 1. โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็คแบ่งได้ 2 ระดับ คือ [23]

1) โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Structure) เป็นโครงสร้างพื้นฐานขนาดเล็ก มีลักษณะโครงสร้างเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างคล้ายพวงอุ้งน เรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregate) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ที่แสดงสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็คด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) โดยแอ็กกรีเกตเกิดจากการหลอมติดของอนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่า “Primary particle” ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์บอนแบล็ค โดยแต่ละ Primary particle เกิดจากการจัดเรียงตัวหลายๆ ชั้นของแผ่นแกรไฟต์ (Graphitic Layer Planes) เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมี แต่โครงสร้างผลึกของคาร์บอนแบล็คจะไม่เป็นระเบียบเหมือนแกรไฟต์ เช่น มีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่า (ประมาณ 3.5 Å) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และอาจมีหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมอื่นอยู่ในโครงสร้างด้วย เช่น ออกซิเจน



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงโครงสร้างแอ็กกรีเกตกำลังขยายต่ำ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ความละเอียดสูง [24]

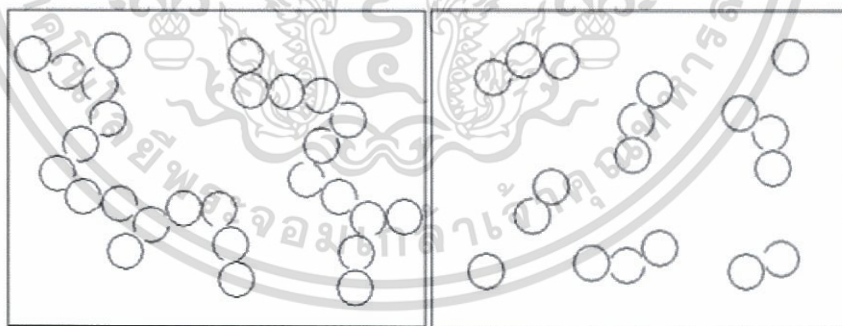


รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของคาร์บอนแบล็ค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ความละเอียดสูง (HRTEM) [24]

โครงสร้างปฐมภูมิของคาร์บอนแบล็ค แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ โครงสร้างต่ำ (Low Structure) และโครงสร้างสูง (High Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

- คาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างต่ำ หมายถึง คาร์บอนแบล็คที่มี Primary particle เก้ากันอย่างเป็นระเบียบ รูปร่างค่อนข้างกลม ไม่มีกิ่งก้านมาก และมีความหนาแน่นสูง

- คาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างสูง หมายถึง คาร์บอนแบล็คที่มีจำนวน Primary particle ต่อหนึ่งแอ็กกรีเกตมาก เก้าติดกันเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ เป็นกิ่งก้านสาขามาก เกะกะ และมีความหนาแน่นต่ำ สามารถดูดซับสารเติมแต่งจำพวกน้ำมันได้มาก เช่น สารหล่อลื่น



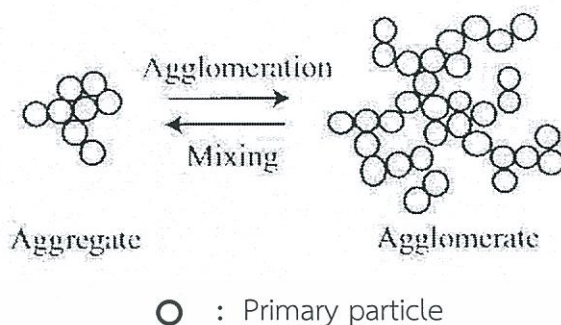
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.9 คาร์บอนแบล็คโครงสร้างสูง (High Structure) (ก) และโครงสร้างต่ำ (Low Structure) (ข)

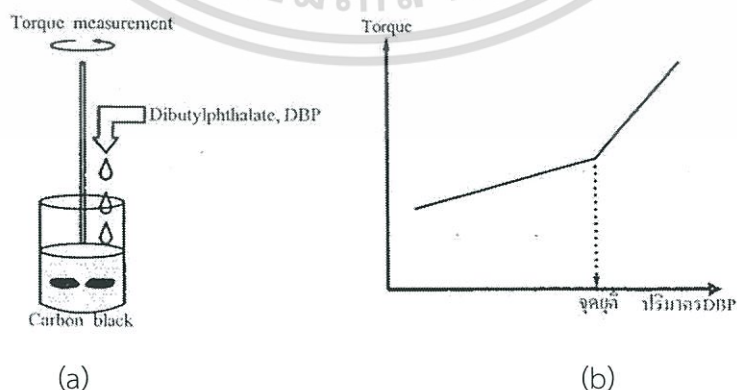
2) โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Structure) เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ เกิดจากกระบวนการผลิตคาร์บอนแบล็คหรือในระหว่างการเก็บกักก่อนใช้งาน ที่แอ็กกรีเกตคาร์บอนแบล็คจับตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ด้วยแรงทุติยภูมิ เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ เรียกว่า “แอ็กโกลเมอเรต” (Agglomerates) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียร ในการผสมที่ดีที่มีแรงเฉือนมากพอจากเครื่องเอกซอสานเป็นเอกซอสานที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสม จะทำให้แอ็กโกลเมอเรตแตกออกเป็นแอ็กกรีเกตขนาดเล็กจำนวนมากและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเกิดโครงสร้างแอ็กกรีเกตและแอ็กโกลเมอเรต [25]

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็คสามารถหาได้โดยเทคนิค “เวฮิเคิลดีมานด์” (Vehicle Demand) หรือเทคนิคการดูดซับ DBP (DBP absorption test) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2414 ทำได้โดยการเติมไดบิวทิลฟทาเลต (Dibutylphthalate, DBP) ให้เป็นพาหะ (Vehicle) ในการผสมกับคาร์บอนแบล็คด้วยเครื่องผสมระบบปิด เช่น Internal mixer แล้วทำการวัดค่าแรงบิดหรือทอร์ก (Torque) ของใบพัดปั่นกวน ในการผสมคาร์บอนแบล็คกับของเหลวชนิด DBP นี้ DBP จะเข้าแทรกตัวในช่องว่าง (Void volume) หรือช่องระหว่างโครงสร้างเกาะของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค และเมื่อเพิ่มปริมาณของ DBP จนถึงจุดๆหนึ่งที่สามารถเข้าแทรกเต็มเต็มโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คได้ จะมี DBP ล้นออกมาบริเวณนอกช่องว่างของคาร์บอนแบล็ค ส่งผลให้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด คล้ายจุดยุติของการไทเทรต (Titration) ดังรูปที่ 2.11 ค่าโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คสามารถรายงานในรูปแบบ “ปริมาตร DBP ต่อน้ำหนักคาร์บอนแบล็ค” เช่น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 100 กรัมของคาร์บอนแบล็ค ( $\text{cm}^3/100 \text{ g.}$ ) [23]



รูปที่ 2.11 การหาโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คด้วยวิธี Vehicle Demand (a) กระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ (b) กราฟแสดงจุดยุติในการหาโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค [23] นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. สมบัติของคาร์บอนแบล็ค

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในการตรวจดูลักษณะทางโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค พบว่ามีโครงสร้างที่ซับซ้อนเนื่องจากการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน แอ็กกรีเกต โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติของคาร์บอนแบล็ค ได้แก่ [23]

### 1) ขนาดของอนุภาค หรือ พื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็ค

ขนาดของอนุภาคทรงกลมเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติพื้นฐาน เช่น ความต้านทานการกระจายตัวเมื่อผสมคาร์บอนแบล็คกับเรซิน หรือสารอื่น โดยปกติแล้วอนุภาคขนาดเล็กจะมีความต้านทานมากกว่าขนาดใหญ่ แต่ในเชิงของการกระจายตัวของอนุภาคนั้น อนุภาคขนาดเล็กจะกระจายตัวได้ยากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่า ทำให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่ม แอ็กโกลเมอเรต ส่งผลให้ต้องใช้แรงเฉือนมากในการทำให้กลุ่มก้อนแตกตัวออกจากกัน แต่ในทางกลับกันอนุภาคขนาดเล็ก จะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ จากการที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า โดยเราสามารถทราบขนาดของอนุภาคหรือพื้นที่ผิวได้จากเทคนิคดังต่อไปนี้

#### 1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

เป็นเทคนิคการหาขนาดของอนุภาค ทำได้โดยตรงจากการวัดขนาดจากภาพถ่าย หรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM) ฯลฯ

#### 1.2 การดูดซับก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ Absorption)

เป็นเทคนิคการหาพื้นที่ผิว ทำได้โดยการวัดปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิคงที่ที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็ค ซึ่งจะดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) โดยจะรายงานค่าเป็นพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักคาร์บอนแบล็ค เช่น  $m^2/g$

#### 1.3 การดูดซับไอโอดีน (Iodine Absorption)

เป็นเทคนิคการหาพื้นที่ผิวแบบดั้งเดิม โดยนำไอโอดีนละลายในโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ผสมกับคาร์บอนแบล็คที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปกรองและไทเทรตเพื่อหาปริมาณไอโอดีนที่เหลือ ปริมาณไอโอดีนที่เหลือจะแสดงให้เห็นว่าถูกคาร์บอนแบล็คดูดซับไปมากแค่ไหน จึงสามารถบ่งบอกถึงปริมาณพื้นที่ผิวได้

#### 1.4 การหาค่าดับแสง (Tinting Strength)

เป็นวิธีการหาขนาดของอนุภาคโดยวัดสมบัติทางแสง คือความสามารถของวัตถุในการบดบังแสง ทำได้โดยการผสมคาร์บอนแบล็คเข้ากับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และน้ำมัน เพื่อให้ได้เป็นของเหลวหนืด(Paste) สีเทา จากนั้นทำการวัดการดูดกลืนแสง (Optic absorbance) โดยอนุภาคขนาดเล็กจะสามารถจัดเรียงอนุภาคกันได้หนาแน่นมากกว่าขนาดใหญ่ เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจึงทำให้เห็นว่าความสามารถในการบดบังแสงของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ จึงเห็นตัวอย่างที่ผสมออกมาสีดำนากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) เคมีของพื้นผิวและอันตรกิริยาของคาร์บอนแบล็คกับพอลิเมอร์

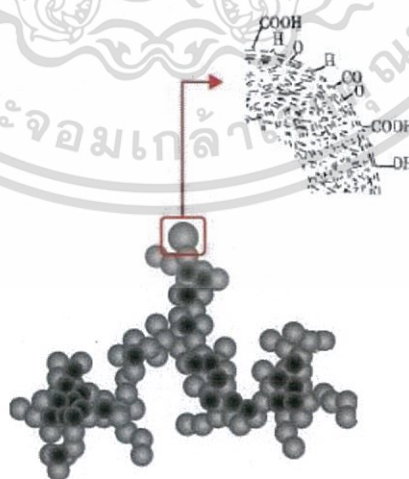
อันตรกิริยาของคาร์บอนแบล็คกับพอลิเมอร์อันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนแบล็คกับพอลิเมอร์นั้นมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการเสริมแรง (Reinforcement) ของคาร์บอนแบล็ค กล่าวคือถ้าคาร์บอนแบล็คมีอันตรกิริยากับพอลิเมอร์มาก จะส่งผลให้ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนแบล็คกับพอลิเมอร์นั้นเกิดในหลายลักษณะ ได้แก่ [23]

### 2.1 การยึดเกาะทางกายภาพ

เนื่องจากคาร์บอนแบล็คโดยเฉพาะที่มีโครงสร้างสูง (High Structure) จะมีความซับซ้อนเป็นกิ่งก้าน และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถแทรกตัวระหว่างโครงสร้างและเกิดการยึดติดที่ติดกับคาร์บอนแบล็ค เช่น เกิดการล็อกติดเชิงกล (Mechanical interlocking)

### 2.2 การยึดเกาะด้วยพันธะเคมี

เนื่องจากพื้นผิวของคาร์บอนแบล็คมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น บริเวณริมแผ่นแกรไฟต์ (Graphite basal planes) โดยเฉพาะในคาร์บอนแบล็คชนิดเฟอเนสและแชลแนล ซึ่งจะพบหมู่ฟังก์ชันที่มีอะตอมออกซิเจน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ฟีนอล (Phenol) ควิโนน (Quinone) และแลคโตน (Lactone) ดังรูปที่ 2.12 โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง (Grafting) โดยอาจเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสม (Mixing) หรือการขึ้นรูป (Processing) เนื่องจากในการผสมที่เกิดแรงเฉือนสูงอาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ปลายสายโซ่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง เกิดเป็นพันธะเคมีเชื่อมต่อบริเวณสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนแบล็ค



รูปที่ 2.12 หมู่ฟังก์ชันบริเวณริมแผ่นแกรไฟต์ของคาร์บอนแบล็ค [22]

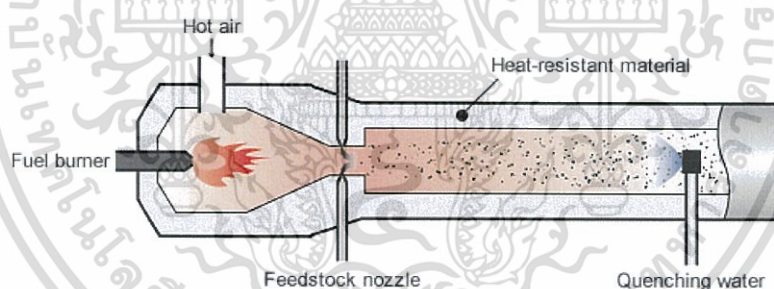
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ประเภทของคาร์บอนแบล็ค

แบ่งตามวิธีการสังเคราะห์ได้เป็น 3 ประเภท [22]

#### 1) คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส (Furnace Black)

คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส เป็นชนิดที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายและมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด คาร์บอนแบล็คชนิดนี้ผลิตได้จากปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ของสารไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง เเผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนมากเกินไป (Excess Air) เกิดเป็นอากาศร้อนหมุนวนภายในเตาเผาบริเวณเผาไหม้ โดยน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นวัตถุดิบ นิยมใช้เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากขบวนการกลั่นน้ำมัน (Refinery Heavy oil) ที่มีสารอะโรมาติก (Aromatic) ปริมาณมาก จะถูกฉีดเข้าไปในเตาเผาเพื่อทำการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์กลายเป็นกากคาร์บอน ลักษณะเป็นก้อนคาร์บอนแบล็คปริมาณมาก ซึ่งจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ (Water Quench) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนสจะมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ที่เรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregate) มีโครงสร้างสูง (High Structure) มีขนาดเล็กประมาณ 10 – 100 นาโนเมตร และมีปริมาณออกซิเจนต่ำ (มักจะน้อยกว่า 1%) ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันอะตอมออกซิเจนบางประเภท หรือออกซีไฮโดรคาร์บอน (Oxyhydrocarbons) ปริมาณเล็กน้อย พื้นผิวของคาร์บอนแบล็คจึงเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)



รูปที่ 2.13 วิธีการผลิตคาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส

#### 2) คาร์บอนแบล็คชนิดเทอร์มอล (Thermal Blacks)

คาร์บอนแบล็คชนิดเทอร์มอลนี้เกิดจากขบวนการแตกตัว (Cracking) ของน้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน โดยการสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ Tandem mode เป็นการใช้เตาปฏิกรณ์ 2 ตัวทำงานสลับกัน โดยมี Cycle time ประมาณ 5-8 นาที จะเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวร้อนภายในเตาเผาอุณหภูมิสูง ได้เป็นคาร์บอนแบล็คที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ โดยขนาดของคาร์บอนแบล็คชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ ประมาณ 300-500 นาโนเมตร มีลักษณะเป็นก้อนกลม โครงสร้างต่ำและมีพื้นที่ผิวน้อย

### 3) คาร์บอนแบล็คชนิดแชนแนล (Channel Blacks)

มีกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างล่าสมัยและไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่รบกวนต่อสิ่งแวดล้อม โดยเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติในเตาเผา โดยจะเกิดเป็นเขม่าเกาะสะสมบริเวณผิวภายในท่อเหล็กรูปตัว H ( H-shape steel ) โดยคาร์บอนแบล็คชนิดนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันเป็นจำนวนมากที่บริเวณปลายสายโซ่ และมีขนาดเล็กมากประมาณ 1-3 นาโนเมตร จึงนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสารเคลือบ เช่น สี เป็นต้น

จากวิธีการผลิตคาร์บอนแบล็คทั้ง 3 ประเภทนั้น ทำให้คาร์บอนแบล็คที่ได้มีสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติต่างๆของคาร์บอนแบล็คแต่ละชนิด

ลักษณะ	Furnace	Thermal	Channel
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm.)	10 - 100	100 - 500	1 - 3
พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	27 - 145	7 - 11	100 - 1125
การดูดซับน้ำมัน (ml/g)	0.67 - 1.55	0.32 - 0.47	1 - 6
ปริมาณสารระเหยได้ (%)	0.3 - 2.8	0.1 - 1	3.5 - 16
ปริมาณเถ้า (%)	0.1 - 1	0.2 - 0.5	0 - 0.1
ปริมาณกำมะถัน (%)	0.5 - 1.5	10 ppm	0 - 0.1
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5 - 9.5	7 - 9	3 - 6

### 4. การประยุกต์ใช้คาร์บอนแบล็ค

ในปัจจุบันคาร์บอนแบล็คถูกใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์มากถึง 90% เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเสริมแรงที่ตอบสนองความต้องการในยางรถยนต์อย่างชัดเจน อีกทั้งยังมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านอื่น เช่น อุตสาหกรรมสี (Pigmentation), สารช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Stabilization) และเป็นสารที่จัดว่ามีความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductive agents) จึงมีความหลากหลายในด้านของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูงในชีวิตประจำวัน ประกอบด้วย [26]

#### 1) ยางรถยนต์และอุตสาหกรรมยาง

คาร์บอนแบล็คที่เติมลงในยาง จะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง หรือเรียกว่าสารเสริมแรง ซึ่งการใช้งานในอุตสาหกรรมยางที่มากที่สุดคือยางรถยนต์ โดยในแต่ละส่วนของยางรถยนต์จะใช้คาร์บอนแบล็คต่างชนิดกัน เช่น ยางชั้นใน ขอบยางด้านข้าง และหน้ายาง เนื่องจากแต่ละส่วนต้องการคุณสมบัติเฉพาะการใช้งานที่แตกต่างกัน นอกจากนี้คาร์บอนแบล็คยังถูกใส่เป็นสารตัวเติมลงในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ เช่น เข็มขัด (Belts), ท่อ (Hoses), ปะเก็น (Gaskets), ไดอะแฟรม (Diaphragms), ตัวถังกันชน (Chassis bumpers), รองเท้าบูท

(Boots), ใบปัดน้ำฝน (Wiper blades), ล้อสายพานลำเลียง (Conveyor wheels) และปลอกยางหลายชนิด (Grommets)

## 2) พลาสติก

ปัจจุบันนิยมใช้คาร์บอนแบล็คกันอย่างหลากหลายในบรรจุภัณฑ์นำไฟฟ้า, फिल्म, เส้นใย, แม่พิมพ์, ท่อ, สายเคเบิลกึ่งนำไฟฟ้า และเป็นสารประกอบในผลิตภัณฑ์ เช่น กระจกสอด, กระจกอุตสาหกรรม, फिल्मทางการเกษตร, फिल्मยืด และการใช้งานเทอร์โมพลาสติกชนิดต่างๆ เช่น อุปกรณ์ในรถยนต์, ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, เครื่องใช้ครัวเรือน และบรรจุภัณฑ์พลาสติกต่างๆ

## 3) สารประกอบป้องกันไฟฟ้าสถิต

คาร์บอนแบล็คถูกออกแบบในการเปลี่ยนสมบัติของชิ้นงานในด้านการนำไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนลักษณะความเป็นฉนวนไฟฟ้าไปเป็นตัวนำไฟฟ้าในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์, ชิ้นส่วนของรถยนต์ และผลิตภัณฑ์ที่การใช้งานต้องการความปลอดภัยสูง

## 4) สารเคลือบประสิทธิภาพสูง

คาร์บอนแบล็คถูกใช้อย่างกว้างขวางในการเป็นเม็ดสีและสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ เรือ อากาศยาน การตกแต่งอาคารต่างๆ งานไม้ สีในอุตสาหกรรม รวมถึงการใช้เป็นส่วนผสมในหมึกพิมพ์และโทนเนอร์ (Toners and Printing Inks)

## 2.4 พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า

พอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า (Electrically conductive polymer composites, ECPs) เกิดจากการเติมสารตัวเติมที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า เช่น คาร์บอนแบล็ค, คาร์บอนนาโนทิวบ์, กราฟีน ฯลฯ ผสมลงในเนื้อเมทริกซ์ (ทั้ง Thermoplastic และ Thermoset) ซึ่งแต่เดิมมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ให้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า โดยปริมาณสารตัวเติมที่เติมลงไปจะต้องมีปริมาณเกินสัดส่วนวิกฤตเพื่อให้เกิดเป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่อกัน นำมาซึ่งสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยปัจจุบัน ECPs มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น Antistatic, Electrostatic dissipation materials, Positive temperature coefficient material, Electromagnetic interference shielding [27]

### 2.4.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ทฤษฎีกลไกการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยมีสารตัวเติมนำไฟฟ้ากระจายตัวแบบสุ่ม แบ่งเป็น 3 ทฤษฎี คือ [27]

#### 1) ทฤษฎี Conductive path

การสร้างโครงข่ายการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมนำไฟฟ้าในเนื้อเมทริกซ์ ซึ่งโครงข่ายของสารตัวเติมเกิดจากอนุภาคหรือกลุ่มก้อนที่สัมผัสหรือติดกัน ส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งด้วยโครงข่ายของสารตัวเติมที่สร้างขึ้นเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า ดังนั้นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนของสารตัวเติมสูงกว่าสัดส่วนวิกฤต (Critical concentration หรือ Percolation limit)

## 2) ทฤษฎี Electron tunneling

การนำไฟฟ้าเกิดจากการที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดข้ามผ่านช่องว่างหรือ Tunneling ผ่านพลังงานของตัวกีดขวาง (Barrier) ระหว่างองค์ประกอบในเนื้อเมทริกซ์ ซึ่งระยะห่างระหว่างช่องว่างอยู่ในช่วงที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดได้ (ระดับนาโนเมตร) โดยทฤษฎีนี้มีความแตกต่างจากทฤษฎีแรกคือ สัดส่วนสารตัวเติมวิกฤตของทฤษฎีนี้จะน้อยกว่าสัดส่วนวิกฤตของทฤษฎีแรก

## 3) ทฤษฎี Electric field radiation

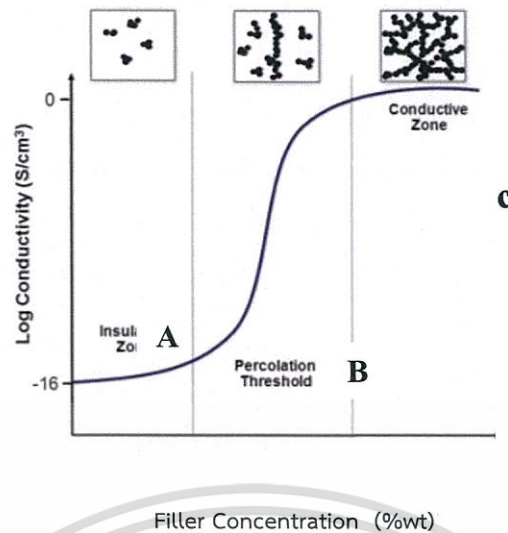
การนำไฟฟ้าเกิดจากการไหลของประจุจากการให้สนามไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบหรืออนุภาคสารตัวเติม แต่ทฤษฎีนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อมีสัดส่วนของสารตัวเติมนำไฟฟ้าน้อยกว่าสัดส่วนวิกฤต แต่ทฤษฎีนี้จะเป็ความจริงก็ต่อเมื่อสารตัวเติมในปริมาณสูงที่อุณหภูมิสูง

### 2.4.2 กลไกการเกิดพอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้า

จากทฤษฎี Conductive pathway สามารถอธิบายการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตได้ จากการเติมสารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้าลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เดิมมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าด้วยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ต่างๆ โดยต้องเติมสารตัวเติมที่มีสมบัตินำไฟฟ้าในปริมาณมากเกินกว่าสัดส่วนวิกฤต (Critical volume fraction) ที่เรียกว่าสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (Percolation threshold) คือประมาณ 20-80% โดยปริมาตร หรือ 70% โดยน้ำหนัก เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า (Conductive network) ทั่วตลอดเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ อิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง นำมาซึ่งการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและเปลี่ยนจากความเป็นฉนวนไฟฟ้าเป็นสารกึ่งนำไฟฟ้าหรือตัวนำไฟฟ้าได้ ส่งผลให้ค่าความต้านทานของคอมพอสิตลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิตมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนโดยปริมาตรและโครงสร้างการเรียงติดกันของเฟสกระจายตัวของสารตัวเติม [28]

ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยบริเวณ A เป็นช่วงที่มีสารตัวเติมนำไฟฟ้าในปริมาณน้อย วัสดุคอมพอสิตจึงแสดงสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เรียกบริเวณนี้ว่า Insulation zone เนื่องจากสารตัวเติมมีการกระจายอยู่ในเนื้อเมทริกซ์โดยไม่มีการสัมผัสหรือเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาค บริเวณ B เส้นกราฟชันสูงขึ้น แสดงถึงค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงอย่างชัดเจน เรียกบริเวณนี้ว่า Percolation region โดยในบริเวณนี้จะเริ่มมีการเกิดการสัมผัสและเชื่อมต่อกันระหว่างแต่ละอนุภาคนำมาซึ่งสมบัติการนำไฟฟ้า และบริเวณ C มีการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมขึ้นอีก แต่ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการสารตัวเติมที่ใส่ไป จะเข้าไปเสริมโครงสร้างตาข่ายให้สมบูรณ์มากขึ้นจากเดิมเท่านั้น เรียกบริเวณนี้ว่า Conducting zone [28]

ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



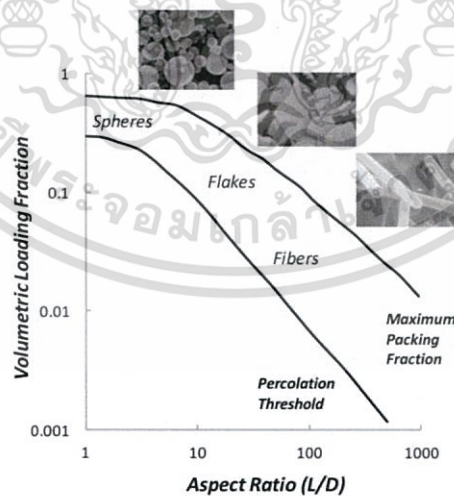
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค [28]

#### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีหลายปัจจัย ดังนี้ [29]

##### 1) Aspect ratio

สารตัวเติมนำไฟฟ้าที่มีลักษณะของอนุภาคเป็นท่อ (Tube particles) จะมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Aspect ratio,  $L/d$ ) ที่มากกว่าอนุภาคทรงกลม (Spherical particles) จึงมีค่าสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคต่ำกว่าอนุภาคทรงกลม ดังแสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 ค่า Percolation Threshold ที่แตกต่างกันของอนุภาคทรงกลมและอนุภาคเป็นท่อ [29]

##### 2) การกระจายตัว (Dispersion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มก้อนแอ็กโกเมอเรตของอนุภาคสารตัวเติม ควรเกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ เพื่อเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคเป็นโครงข่าย ทั้งนี้การเกิดเป็นการรวมกลุ่มก้อนหรือการกระจายตัว จะขึ้นอยู่กับแรงเฉือน (Shear) ในขั้นตอนการผสม

### 3) การจัดเรียงตัว (Orientation)

การจัดเรียงตัวแบบสุ่มของอนุภาคสารตัวเติมจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคมากกว่าการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ

### 4) Tunnel effect

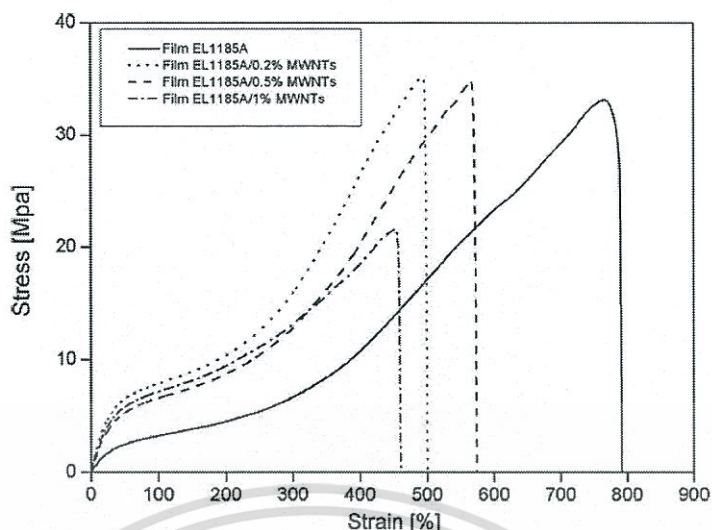
เป็นลักษณะการนำไฟฟ้าของอนุภาคสารตัวเติมชนิดท่อ หากผนังท่อของอนุภาคมีความบางในระดับนาโนเมตร จะพบว่าอิเล็กตรอนบางส่วนสามารถเกิด Tunneling ผ่านมายังอีกฝั่งหนึ่งของผนังได้

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต เช่น กระบวนการขึ้นรูปคอมพอสิตที่แตกต่างกัน จะมีแรงเฉือนที่แตกต่างกัน จึงส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารตัวเติม ส่งผลกระทบต่อทิศทางการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิต นอกจากนี้สมบัติความต้านทานระหว่างผิวหน้าของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ก็ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าเช่นกัน เนื่องจากพลังงานอิสระของผิวหน้าของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์มีอิทธิพลต่อการสัมผัสกัน โดยวัสดุที่มีค่าพลังงานผิวหน้าอิสระต่างกันน้อย จะทำให้สัมผัสกันและเข้ากันได้ดีกว่า

## 2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 ผลกระทบจากความเข้มข้นของ MWCNT ต่อสมบัติเชิงกล

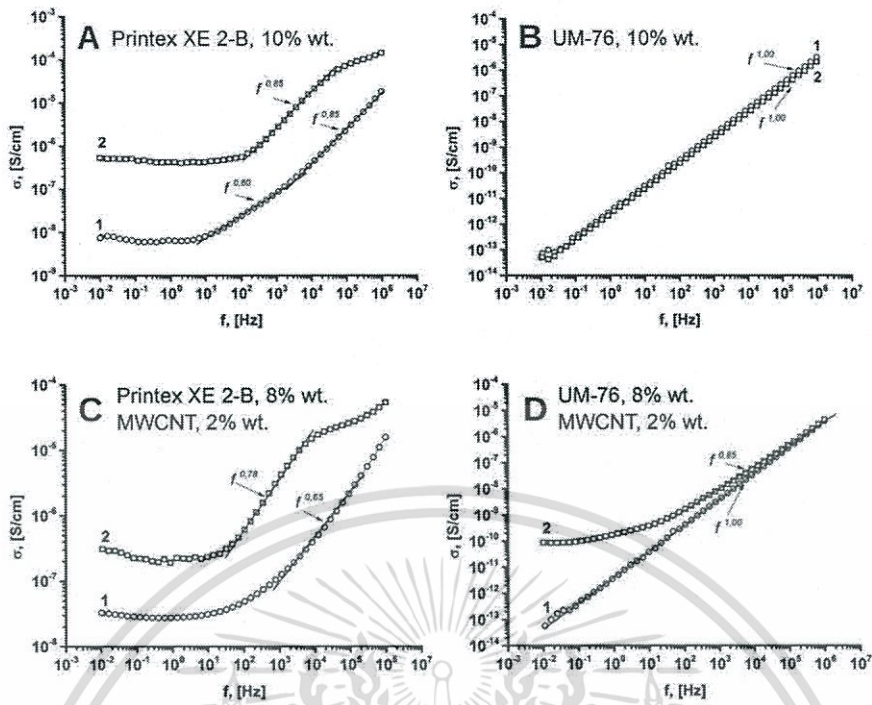
Russo และคณะ [29] ได้ทำการศึกษางานวิจัยเรื่องการเสริมแรงฟิล์ม TPU ด้วย MWCNT ที่ส่งผลต่อสมบัติด้านแรงดึง, ความร้อน และสัญญาณวิทยา โดยทำการเติม MWCNT ปริมาณ 0.2 ถึง 1.0 %wt ด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวและอัดขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ในกระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิเท่ากับ 200 °C และความเร็วสกรูเท่ากับ 90 rpm จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นและการกระจายตัวของ MWCNT ได้ส่งผลต่อสมบัติในด้านต่างๆรวมถึงการเกิดผลึกของ TPU คอมพอสิต และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 0 จนถึง 1 %wt TPU มีค่าความเหนียว, Elongation at break ที่ลดลง แต่พบว่าค่า tensile strength เพิ่มขึ้นจนถึง 0.5% หลังจากนั้นกลับลดลง เนื่องจากเกิดความเครียดจากการเกิดผลึกของ TPU ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟ Stress-Strain ของฟิล์ม TPU นาโนคอมพอสิต  
(จากงานวิจัยของ Russo และคณะ [29])

## 2.5.2 ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมผสมระหว่าง CB และ MWCNT ต่อสมบัติการนำไฟฟ้า

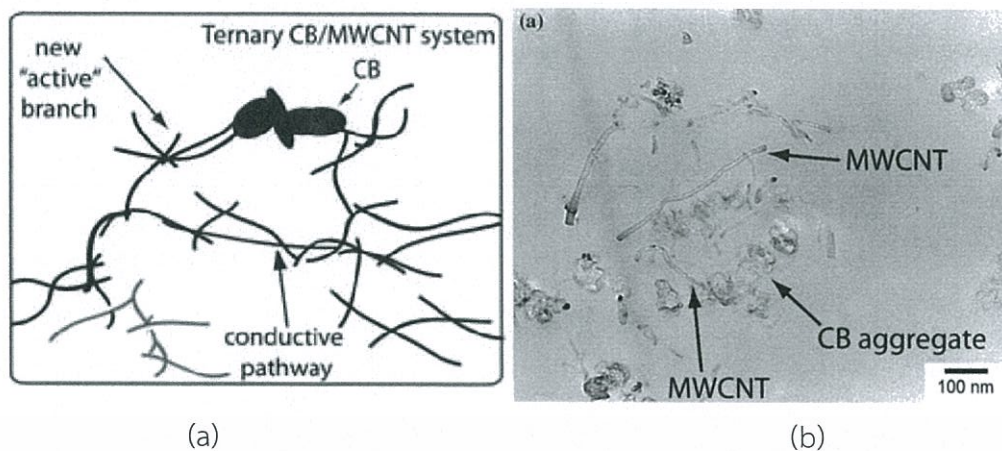
Burmistrov และคณะ [9] ทำการศึกษาผลกระทบต่อการนำไฟฟ้าจากสารตัวเติมผสมระหว่าง CB กับ MWCNT ในโพลีเมอร์ โดยใช้ CB ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ Printex XE-2B และ UM-76 ซึ่งมีโพลีเมอร์ระหว่าง Ethylen-1-octene กับ Lucene LC370 ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังใช้วิธีการผสมที่ต่างกัน 2 วิธี คือ เครื่องผสม Haake Rheomix PolyLab และเครื่อง Twin roller mixer จากการศึกษาพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างคาร์บอนแบล็คกับ MWCNT (Printex XE-2B กับ MWCNT หรือ UM-76 กับ MWCNT) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็ค (Printex XE-2B หรือ UM-76) เพียงอย่างเดียว เนื่องจาก MWCNT มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำทำให้ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้ดี และพบว่าการผสมด้วยเครื่อง Twin roller mixer ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าการผสมด้วยเครื่อง Haake Rheomix PolyLab ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่อง twin roller mixer ให้แรงเฉือนที่มากกว่าจึงเกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมคาร์บอนได้ดีกว่านั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของโคพอลิเมอร์ที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่าง CB และ MWCNT โดยวิธีการผสมด้วย Haake Rheomix PolyLab (1) และ twin-roller mixer (2)

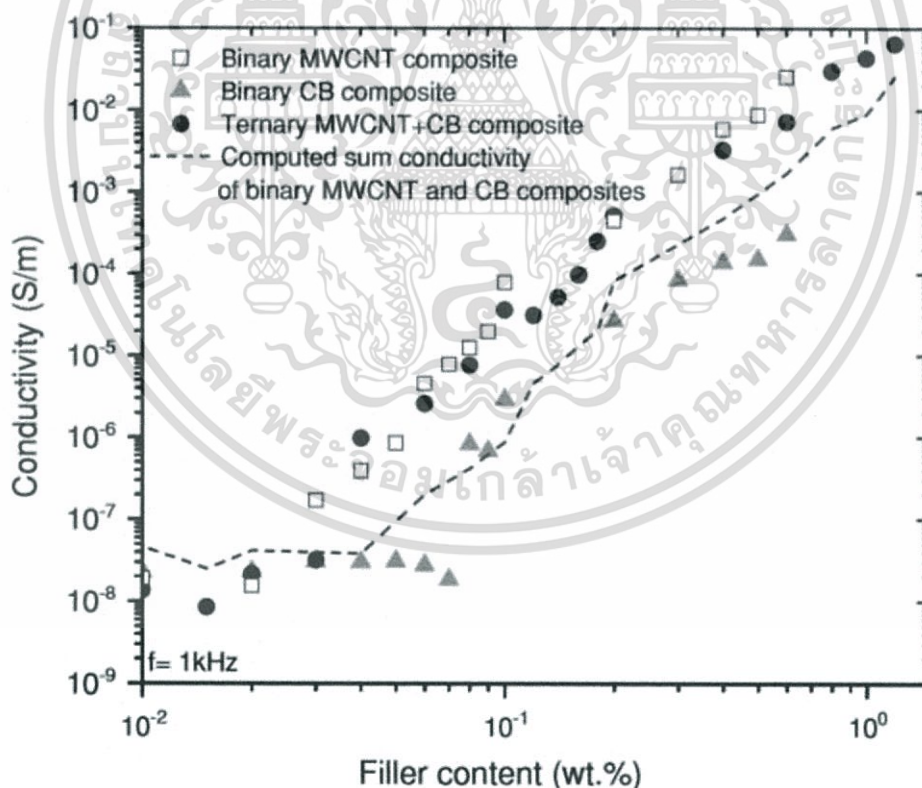
(จากงานวิจัยของ Burmistrov และคณะ [9])

Sumfleth และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ของ CB และ MWCNT ในการเป็นสารตัวเติมนำไฟฟ้าใน Epoxy polymers และอธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าของ Ternary system CB/MWCNT-Epoxy เทียบกับ Binary system MWCNT และ Binary system CB โดยใช้เครื่องผสม Three-roll mill ในการผสมอนุภาคนาโนกับเรซิน จากการผสมที่มีแรงเฉือนสูงจึงทำให้สารตัวเติมเกิดการกระจายตัวที่ดี โดยกำหนดช่วงของความเข้มข้นสารตัวเติมรวม (CB+MWCNT) เท่ากับ 0.0025 - 0.6 %wt โดยใช้อัตราส่วนของ CB:MWCNT เป็น 1:1 เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบการนำไฟฟ้าโดยเครื่อง Impedance Spectroscopy และตรวจสอบโครงสร้างภายในโดยใช้ Transmission light microscope พบว่าค่า Percolation threshold ของ Ternary CB/MWCNT เท่ากับ 0.025 %wt, Binary MWCNT เท่ากับ 0.03 %wt และ Binary CB เท่ากับ 0.085 %wt โดยจะเห็นว่า Ternary และ Binary MWCNT มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ต่ำกว่า Binary CB มาก เนื่องจาก MWCNT มี Aspect ratio สูง ส่งผลให้ค่า Percolation ต่ำกว่า CB นอกจากนี้ในส่วนของการตรวจสอบโครงสร้าง Ternary system พบว่ามีการสร้าง Network structure ร่วมกันของ MWCNT และ CB โดยพบว่า CB จะเกิดการรวมตัวกันที่บริเวณปลายท่อ MWCNT เพื่อเชื่อม MWCNT 2 เส้นเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.18 เกิดเป็นเส้นทางใหม่ในการนำไฟฟ้า และพบว่าจากระบบข้างต้นนี้ จะส่งผลให้ค่าการต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นเล็กน้อย จึงเป็นสาเหตุของค่า Percolation threshold ของ Ternary system มีค่าต่ำกว่า Binary MWCNT ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 (a) ภาพจำลองการรวมตัวกันของ CB ที่บริเวณปลายท่อของ MWCNT ในระบบ Ternary (b) ภาพแสดงการกระจายตัวของ CB และ MWCNT ในระบบ Ternary โดยใช้กล้อง TEM Microscope

(จากงานวิจัยของ Sumfleth และคณะ [30])



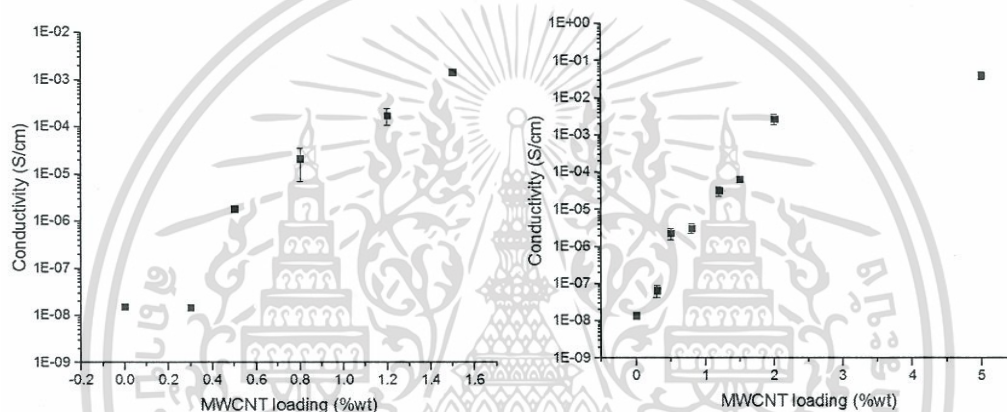
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่า Percolation threshold ของทั้ง 3 ระบบ(Binary CB, Binary MWCNT, Ternary)

(จากงานวิจัยของ Sumfleth และคณะ [30])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ผลกระทบจากอุณหภูมิในการเตรียมนาโนคอมพอสิตต่อจุดนำไฟฟ้า

ชลธิชา หอมวันและคณะ [12] ได้ทำการศึกษางานวิจัยเรื่องจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทนกับคาร์บอนนาโนทิวบ์คอมพอสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว โดยทำการศึกษาจุดนำไฟฟ้า ( $p_c$ ) ใน PU ที่มีโครงสร้างส่วนนิ้มแตกต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) และใช้ปริมาณ MWCNT ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า PU-ester นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 190 และ 200 °C มีค่า  $p_c = 0.55$  และ 0.45 ตามลำดับ ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 200 และ 210 °C มีค่า  $p_c = 0.50$  และ 0.43 ตามลำดับ สรุปได้ว่าอุณหภูมิในการเตรียมที่สูงขึ้นส่งผลให้ MWCNT มีจุดนำไฟฟ้าที่ต่ำลงและมีโครงข่ายเชื่อมโยงการนำไฟฟ้าที่แพร่กระจายมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT ที่เติมลงใน (a) PU-ester นาโนคอมพอสิต และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต (จากงานวิจัยของชลธิชา หอมวันและคณะ [12])

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของ CB และ MWCNT ใน PU นาโนคอมโพสิตที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง CB:MWCNT ในการเตรียมนาโนคอมโพสิต ต่อสมบัตินำไฟฟ้าใน PU/MWCNT/CB นาโนคอมโพสิต

ตอนที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมโพสิต ใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนเติมที่ต่างกัน คือ Polyester และ Polyether

#### 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

1. PU-ester : Desmopan 3695AU DPS101 ของบริษัท Bayer มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ  $550 \text{ kg/cm}^2$ , โมดูลัสที่ 100% เท่ากับ  $120 \text{ kg/cm}^2$  และความหนาแน่นเท่ากับ  $1.20 \text{ g/cm}^3$
2. PU-ether : Utechlan UE-95AU ของบริษัท Bayer มีค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ  $450 \text{ kg/cm}^2$ , โมดูลัสที่ 100% เท่ากับ  $130 \text{ kg/cm}^2$  และความหนาแน่นเท่ากับ  $1.14 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
3. MWCNT ของบริษัท Sigma-Aldrich
4. CB ของบริษัท Orion Engineered Carbons
5. โพลีเมอร์คอมปาวด์สำหรับล้างเครื่องผสมระบบปิด : LIOCLEAN-Z Lot No. Z610050 ของบริษัท Toyo Ink (Thailand)
6. กาวอีพอกซีชนิดนำไฟฟ้า : EPO-TEX EE129-4 ของบริษัท Epoxy Technology
7. PELCO Conductive Silver Paint ของบริษัท Ted Pella
8. สายไฟ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 mm ของบริษัท Thai Wonderful Wire Cable
9. โถดูดความชื้น (Desiccator)
10. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) รุ่น PL 2100 ของบริษัท Brabender Plasti-Corder
11. เครื่องกดอัด (Compression machine) ของบริษัท Mach Group (1992)
12. Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น 204 F1 Phoenix® ของบริษัท Netzsch
13. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7610F ของบริษัท JOEL
14. LCR Meter รุ่น E4980A ของบริษัท Agilent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

16. Fourier Transform Raman Spectrometer (FT-Raman) รุ่น Spectrum GX ของบริษัท Perkin Elmer

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอลิเมอร์

เตรียมคอมพอลิเมอร์ระหว่าง PU, MWCNT และ CB โดยการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องผสมระบบปิด มีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. เตรียมเมท PU (PU-ether และ PU-ester) โดยนำเมท PU ทั้ง 2 ชนิด อบไล้ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. อบไล้ความชื้น MWCNT และ CB ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. ชั่ง PU 48 กรัม แล้วชั่ง MWCNT และ CB โดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการเตรียมอ้างอิงจากงานวิจัยของจากงานวิจัยของ Russo และคณะ [29] ดังนี้ (ชื่อเรียกสูตรและอัตราส่วนความเข้มข้นดังตารางที่ 3.1)

3.1 กำหนดความเข้มข้นของ MWCNT = 0.3, 0.4, 0.5 %wt

3.2 อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง MWCNT:CB = 1:1, 1:3, 1:5, 1:7

ตารางที่ 3.1 ชื่อเรียกสูตร PU/MWCNT/CB ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ

Nanocomposite	PU-ester/ether	MWCNT:CB	MWCNT (%wt)	CB (%wt)
Unfilled Es	48	-	-	-
0.3Es	48	-	0.3	-
0.4Es	48	-	0.4	-
0.5Es	48	-	0.5	-
Es0.3	48	-	-	0.3
Es3.5	48	-	-	3.5
0.3Es1:1	48	1:1	0.3	0.3
0.3Es1:3	48	1:3	0.3	0.9
0.3Es1:5	48	1:5	0.3	1.5
0.3Es1:7	48	1:7	0.3	2.1
0.4Es1:1	48	1:1	0.4	0.4
0.4Es1:3	48	1:3	0.4	1.2
0.4Es1:5	48	1:5	0.4	2.0
0.4Es1:7	48	1:7	0.4	2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nanocomposite	PU-ester/ether	MWCNT:CB	MWCNT (%wt)	CB (%wt)
0.5Es1:1	48	1:1	0.5	0.5
0.5Es1:3	48	1:3	0.5	1.5
0.5Es1:5	48	1:5	0.5	2.5
0.5Es1:7	48	1:7	0.5	3.5
Unfilled Eth	48	-	-	-
0.3Eth	48	-	0.3	-
0.4Eth	48	-	0.4	-
0.5Eth	48	-	0.5	-
Eth0.3	48	-	-	0.3
Eth3.5	48	-	-	3.5
0.3Eth1:1	48	1:1	0.3	0.3
0.3Eth1:3	48	1:3	0.3	0.9
0.3Eth1:5	48	1:5	0.3	1.5
0.3Eth1:7	48	1:7	0.3	2.1
0.4Eth1:1	48	1:1	0.4	0.4
0.4Eth1:3	48	1:3	0.4	1.2
0.4Eth1:5	48	1:5	0.4	2.0
0.4Eth1:7	48	1:7	0.4	2.8
0.5Eth1:1	48	1:1	0.5	0.5
0.5Eth1:3	48	1:3	0.5	1.5
0.5Eth1:5	48	1:5	0.5	2.5
0.5Eth1:7	48	1:7	0.5	3.5

3.3 เตรียม PU-ester นาโนคอมพอสิต อุณหภูมิในการผสม 200 °C เวลา 10 นาที และเตรียม PU-ether นาโนคอมพอสิต อุณหภูมิในการผสม 210 °C เวลา 8 นาที โดยกำหนดให้ความเร็วในการหมุนสกรูเท่ากับ 60 rpm ในนาโนคอมพอสิตทั้งสองชนิด

### 3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุนาโนคอมพอสิต

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิต

#### 3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

DSC (Differential Scanning Calorimeter) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก และการเกิดปฏิกิริยาเคมี (ดังรูปที่ 3.1) เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกวางบนจานอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ นอกจากนี้ภายในเตายังมีสารอ้างอิงซึ่งเป็นจานอะลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่ง DSC สามารถวิเคราะห์ทดสอบ จุดหลอมเหลว (Melting points), ความร้อนจำเพาะ (Specific heat), ค่าพลศาสตร์ (Kinetics), ความบริสุทธิ์ของวัสดุ (Purity of materials), ความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal stability), การเปลี่ยนสถานะ (Phase transition), สภาพเป็นผลึก (Crystallinity), สารที่มีหลายโครงสร้าง (Polymorphism), การดูดหรือคายพลังงาน (Desorption/Adsorption) และ การระเหย (Vaporization) [31]

ข้อมูลการวิเคราะห์จากเทคนิค DSC ใช้ในการศึกษาการแยกวัฏภาคของ PU ในส่วนโครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็ง ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ PU-ether, PU-ester และ PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบหลอมเหลวแล้ว ทำการเตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นงานให้มีน้ำหนักประมาณ 7-8 มิลลิกรัม วางลงบนจานอะลูมิเนียมชนิดมีฝาปิด กำหนดสภาวะในการทดสอบแบบ Heat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน และกำหนดช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบระหว่าง -70 ถึง 250°C ด้วยอัตราการเพิ่มหรือลดของอุณหภูมิ 10 °C/min



รูปที่ 3.1 DSC รุ่น 204 F1 Phoenix® [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM

FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดแสงแบบ Schottky type field-emission (T-FE) ดังแสดงในรูป 3.2 มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครและนาโนได้ โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) จะถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) จะทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเกิดเป็นลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ที่มีขนาดเล็กมาก เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เป็องล่างผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ในการปรับเลนส์อิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี ส่งผลให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ออกมาจากแต่ละจุดบนวัตถุ โดยมุมและความเร็วของอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างบนพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ แล้วจะถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอแสดงผลภาพต่อไป โดยภาพที่ได้จาก FESEM เป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีความลึกและความละเอียด (Resolution) สูงถึง 1.5 นาโนเมตร [32]

ในการวิจัยนี้ใช้ FESEM ในการศึกษารายละเอียดโครงสร้างภายนอกหรือพื้นผิวของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับ FESEM ทำได้โดยการนำชิ้นงานนาโนคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการทดสอบเชิงกลจนแตกหัก แล้วนำมาตัดให้มีลักษณะเป็นแท่งประมาณ 2-3 mm. เคลือบผิวชิ้นงานด้วย Platinum จากนั้นทำการถ่ายภาพด้วยลำแสงอิเล็กตรอน 5 kV ที่กำลังขยาย 5000x, 10000x และ 20000x



รูปที่ 3.2 FESEM รุ่น JEOL JSM-7610F [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM

UTM (Universal Testing Machine) เป็นเครื่องทดสอบแรงประเภท Static Load Test โดยการให้แรงทดสอบคงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ สามารถทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ทดสอบแรงดึง (Tensile test) ทดสอบแรงกด (Compressive test) ทดสอบแรงดัด (Bending test) ทดสอบแรงบิด (Torsion test) และทดสอบแรงเฉือน (Shear test)

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบแรงดึง โดยวิเคราะห์สมบัติทางด้านเชิงกล ได้แก่ มอดุลัสที่ 100%, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break), ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความเหนียว (Toughness) การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดตามมาตรฐาน ที่มีรูปร่างคล้าย “ดัมเบลล์” (Dumb-bell) แล้วใช้ที่จับหรือปากจับ (Grips) สองชุด โดยที่ปลายข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่ ส่วนอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่ซึ่งมีเซลล์วัดแรง (Load cell) เป็นทั้งตัววัดและควบคุมแรงและความเร็วในการดึงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง

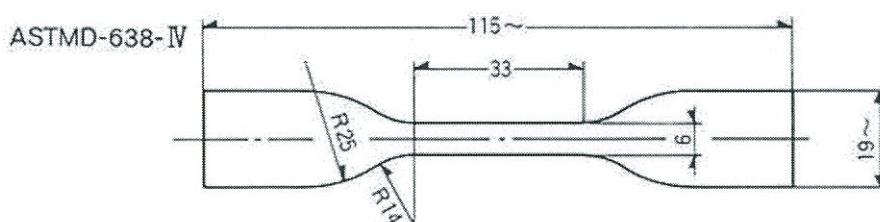
การเตรียมตัวอย่างจะทำโดยตัดชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้ Load cell เท่ากับ 2 kN และกำหนดค่า Crosshead speeds เท่ากับ 50 mm/min เมื่อเริ่มสั่งการทดสอบ Load cell จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามที่กำหนด และมีการให้แรงกระทำต่อชิ้นงานที่ทดสอบ จนกระทั่งปลายของตัวอย่างที่ถูกยึดด้วยที่จับถูกดึงยืดออกจนขาด นำข้อมูลการทดสอบที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain curve) [34] โดยนำแรงที่กระทำต่อชิ้นงานและพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน แปลงค่าเป็นความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นนำค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปและความยาวเริ่มต้น แปลงค่าเป็น Young's Modulus และ %Elongation at break ดังสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด จะมีค่าเท่ากับ ความเหนียว (Toughness) ดังสมการที่ 4

$$\text{Tensile Strength} = \frac{F}{A} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

$$\text{Young's Modulus} = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{สมการที่ 2})$$

$$\% \text{Elongation at break} = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 3})$$

$$\text{Toughness} = \text{พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด} \quad (\text{สมการที่ 4})$$



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานดัมเบลล์สำหรับการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV [33]  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter

LCR Meter จัดเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถวัดค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance, L), ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance, C) และค่าความต้านทาน (Resistance, R) ของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง LCR Meter ในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุนาโนคอมพอสิตในช่วงความถี่  $20-1 \times 10^6$  Hz โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการทดสอบ กำหนดฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบ คือ Lp-Rp และความต่างศักย์เท่ากับ 10 V

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า ทำโดยนำชิ้นงานนาโนคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาตัดให้มีความหนา 2 mm ความกว้าง 10 mm และความยาว 10 mm นำมาต่อเข้ากับสายไฟด้วยกาวอีพอกซีชนิดนำไฟฟ้า แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อป่นกาว (Curing) ให้ยึดติดกับชิ้นงาน จากนั้นทา Silver paint ให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดที่ต่อเข้ากับสายไฟ (ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้แสดงในรูปที่ 3.4) ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง LCR Meter นำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ แปลงค่าเป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume resistivity) โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นแปลงเป็นค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) โดยใช้สมการที่ 2 แล้วรายงานผลค่านำไฟฟ้าในหน่วย S/cm

รูปที่ 3.4 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า

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

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

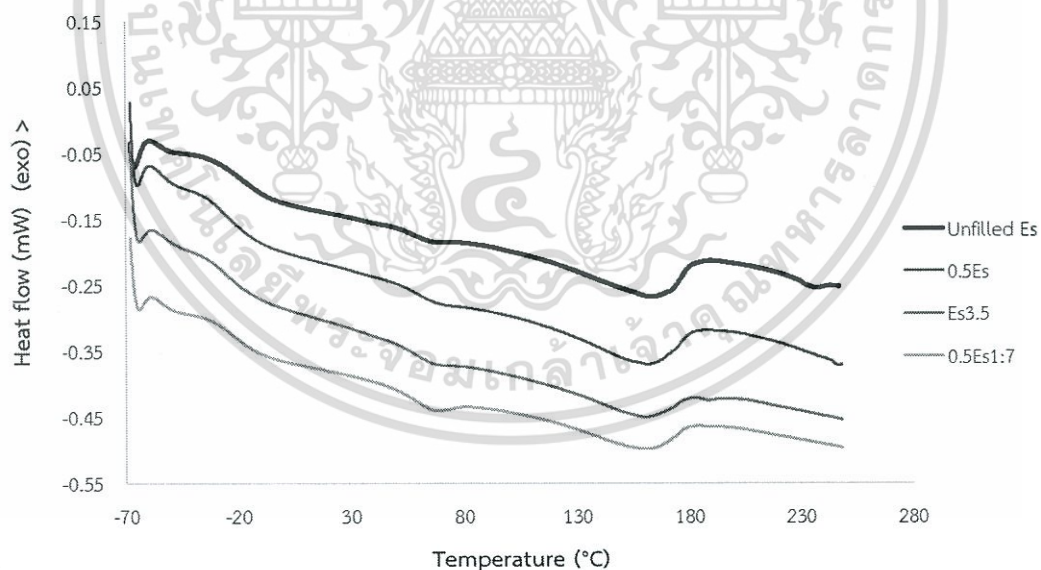
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

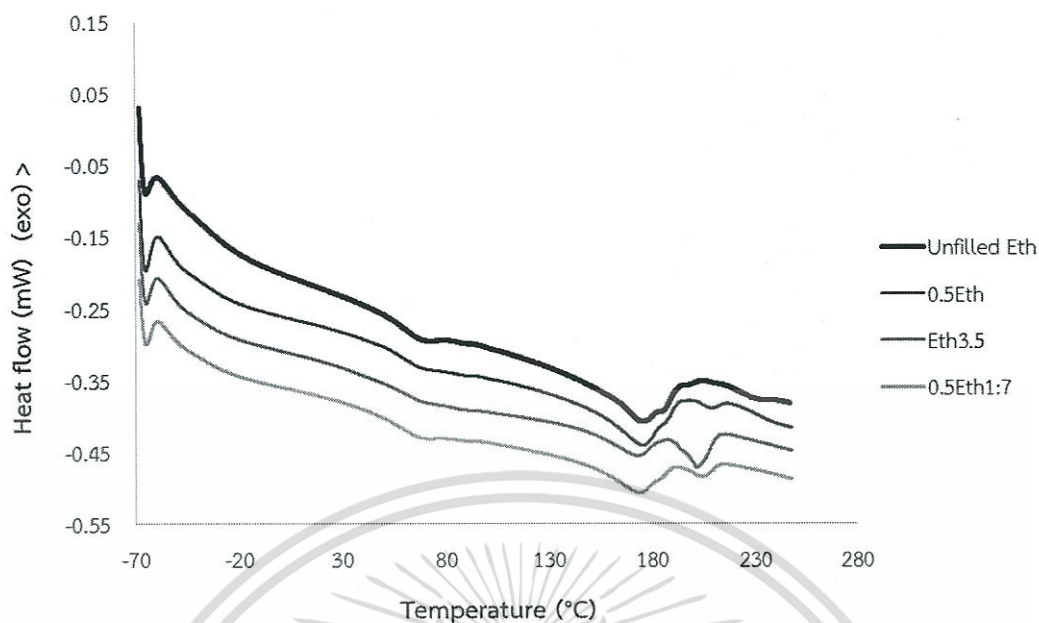
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

PU เป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ โครงสร้างส่วนนิ่มและโครงสร้างส่วนแข็ง ทำให้สามารถพบวิภาคของทั้งโครงสร้างส่วนแข็งและส่วนนิ่มได้ นอกจากนี้ยังสามารถพบบริเวณที่โครงสร้างทั้งสองผสมกันอยู่ (mixed phase) ได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ PU ด้วยเทคนิค DSC ทำให้สามารถพบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนต่างๆได้ดังนี้ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่ม ( $T_{g(SS)}$ ), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนแข็ง ( $T_{g(HS)}$ ), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้างส่วนนิ่มและส่วนแข็งผสมกัน ( $T_{g(MP)}$ ), อุณหภูมิในการหลอมเหลว หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอุณหภูมิที่เกิด microphase mixing ( $T_{MMT}$ ) รวมถึงพลังงานที่ใช้ในการเกิด microphase mixing ( $\Delta H_{MMT}$ ) ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB และ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต



รูปที่ 4.2 กราฟ DSC ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ DSC ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต

สูตร	$T_{g(SS)}$ (°C)	$T_{g(MP)}$ (°C)	$T_{MMT}$ (°C)	$\Delta H_{(MMT)}$ (kJ/g)
Unfilled Es	-20.2	59.4	163.5	17.77
0.3Es	-23.0	60.1	159.5	14.45
0.3Es1:1	-24.5	61.0	163.2	15.99
0.3Es1:3	-21.9	56.5	159.3	12.23
0.3Es1:5	-24.8	57.8	162.6	12.37
0.3Es1:7	-20.4	57.8	163.5	15.02
0.4Es	-24.2	56.4	163.4	15.70
0.4Es1:1	-22.8	58.5	161.5	15.19
0.4Es1:3	-21.5	61.0	162.0	14.14
0.4Es1:5	-25.6	57.5	159.0	11.47
0.4Es1:7	-22.5	58.2	160.3	12.87
0.5Es	-22.9	59.6	160.8	16.06
0.5Es1:1	-21.7	62.4	162.0	14.12
0.5Es1:3	-21.9	59.6	163.4	12.59
0.5Es1:5	-23.4	59.5	161.6	14.63
0.5Es1:7	-21.6	57.6	161.2	10.83
Es0.3	-18.8	60.9	167.4	13.53
Es3.5	-23.0	61.3	159.9	11.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สูตร	$T_{g(MP)}$ (°C)	$T_{MMT}$ (°C)		$\Delta H_{(MMT)}$ (kJ/g)
		$T_{MMT1}$ (°C)	$T_{MMT2}$ (°C)	
Unfilled Eth	59.4	175.6	-	17.08
0.3Eth	61.4	176.1	-	14.50
0.3Eth1:1	64.7	175.3	207.9	12.28
0.3Eth1:3	64.6	175.3	207.1	9.905
0.3Eth1:5	61.5	174.8	202.1	13.33
0.3Eth1:7	59.8	174.5	203.4	12.67
0.4Eth	62.2	175.4	209.3	11.93
0.4Eth1:1	58.3	175.0	185.2	15.32
0.4Eth1:3	50.7	-	213.9	12.27
0.4Eth1:5	65.4	175.2	204.4	13.83
0.4Eth1:7	61.4	174.5	205.4	13.52
0.5Eth	60.9	175.2	209.2	16.40
0.5Eth1:1	59.9	174.8	208.4	9.401
0.5Eth1:3	57.6	174.3	199.0	13.58
0.5Eth1:5	62.1	173.7	205.3	14.91
0.5Eth1:7	60.3	173.6	204.3	12.71
Eth0.3	62.6	174.8	207.8	15.17
Eth3.5	60.9	173.1	201.9	10.83

จากตารางที่ 4.1 คือผลการวิเคราะห์ DSC ของชิ้นงาน PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต โดยพิจารณาที่  $T_{g(SS)}$  และ  $T_{g(MP)}$  ลดลง เนื่องจากการเกิด Microphase separation ทำให้โครงสร้างส่วนนิ่มแยกตัวออกจาก Mixed phase และเนื่องจาก MWCNT ที่กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง ทำให้ความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลงและมีโครงสร้างที่หลวมมากขึ้น ทำให้  $T_{MMT}$  มีค่าลดลง โดยที่ปริมาณความเป็นผลึกในโครงสร้างส่วนแข็งลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้ค่าพลังงานที่ใช้หลอมให้โครงสร้างส่วนแข็งและโครงสร้างส่วนนิ่มมาผสมกันคือค่า  $\Delta H_{(MMT)}$  มีค่าลดลงเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบ PU-ester/CB นาโนคอมพอสิตกับพอลิยูรีเทนที่ไม่มีการเติมสารใดๆ พบว่าค่า  $T_{g(SS)}$ ,  $T_{g(MP)}$ ,  $T_{MMT}$  และ  $\Delta H_{(MMT)}$  มีแนวโน้มคล้ายกับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต ทำให้สรุปได้ว่า CB มีการกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งของพอลิยูรีเทนเช่นเดียวกับ MWCNT

ใน PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตนี้ อัตราส่วน MWCNT:CB ต่างๆ เมื่อเทียบกับ PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต พบว่ามีค่า  $T_{g(SS)}$  ลดลง เนื่องจาก CB ที่มีการกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งเช่นเดียวกับ MWCNT จึงทำให้โครงสร้างส่วนนิ่มแยกตัวออกจาก Mixed phase มากขึ้น เกิด Microphase separation มากขึ้น และพบว่า  $T_{g(MP)}$  มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อเติม CB ในอัตราส่วนมากขึ้นจะทำให้มีค่า  $T_{MMT}$  และ  $\Delta H_{(MMT)}$  ลดลง เนื่องจากมีการขัดขวางความเป็นระเบียบในโครงสร้างส่วนแข็งมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง

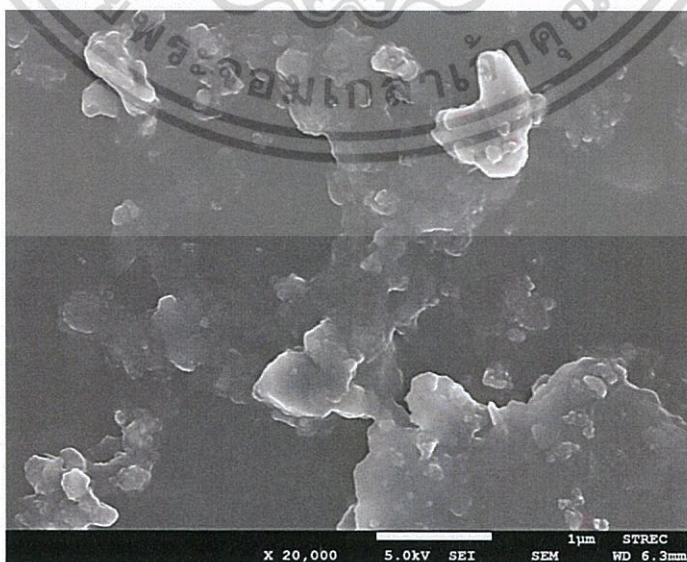
จากตารางที่ 4.2 คือผลการวิเคราะห์ DSC ของชิ้นงาน PU-ether นาโนคอมพอสิต โดยพิจารณาชิ้นงาน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิตเทียบกับพอลิยูรีเทนที่ไม่มีการเติมสารใดๆ พบว่ามีค่า  $T_{g(MP)}$  เพิ่มขึ้น จากการเกิด Microphase separation ทำให้โครงสร้างส่วนนิ่มแยกตัวออกมาจาก Mixed phase และเนื่องจาก MWCNT ที่มีกระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิ่มของพอลิยูรีเทน จึงพบการแยกพีคของ  $T_{MMT}$  ที่ประมาณ  $175^{\circ}\text{C}$  ( $T_{MMT1}$ ) และประมาณ  $200^{\circ}\text{C}$  ( $T_{MMT2}$ ) โดยการพบค่า  $T_{MMT2}$  ที่อุณหภูมิสูงขึ้นแสดงถึงความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้นและมีโครงสร้างที่เรียงชิดติดกัน ซึ่งไม่พบ  $T_{MMT2}$  ใน Unfilled-PU และพบว่า  $T_{MMT1}$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น บ่งบอกว่าสายโซ่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น

ใน PU-ether/CB นาโนคอมพอสิต เมื่อพิจารณาการเติมปริมาณ CB ที่เพิ่มมากขึ้น พบว่า  $T_{g(MP)}$  มีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างส่วนแข็งแยกตัวออกมาจาก Mixed phase และเกิด Microphase separation นอกจากนี้ยังพบว่าทั้ง  $T_{MMT1}$ ,  $T_{MMT2}$  และ  $\Delta H_{(MMT)}$  มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก CB ที่กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็งนั้นขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่ จึงทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า จึงมีค่าลดลง

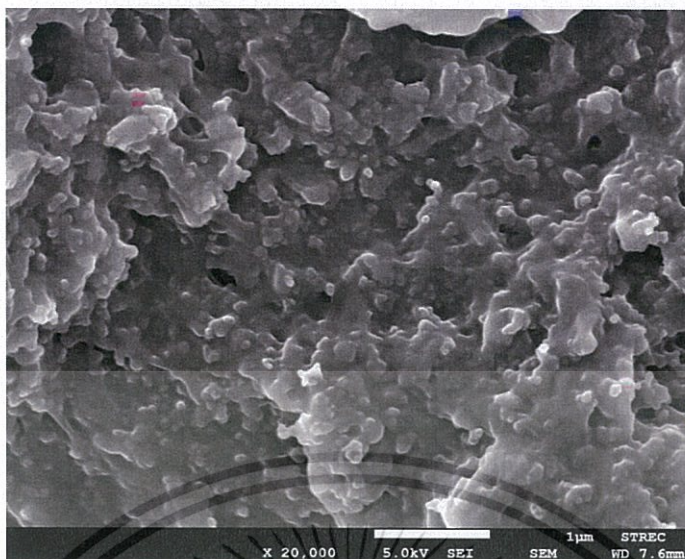
เปรียบเทียบชิ้นงาน PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่อัตราส่วน MWCNT:CB ที่เพิ่มขึ้น พบว่า  $T_{g(MP)}$  มีค่าไม่แตกต่างกันสำคัญ และ  $T_{MMT1}$  และ  $T_{MMT2}$  มีค่าลดลง เนื่องจาก CB ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง จึงขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้างส่วนแข็ง ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง จากการที่ค่า  $\Delta H_{(MMT)}$  มีค่าลดลง

#### 4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย FESEM

ในการวิจัยนี้ใช้ FESEM เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค MWCNT ในวัสดุนาโนคอมพอสิต ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.3 - 4.9 โดยบริเวณที่เป็นจุดสว่างเป็นรูปท่อน คือ MWCNT และอนุภาคทรงกลม คือ CB



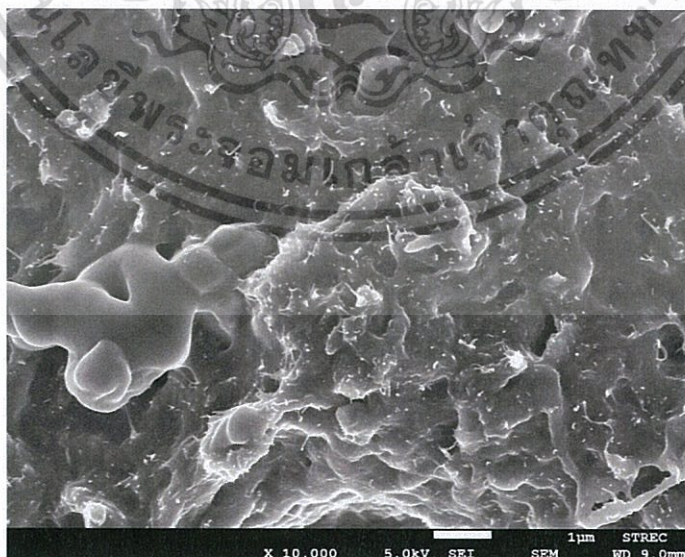
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

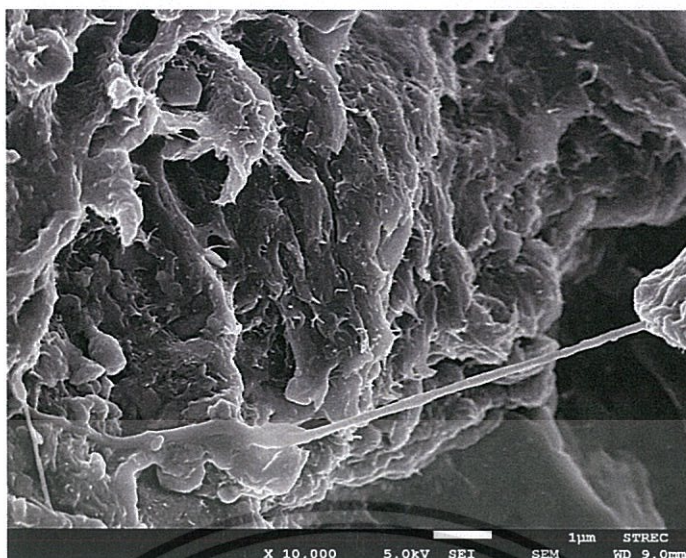
รูปที่ 4.3 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 20000$  เท่าของ (a) Es0.3 และ (b) Es3.5

จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ CB ในชิ้นงาน PU-ester/CB นาโนคอมพอสิตโดยรูป 4.3 (a) และ (b) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่ปริมาณ CB 0.3 %wt และ CB 3.5 %wt ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าอนุภาค CB ในรูป 4.3 ทั้ง (a) และ (b) มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม มีการกระจายตัวดี และไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (agglomerate) ใน PU-ester เมทริกซ์ แม้จะเพิ่มปริมาณ CB ที่เติมมากกว่า 10 เท่าก็ตาม



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



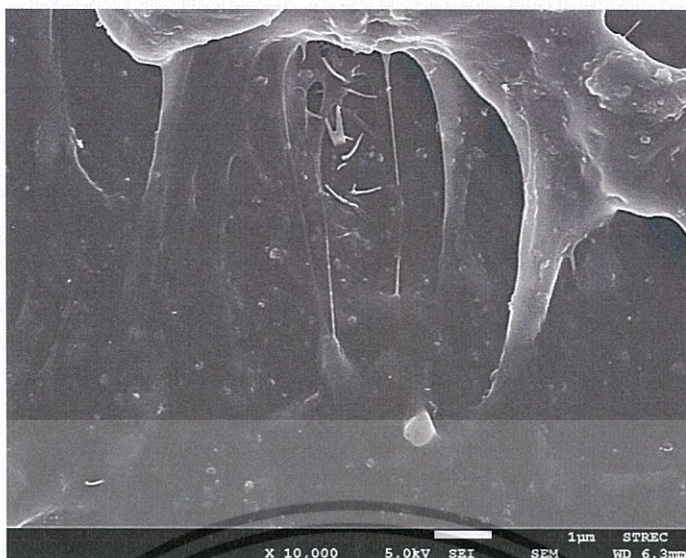
(b)

รูปที่ 4.4 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Es และ (b) 0.5Es

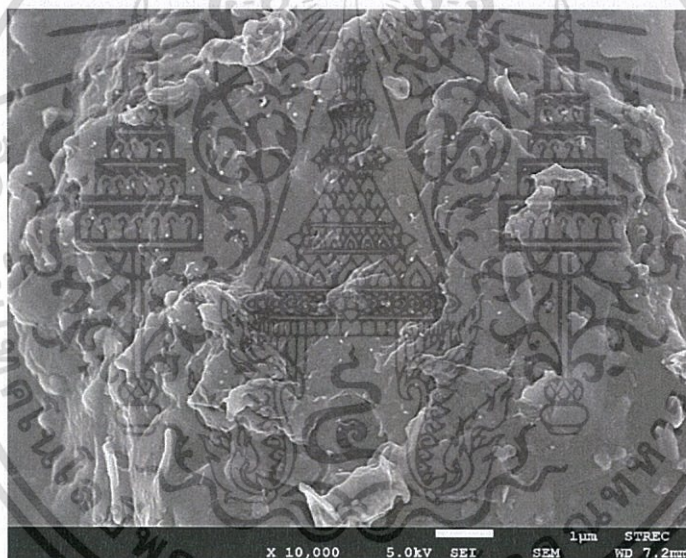
จากรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT ในชิ้นงาน PU-ester/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยรูป 4.4 (a) และ (b) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.3 %wt และ MWCNT 0.5 %wt ตามลำดับ จากรูป 4.4 (a) สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ MWCNT มีการกระจายตัวที่ดีใน PU-ester เมทริกซ์ และจากรูป 4.4 (b) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ MWCNT มากขึ้น อนุภาคของ MWCNT ก็ยังคงมีการกระจายตัวที่ดีใน PU-ester เมทริกซ์ ดังนั้นแม้จะใส่ CB หรือ MWCNT ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นแต่ทั้ง CB และ MWCNT ก็สามารถกระจายตัวได้ดีใน PU-ester



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (a) วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

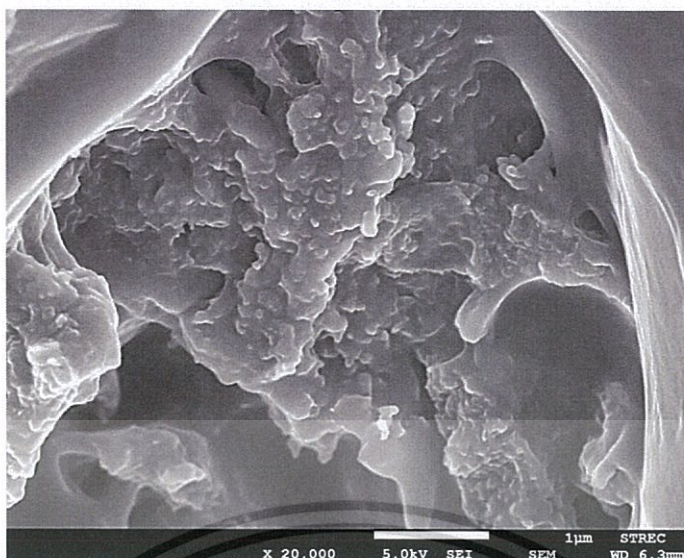


(c)

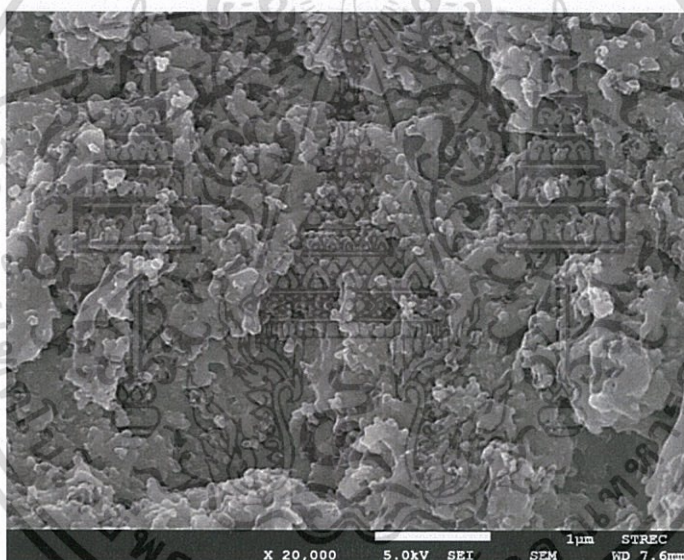
รูปที่ 4.5 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Es1:7, (b) 0.4Es1:7 และ (c) 0.5Es1:7

ในรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในชิ้นงาน PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต โดยรูป 4.5 (a), (b) และ (c) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่มีปริมาณ MWCNT:CB อัตราส่วน 1:7 โดยน้ำหนัก ซึ่งมี MWCNT ที่ 0.3, 0.4 และ 0.5 %wt ตามลำดับ จากรูป 4.5 (a) สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ CB และ MWCNT กระจายตัวดี ไม่เกาะเป็นก้อน จากรูป 4.5 (b) และ (c) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ CB และ MWCNT ลงไป PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตในยังคงให้ผลเช่นเดียวกับรูป 4.5 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



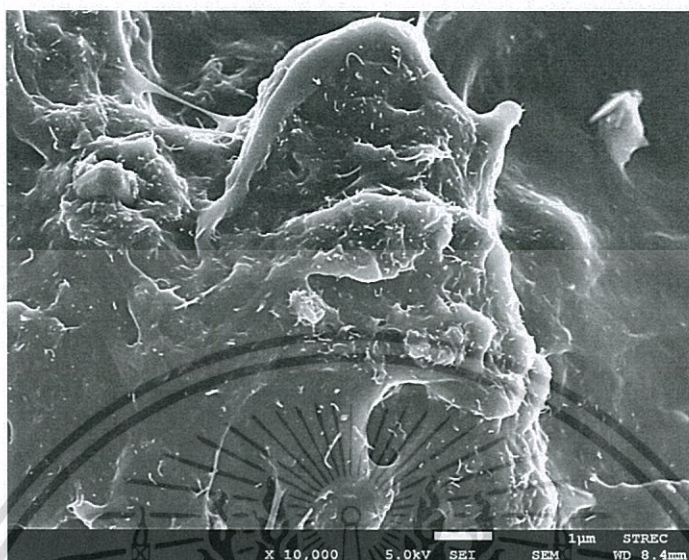
(b)

รูปที่ 4.6 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 20000$  เท่าของ (a) Eth0.3 และ (b) Eth3.5

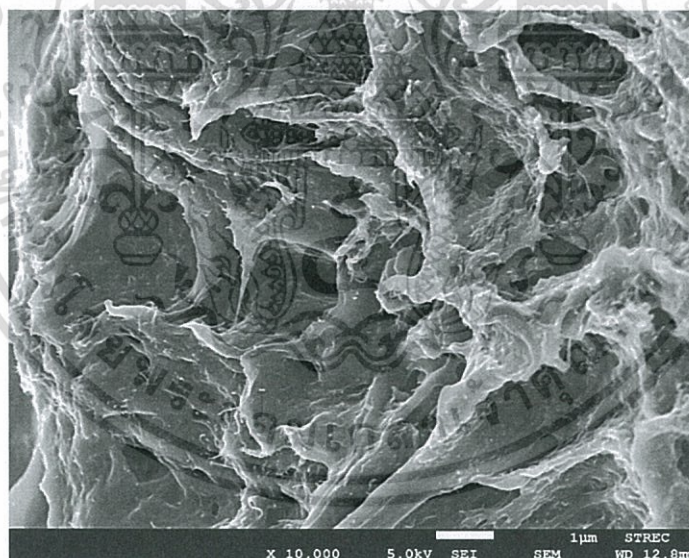
จากรูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของ CB ใน PU-ether/CB นาโนคอมพอสิตโดยรูป 4.6 (a) และ 4.3 (b) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่ปริมาณ CB 0.3 %wt และ CB 3.5 %wt ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าอนุภาค CB ในรูป 4.6 (a) มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม มีการกระจายตัวดี และไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ใน PU-ether เมทริกซ์ และจากรูป 4.6 (b) ยังคงให้ผลเช่นเดียวกับรูป 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) แม้จะมีการเพิ่มปริมาณ CB มากขึ้นก็ตาม ซึ่งผลที่ได้จากรูป 4.6 (a) และ (b) มีความสอดคล้องกับ PU-ester นาโนคอมพอสิตก่อนหน้า



(a)



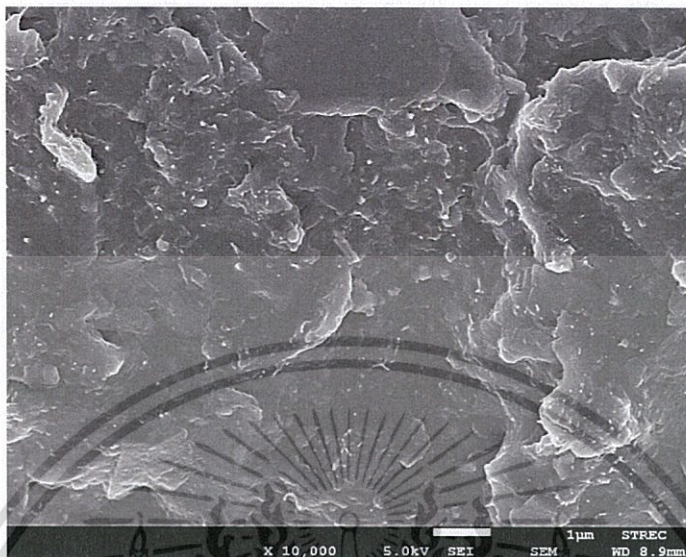
(b)

รูปที่ 4.7 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Eth และ (b) 0.5Eth

ในรูปที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของ MWCNT ใน PU-ether/MWCNT นาโนคอมพอสิต โดยรูป 4.7 (a) และ (b) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่ปริมาณ MWCNT 0.3 %wt และ MWCNT 0.5 %wt ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ MWCNT มีการกระจายตัวที่ดีใน PU-ether เมทริกซ์ และ

ไม่ปรากฏใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มปริมาณ MWCNT มากขึ้น อนุภาคของ MWCNT ยังคงมีการกระจายตัวที่ดีใน PU-ether เมทริกซ์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ PU-ester นาโนคอมพอสิตดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้

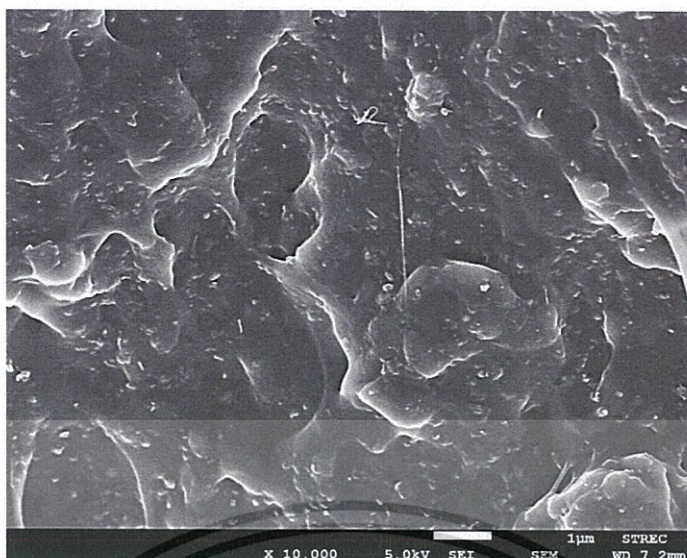


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

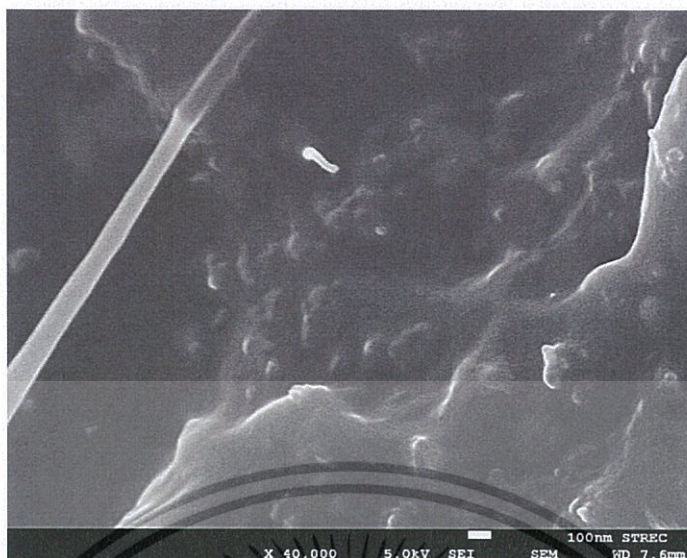
รูปที่ 4.8 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  เท่าของ (a) 0.3Eth1:7, (b) 0.4Eth1:7 และ (c) 0.5Eth1:7

ในรูปที่ 4.8 แสดงพื้นที่ผิวแตกหักของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต โดยรูป 4.8 (a) , (b) และ (c) เป็นการเตรียมคอมพอสิตที่มีปริมาณ MWCNT:CB อัตราส่วน 1:7 โดยน้ำหนักที่ MWCNT 0.3 , 0.4 และ 0.5 %wt ตามลำดับ จากรูป 4.8 (a) สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ CB และ MWCNT กระจายตัวดี ไม่เกาะเป็นก้อน จากรูป 4.5 (b) และ (c) ยังคงให้ผลเช่นเดียวกับรูป 4.5 (a) แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณ CB และ MWCNT ลงไปใน PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก PU-ester ก่อนหน้านี้



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)



(c)

รูปที่ 4.9 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 30000$  เท่า,  $\times 40000$  เท่า และ  $\times 80000$  เท่า ของ (a) 0.5Es1:7, (b) 0.5Eth1:7 และ (c) 0.5Eth1:7 ตามลำดับ

การศึกษาการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ในรูปที่ 4.9 ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตในรูป 4.9 (a) และ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตในรูป 4.9 (b) และ (c) ซึ่งเป็นการเตรียมคอมพอสิตที่มีปริมาณ MWCNT 0.5 %wt และปริมาณ CB 3.5 %wt โดยรูป 4.9 (a) และ (b) สังเกตเห็นว่าอนุภาคของ CB ไม่ได้เกาะอยู่บน MWCNT แต่กลับแยกกันอยู่อย่างชัดเจนกับ MWCNT ทั้งใน PU-ester และ PU-ether เมทริกซ์ จึงมีข้อสันนิษฐานว่าเกิดการสร้างเส้นเชื่อมโยงเพิ่มจากอนุภาค CB ที่เติมลงไปซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพของ Sumfleth และคณะ [30] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(รายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 2) นอกจากนี้ในรูปที่ 4.9 (a) และ (c) ที่วงกลมไว้ยังแสดงให้เห็นว่า CB มีการกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนแอ็กกริเกต แบบ High structure ของ CB ทั้งใน PU-ester และ PU-ether เมทริกซ์อีกด้วย

### 4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย UTM

ในการวิจัยนี้ใช้ UTM เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุนาโนคอมพอสิต โดยรายงานค่า Young's Modulus, Tensile Strength, %Elongation at break และ Toughness ดังตารางที่ 4.3

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

สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	%Elongation at break	Toughness (J)
Unfilled Es	6.7±0.2	29.8±1.2	866.9±39.7	54.5±1.9
0.3Es	9.8±0.1	36.8±2.4	846.4±7.8	67.4±2.3
0.4Es	10.6±0.4	38.3±1.3	851.8±13.9	71.2±2.9
0.5Es	9.1±0.1	32.2±0.2	800.6±18.8	60.4±0.5
0.3Es1:1	10.9±0.2	42.5±2.2	824.8±26.0	75.2±3.7
0.3Es1:3	12.1±0.2	45.2±1.7	841.8±5.0	83.5±2.0
0.3Es1:5	12.1±0.5	45.2±0.9	862.8±16.4	85.5±1.0
0.3Es1:7	10.1±0.1	40.4±1.6	853.2±27.7	73.7±4.7
0.4Es1:1	11.9±0.1	44.3±3.9	850.7±49.9	82.0±8.3
0.4Es1:3	12.3±0.4	40.3±2.6	828.3±31.5	77.4±5.3
0.4Es1:5	13.4±0.5	42.4±2.2	841.5±15.0	82.8±5.4
0.4Es1:7	12.6±0.4	33.5±1.2	724.3±14.8	60.6±3.0
0.5Es1:1	11.5±0.2	33.6±1.5	762.6±28.8	61.8±3.2
0.5Es1:3	12.8±0.2	33.4±3.3	759.5±46.4	64.0±8.0
0.5Es1:5	11.5±0.2	31.8±2.4	730.8±23.4	57.0±1.5
0.5Es1:7	13.8±0.2	36.6±4.2	748.4±29.6	68.7±6.8
Es0.3	10.2±0.2	37.3±2.2	779.7±14.0	62.7±2.5
Es3.5	13.4±0.4	36.5±1.8	776.0±6.4	72.1±2.4

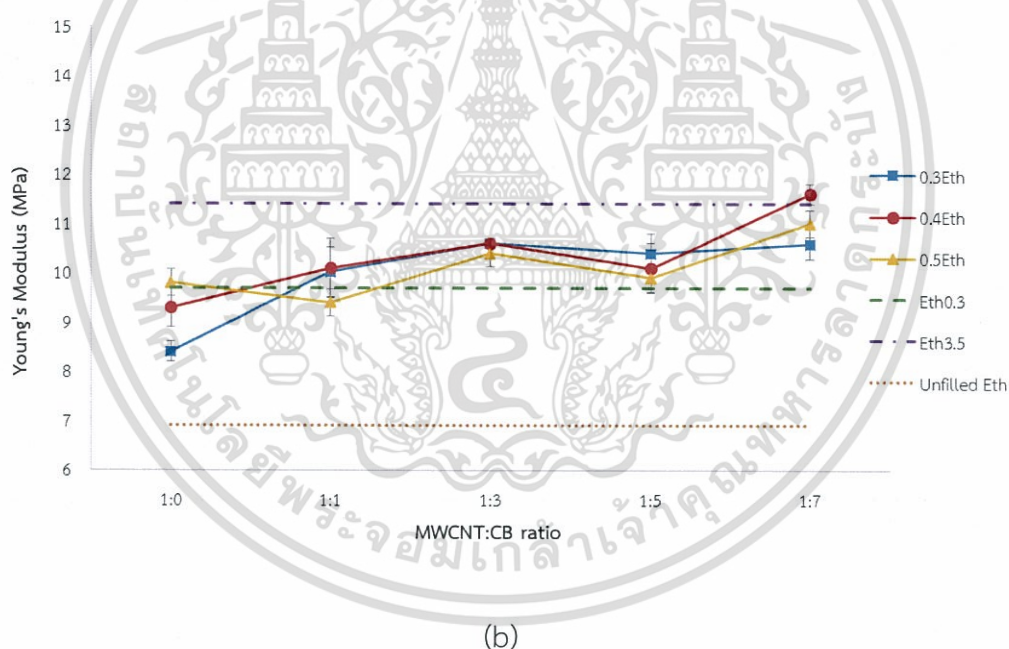
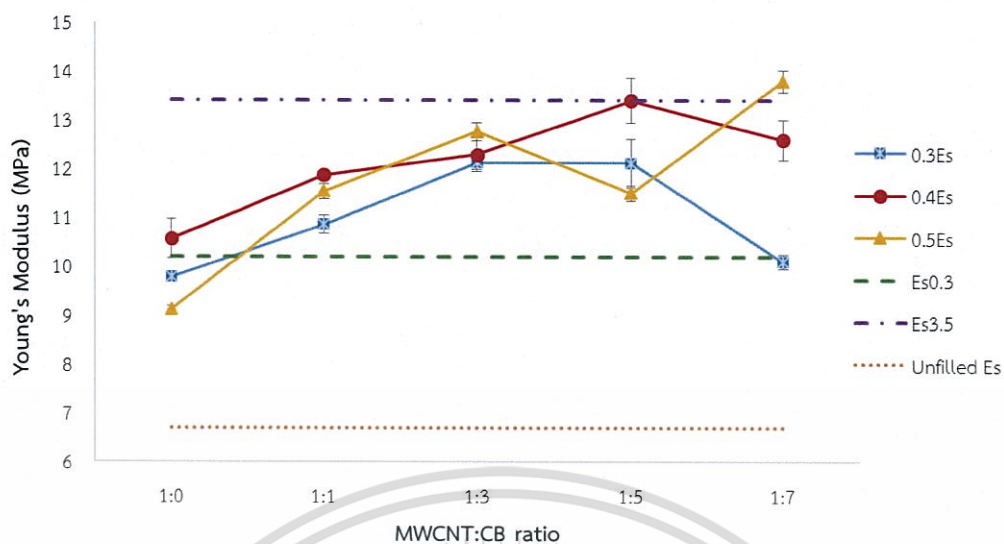
จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มลดลง เมื่อเติม CB ในปริมาณที่สูงมากขึ้น โดย Tensile strength มีค่าอยู่ในช่วง 29–45 MPa, %Elongation at break มีค่าอยู่ในช่วง 724–867% และ Toughness มีค่าอยู่ในช่วง 54–86 J ส่วน Young's Modulus มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CB ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สูตร	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	%Elongation at break	Toughness (J)
Unfilled Eth	6.9±0.1	27.5±1.8	811.5±28.8	47.3±4.0
0.3Eth	8.4±0.2	26.7±1.3	778.6±94.4	49.0±8.7
0.4Eth	9.3±0.4	27.9±1.3	832.2±21.9	57.2±2.3
0.5Eth	9.8±0.4	30.4±0.9	900.4±16.6	65.0±2.6
0.3Eth1:1	10.0±0.5	31.3±0.7	882.6±21.1	64.4±0.7
0.3Eth1:3	10.6±0.1	31.0±1.0	823.2±14.6	60.8±0.6
0.3Eth1:5	10.4±0.4	28.9±1.8	817.1±13.8	57.6±2.6
0.3Eth1:7	10.6±0.3	25.3±0.9	807.6±25.6	53.7±3.5
0.4Eth1:1	10.1±0.6	36.7±2.2	873.2±25.4	74.2±2.9
0.4Eth1:3	10.6±0.1	30.9±1.2	830.3±25.0	61.9±1.4
0.4Eth1:5	10.1±0.5	28.0±0.7	853.9±28.9	60.1±2.3
0.4Eth1:7	11.6±0.2	26.0±0.7	757.0±17.5	53.7±1.5
0.5Eth1:1	9.4±0.3	29.0±1.8	779.5±22.3	52.2±4.2
0.5Eth1:3	10.4±0.4	27.3±2.6	721.7±22.2	49.3±4.7
0.5Eth1:5	9.9±0.1	26.2±0.3	739.5±11.4	48.1±0.9
0.5Eth1:7	11.0±0.5	25.6±0.7	748.3±18.1	51.0±2.0
Eth0.3	9.7±0.2	30.2±1.0	869.6±24.6	61.4±3.8
Eth3.5	11.4±0.3	29.4±0.3	845.9±20.3	62.5±5.1

จากตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติเชิงกลต่างๆ (Young's Modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness) ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตที่ MWCNT:CB อัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่า Tensile strength, %Elongation at break และ Toughness มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของ CB คล้ายคลึงกับที่พบใน PU-ester นาโนคอมพอสิต โดย Tensile strength มีค่าอยู่ในช่วง 25–37 MPa, %Elongation at break มีค่าอยู่ในช่วง 721–900% และ Toughness มีค่าอยู่ในช่วง 47–74 J ส่วน Young's Modulus มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CB ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (b)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับปริมาณ MWCNT โดยใช้ อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ต่างกัน (a) PU-ester และ (b) PU-ether นาโนคอมพอสิต

จากค่า Young's Modulus ในรูปที่ 4.10 (a) ของ PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ได้คำนวณการเพิ่มขึ้นของค่า Young's Modulus ของนาโนคอมพอสิตเทียบกับ PU-ester ที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง พบว่า การเติม CB ที่ 0.3 และ 3.5 %wt มีแนวโน้มของ Modulus เพิ่มขึ้น ประมาณ 52% และ 100% ตามลำดับ เมื่อเติม MWCNT ที่ 0.3, 0.4 และ 0.5 %wt มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของ Modulus ประมาณ 46%, 58% และ 36% ตามลำดับ เมื่อทำการผสม MWCNT และ CB เข้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

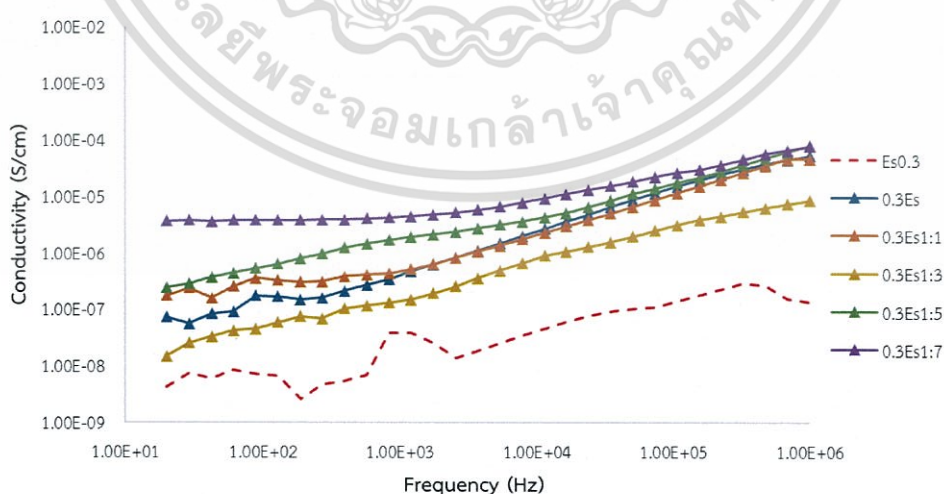
ด้วยกัน ที่ 0.3Es1:7, 0.4Es1:7 และ 0.5Es1:7 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของ Modulus ประมาณ 51%, 88% และ 106% ตามลำดับ โดย PU-ester/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตพบค่า Young's Modulus สูงสุดที่ 0.5Es1:7 ( $13.8 \pm 0.4$  MPa)

ส่วนรูปที่ 4.10 (b) แสดงค่า Young's Modulus ของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต ได้คำนวณการเพิ่มขึ้นของค่า Young's Modulus ของนาโนคอมพอสิตเทียบกับ PU-ether ที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง พบว่า การเติม CB ที่ 0.3 และ 3.5 %wt มีแนวโน้มของ Modulus เพิ่มขึ้นประมาณ 41% และ 65% ตามลำดับ เมื่อเติม MWCNT ที่ 0.3, 0.4 และ 0.5 %wt มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของ Modulus ประมาณ 22%, 35% และ 42% ตามลำดับ เมื่อทำการผสม MWCNT และ CB เข้าด้วยกัน ที่ 0.3Eth1:7, 0.4Eth1:7 และ 0.5Eth1:7 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของ Modulus ประมาณ 54%, 68% และ 59% ตามลำดับ โดย PU-ether/ MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตพบค่า Young's Modulus สูงสุดที่ 0.4Eth1:7 ( $11.6 \pm 0.2$  MPa)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PU-ester และ PU-ether นาโนคอมพอสิตพบว่า PU-ester นาโนคอมพอสิต ที่อัตราส่วน 0.5Es1:7 มีการเพิ่มขึ้นของ Modulus ที่สูงกว่า PU-ether นาโนคอมพอสิต (0.5Es1:7 เพิ่มขึ้น 106 % ส่วน 0.5Eth1:7 เพิ่มขึ้น 59 %) เนื่องจาก MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนแข็งของ PU-ester เหมือนกัน ทำให้สามารถเสริมแรงได้ดีกว่า PU-ether ที่ MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างที่ต่างกันนั่นเอง

#### 4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter

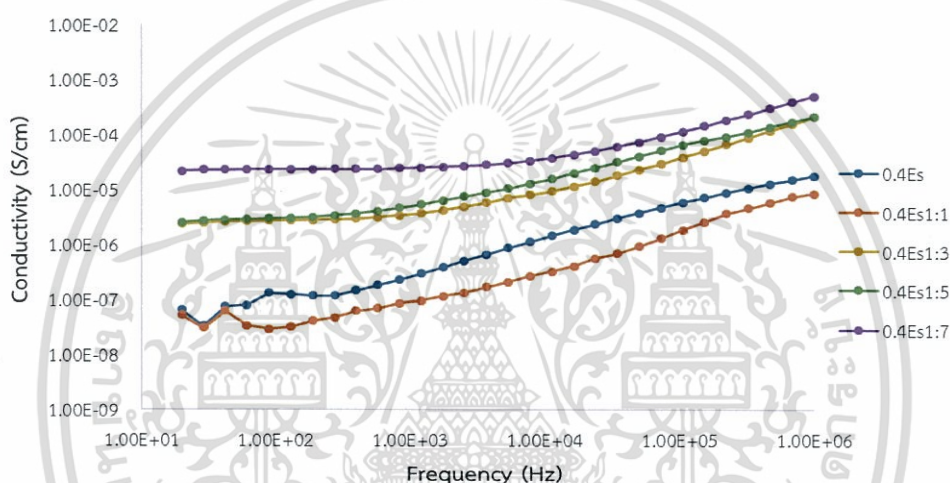
การศึกษาค่านำไฟฟ้าของ PU-ester/MWCNT/CB และ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต โดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่ 20 ถึง  $1 \times 10^6$  Hz เมื่อแปลงเป็นค่าการนำไฟฟ้า PU-ester/MWCNT/CB ในสูตรของ 0.3MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆจะแสดงค่าดังรูปกราฟที่ 4.11, สูตรของ 0.4MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆจะแสดงค่าดังรูปกราฟที่ 4.12 และสูตรของ 0.5MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆจะแสดงค่าดังรูปกราฟที่ 4.13



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester ในสูตร Es0.3, 0.3Es, 0.3Es1:1, 0.3Es1:3, 0.3Es1:5 และ 0.3Es1:7

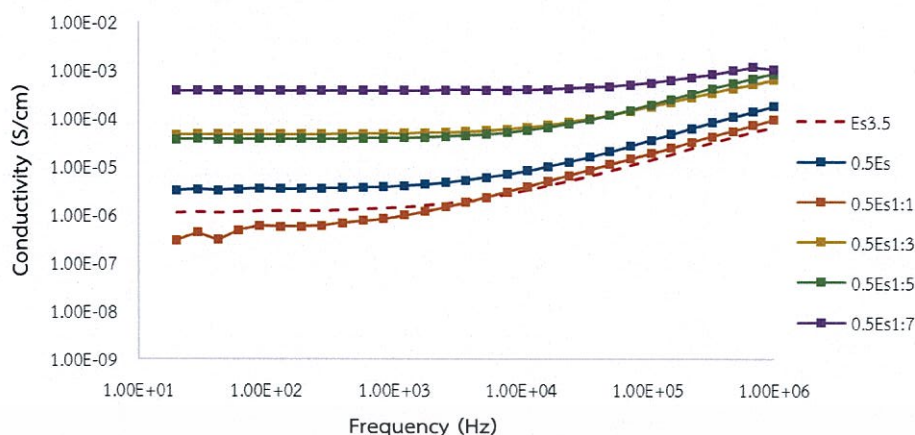
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงถึงกราฟค่านำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิต ในสูตรของ 0.3MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าสูตร Es0.3 ซึ่งเป็นการเติม CB อย่างเดียวนั้นเป็นเพียงสูตรเดียวที่มีค่านำไฟฟ้าไม่คงที่ตลอดช่วงความถี่ ซึ่งอาจเป็นผลจากการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าในปริมาณน้อยจนไม่สามารถส่งผ่านไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ในส่วนของชิ้นงานสูตรอื่นๆพบว่าสูตรที่ไม่เติม CB (0.3Es) และสูตรที่เติม MWCNT:CB ในอัตราส่วน 1:1 ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงประมาณ 88.95 Hz นั้นมีค่านำไฟฟ้าไม่คงที่ โดยจะเริ่มคงที่ที่ความถี่ประมาณ 88.95 - 1212 Hz และจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1212 Hz ขึ้นไป เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:5 นั้นพบว่าค่านำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงความถี่ที่สูงขึ้น และในอัตราส่วน 1:7 พบว่ามีค่านำไฟฟ้าคงที่ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึง 834.4 Hz และจะเริ่มมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 834.4 Hz ขึ้นไป



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester ในสูตร 0.4Es, 0.4Es1:1, 0.4Es1:3, 0.4Es1:5 และ 0.4Es1:7

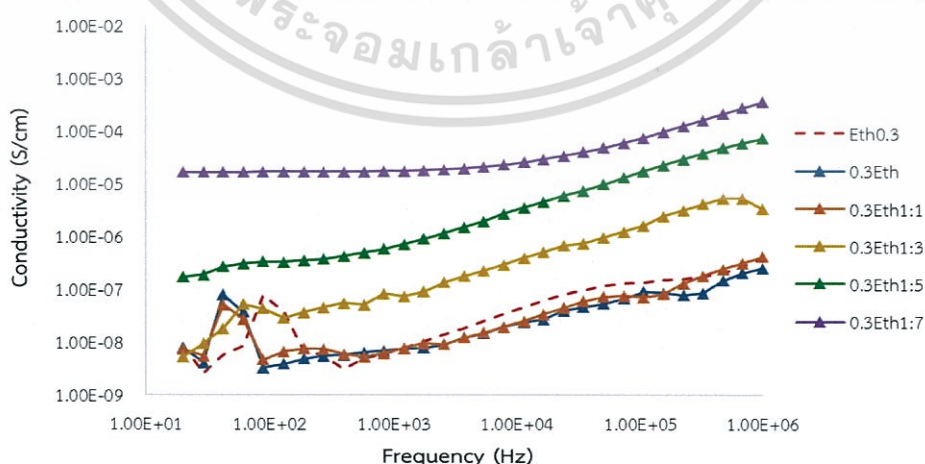
ในรูปที่ 4.12 แสดงค่านำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิตในสูตร 0.4MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งพบว่าสูตรที่ไม่เติม CB (0.4Es) และสูตรที่เติม MWCNT:CB ในอัตราส่วน 1:1 ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงประมาณ 61.25 Hz นั้นมีค่านำไฟฟ้าไม่คงที่ โดยจะเริ่มคงที่ที่ความถี่ประมาณ 61.25 - 272.4 Hz และจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 272.4 Hz ขึ้นไป เมื่อพิจารณาในอัตราส่วน 1:3, 1:5 และ 1:7 พบว่ามีค่านำไฟฟ้าคงที่ในช่วงความถี่ต่ำจนถึง 1212 Hz และจะเริ่มมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1212 Hz ขึ้นไป



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ester ในสูตร Es3.5, 0.5Es, 0.5Es1:1, 0.5Es1:3, 0.5Es1:5 และ 0.5Es1:7

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงกราฟค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิตในสูตร MWCNT ที่ 0.5%wt และเติม CB ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งพบว่า MWCNT:CB ในอัตราส่วน 1:1 ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงประมาณ 88.95 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ โดยจะเริ่มคงที่ที่ความถี่ประมาณ 88.95 – 395.6 Hz และจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 395.6 Hz ขึ้นไป และพบว่าในอัตราส่วน 1:3, 1:5 รวมถึง 0.5Es (ชิ้นงานที่เติม MWCNT เพียงอย่างเดียว) และ Es3.5 (ชิ้นงานที่เติม CB เพียงอย่างเดียว) ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงประมาณ 3711 Hz นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ และจะเริ่มมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3711 Hz ขึ้นไป และในอัตราส่วน 1:7 จะพบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ether/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิตในสูตรของ 0.3MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆแสดงดังรูปกราฟที่ 4.14 ส่วนสูตรของ 0.4MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆแสดงดังรูปกราฟที่ 4.15 และสูตรของ 0.5MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆแสดงดังรูปกราฟที่ 4.16

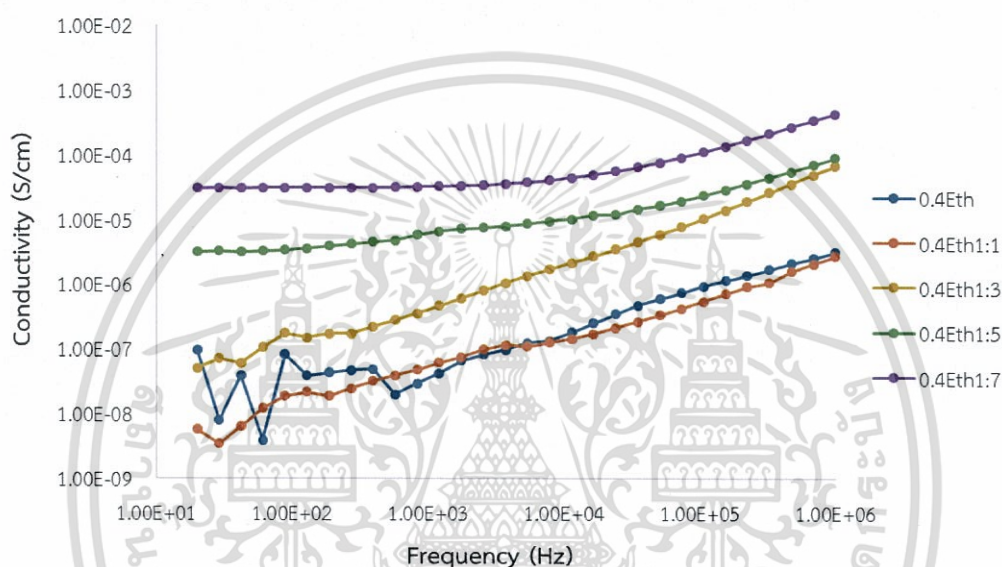


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether ในสูตร

Eth0.3, 0.3Eth, 0.3Eth1:1, 0.3Eth1:3, 0.3Eth1:5 และ 0.3Eth1:7

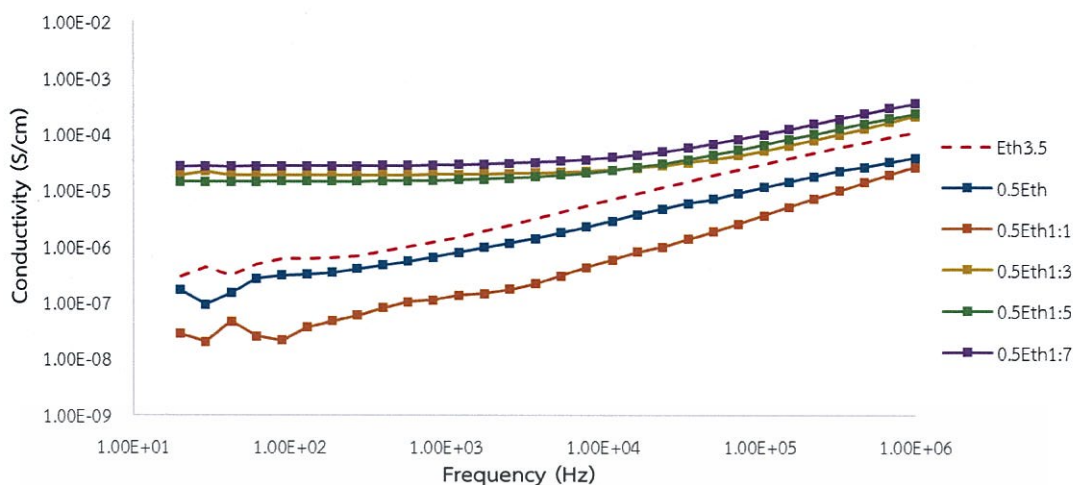
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การดูแลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 แสดงกราฟค่านำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิตในสูตร 0.3MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า MWCNT:CB ในอัตราส่วน 1:1, 1:3 รวมถึง 0.3Eth (ชิ้นงานที่เติม MWCNT เพียงอย่างเดียว) และ Eth0.3 (ชิ้นงานที่เติม CB เพียงอย่างเดียว) ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงประมาณ 187.6 Hz นั้นมีค่านำไฟฟ้าไม่คงที่ โดยจะเริ่มคงที่ที่ความถี่ประมาณ 187.6 – 1760 Hz และจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1760 ขึ้นไป เมื่อพิจารณาในอัตราส่วน 1:5 พบว่ามีค่านำไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่บริเวณความถี่ต่ำจนถึง 272.4 Hz และจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 272.4 Hz ขึ้นไป และในอัตราส่วน 1:7 พบว่ามีค่านำไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่บริเวณความถี่ต่ำจนถึง 2555 Hz และจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2555 Hz ขึ้นไป



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether ในสูตร 0.4Eth, 0.4Eth1:1, 0.4Eth1:3, 0.4Eth1:5 และ 0.4Eth1:7

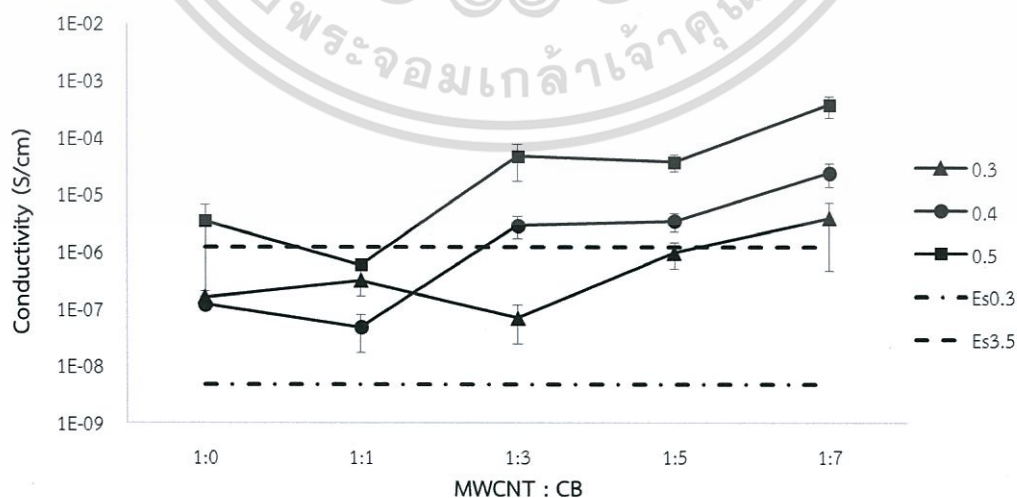
ในรูปที่ 4.15 แสดงกราฟค่านำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิตในสูตร 0.4MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งพบว่า MWCNT:CB ในอัตราส่วน 1:1, 1:3 และ 0.4Eth (ชิ้นงานที่เติม MWCNT เพียงอย่างเดียว) ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงประมาณ 129.2 Hz นั้นมีค่านำไฟฟ้าไม่คงที่ โดยจะเริ่มคงที่ที่ความถี่ประมาณ 129.2 – 395.6 Hz และจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 395.6 Hz ขึ้นไป เมื่อพิจารณาในอัตราส่วน 1:5 และ 1:7 พบว่ามีค่านำไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่บริเวณความถี่ต่ำจนถึง 3711 Hz และจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3771 Hz ขึ้นไป



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความถี่ของ PU-ether ในสูตร Eth3.5, 0.5Eth, 0.5Eth1:1, 0.5Eth1:3, 0.5Eth1:5 และ 0.5Eth1:7

จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิตในสูตร 0.5MWCNT ที่เติม CB ในอัตราส่วนต่างๆ จากกราฟพบว่า MWCNT:CB ในอัตราส่วน 1:1 รวมถึง 0.5Eth (ซึ่งงานที่เติม MWCNT เพียงอย่างเดียว) และ Eth3.5 (ซึ่งงานที่เติม CB เพียงอย่างเดียว) ที่บริเวณความถี่ต่ำจนถึงประมาณ 88.95 Hz มีค่าการนำไฟฟ้าไม่คงที่ โดยจะเริ่มคงที่ที่ความถี่ประมาณ 88.95 – 272.4 Hz และจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 272.4 Hz ขึ้นไป เมื่อพิจารณาในอัตราส่วน 1:3, 1:5 และ 1:7 พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่บริเวณความถี่ต่ำจนถึง 2555 Hz และจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2555 Hz ขึ้นไป

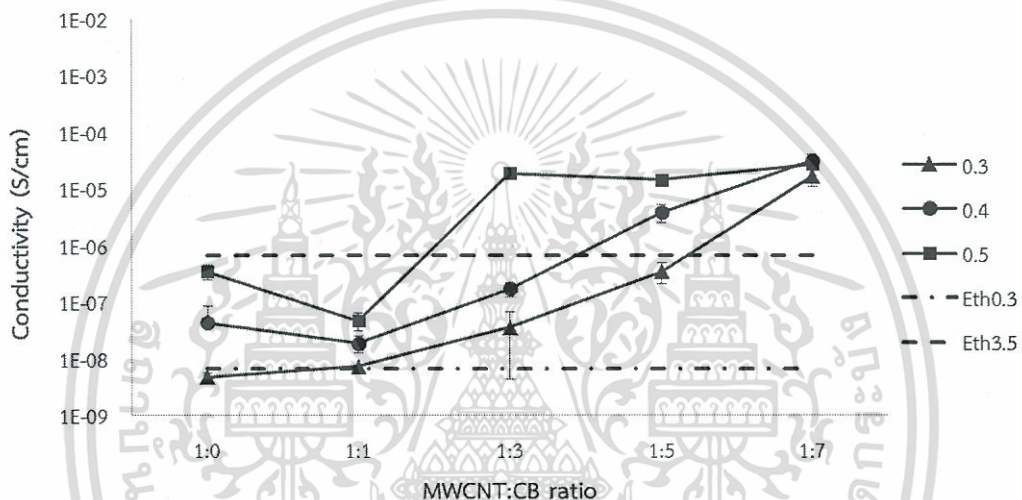
จากกราฟและข้อมูลที่แสดงข้างต้น จึงได้กำหนดค่าความถี่ที่ 272.4 Hz ซึ่งเป็นบริเวณที่ทุกกราฟมีค่าการนำไฟฟ้าคงที่ เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT:CB ที่เติมลงในนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT/CB ที่เติมลงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนาโนคอมพอสิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.17 แสดงถึงค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมพอสิตในสูตรต่างๆ ที่ความถี่ 272.4 Hz โดยสังเกตว่าในสูตรที่เติมปริมาณ MWCNT 0.4 และ 0.5 มีค่านำไฟฟ้าลดลงเมื่อเติม CB ลงไปผสมในอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:1 แต่ในสูตรที่เติมปริมาณ MWCNT 0.3 จะมีค่านำไฟฟ้าลดลงที่อัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 แต่หากเพิ่มอัตราส่วน CB มากขึ้น จะทำให้ค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ และจากการพิจารณากราฟพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของสูตรที่เติมปริมาณ MWCNT 0.5 จะมีค่าสูงกว่า 0.3 และ 0.4 ในทุกอัตราส่วน และในอัตราส่วน 1:7 ของทุกสูตร จะเป็นอัตราส่วนที่ทำให้มีค่านำไฟฟ้าสูงที่สุด โดยใน PU-ester นาโนคอมพอสิต สูตรที่ดีที่สุดคือ 0.5Es1:7 โดยให้ค่านำไฟฟ้าเท่ากับ  $3.71 \times 10^{-4}$  S/cm ซึ่งมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 2 magnitude เมื่อเทียบกับ 0.5Es และ Es3.5 (107.88 เท่า และ 312.44 เท่า ตามลำดับ)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณ MWCNT/CB ที่เติมลงใน PU-ether นาโนคอมพอสิต ที่ความถี่ 272.4 Hz

จากรูป 4.18 แสดงถึงค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ether นาโนคอมพอสิตในสูตรต่างๆ ที่ความถี่ 272.4 Hz โดยจะสังเกตได้ว่าในสูตรที่เติมปริมาณ MWCNT 0.4 และ 0.5 มีค่านำไฟฟ้าลดลงเมื่อเติม CB ลงไปผสมในอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:1 เนื่องจากอาจจะมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เชื่อมโยงกันจึงทำให้ค่านำไฟฟ้าลดลง แต่พบว่าในสูตรที่เติมปริมาณ MWCNT 0.3 ไม่มีการลดลงของค่านำไฟฟ้า แต่ในอัตราส่วน MWCNT:CB ที่ 1:3 นั้นมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างกว้าง เมื่อพิจารณากราฟจึงพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของสูตรที่เติมปริมาณ MWCNT เท่ากับ 0.5 จะมีค่าสูงกว่า 0.3 และ 0.4 ในทุกสัดส่วน เว้นเพียงแต่สูตรเดียวคือ 0.4Eth1:7 ที่จะมามีค่าใกล้เคียงกับ 0.5Eth1:7 คือ  $3.12 \times 10^{-5}$  S/cm และ  $2.74 \times 10^{-5}$  S/cm ตามลำดับ และพบว่าในสัดส่วน 1:7 ของทุกสูตร จะเป็นสัดส่วนที่ทำให้มีค่านำไฟฟ้าสูงที่สุด โดยที่สัดส่วนนี้จะทำให้ได้ค่านำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันแม้จะมีปริมาณ MWCNT ที่แตกต่างกัน โดยใน PU-ether นาโนคอมพอสิต สูตรที่ให้ค่านำไฟฟ้าดีที่สุดคือ 0.4Eth1:7 โดยมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 2 magnitude เมื่อเทียบกับ 0.5Eth และ Eth3.5 (89.79 เท่า และ 45.81 เท่า ตามลำดับ)

เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมพอสิต พบว่ามีค่าสูงกว่า ชิ้นงาน PU/MWCNT ที่มีการเติม MWCNT เพียงอย่างเดียว ทำให้ทราบว่า CB ที่ผสมลงในนาโนคอมพอสิตมีความสามารถในการสร้างโครงข่ายเชื่อมโยงกับ MWCNT นำมาซึ่งเส้นทางการนำไฟฟ้า (Conductive pathway) ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sumfelth และคณะ [30] โดยเมื่อพิจารณาในแต่ละสูตรผสม พบว่าในอัตราส่วน MWCNT:CB เท่ากับ 1:7 จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบการนำไฟฟ้าของ PU-ester และ PU-ether จะพบว่า PU-ester นั้นให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า (PU-ester นาโนคอมพอสิต มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 107.88 เท่า และ 312.44 เท่า ส่วน PU-ether นาโนคอมพอสิต มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 89.79 เท่า และ 45.81 เท่า เมื่อเทียบกับสูตรที่เติม MWCNT และ CB เพียงอย่างเดียวตามลำดับ) ซึ่งสอดคล้องกับผลของ DSC ที่บ่งชี้ว่า PU-ester มี MWCNT และ CB กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างส่วนเดียวกัน อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลจาก UTM ที่ PU-ester มีสมบัติเชิงกลดีกว่า PU-ether



## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของความเข้มข้นของ CB และ MWCNT ต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน และการนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมโพสิต รวมถึงเปรียบเทียบการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ใน PU ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนนิมที่ต่างกัน (PU-ester และ PU-ether) พบว่าในสัดส่วน MWCNT:CB เท่ากับ 1:7 จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดทั้งใน PU-ester และ PU-ether โดย PU-ester มีค่านำไฟฟ้าสูงสุดในสูตร 0.5Es1:7 เท่ากับ  $3.71 \times 10^{-4}$  S/cm และ PU-ether มีค่านำไฟฟ้าสูงสุดในสูตร 0.4Eth1:7 เท่ากับ  $3.12 \times 10^{-5}$  S/cm ซึ่ง PU-ester และ PU-ether มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 107.88 เท่า และ 89.79 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการเติม MWCNT ปริมาณมากที่สุดเพียงอย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 312.44 เท่า และ 45.81 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการเติม CB ปริมาณมากที่สุดเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของ PU/MWCNT/CB นาโนคอมโพสิต พบว่ามีค่าสูงกว่าทั้ง PU/MWCNT และ PU/CB ทำให้ทราบว่า CB ที่ผสมลงในนาโนคอมโพสิตมีความสามารถในการสร้างโครงข่ายเชื่อมโยงกับ MWCNT นำมาซึ่งเส้นทางการนำไฟฟ้า (Conductive pathway) และค่านำไฟฟ้าที่ดีขึ้น โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบการนำไฟฟ้าของ PU-ether และ PU-ester นาโนคอมโพสิต จะพบว่า PU-ester จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า PU-ether ซึ่งสอดคล้องกับผลของ DSC ที่บ่งชี้ว่าใน PU-ester นาโนคอมโพสิต MWCNT และ CB มีการกระจายตัวในส่วนเดียวกันคือโครงสร้างส่วนแข็ง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของ PU-ester นาโนคอมโพสิต สูงกว่า PU-ether นาโนคอมโพสิต ที่มีการกระจายตัวของ MWCNT และ CB คนละส่วนกัน คือ MWCNT กระจายตัวในโครงสร้างส่วนนิม ส่วน CB กระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง โดยสามารถศึกษาการกระจายตัวของ MWCNT และ CB ได้โดย FESEM และพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ MWCNT และ CB แต่สารตัวเติมทั้งสองก็ยังมีกระจายตัวอยู่ใน PU เมทริกซ์ได้ดี ค่า Young's Modulus ของ PU-ester นาโนคอมโพสิต สูตรที่ใส่ปริมาณ MWCNT:CB มากที่สุด (0.5Es1:7) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 106% และ PU-ether นาโนคอมโพสิต (0.5Eth1:7) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 59% เมื่อเทียบกับเมทริกซ์ที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม เนื่องจากใน PU-ester MWCNT และ CB ที่มีการกระจายตัวในโครงสร้างส่วนแข็ง จะช่วยเสริมความแข็งแรงได้มากกว่า PU-ether ที่ MWCNT และ CB มีการกระจายตัวในโครงสร้างคนละส่วนกันนั่นเอง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิยูรีเทนนาโนคอมพอสิต โดยมีปัจจัยศึกษาต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ปริมาณของคาร์บอนแบล็ค และ อัตราส่วนความเข้มข้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อคาร์บอนแบล็ค สามารถสรุปข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ และคาร์บอนแบล็คต่อวัสดุนาโนคอมพอสิตชนิดอื่นเพื่อลดต้นทุน
2. ศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นที่สูงขึ้นระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ และคาร์บอนแบล็คต่อสารตัวเติมระดับนาโนชนิดอื่น
3. ศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์ PU กับสารตัวเติมระดับนาโนชนิดอื่น เช่น กราฟีน
4. ศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ และคาร์บอนแบล็ค โดยกำหนด % คาร์บอนสุทธิของสารตัวเติมที่เท่ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. 2552. “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์.” *เคมีพอลิเมอร์*. 2552(5) : 1-46
- [2] Michael Eastman. 2010. *Materials World Modules*. [Online]. Available : <http://materialsworld.utep.edu/Modules/Composite/Morehouse%20Composites/MoreHouse%20Composites.htm>
- [3] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, กอบบุญ หล่อทองคำ, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, ธาชาย เหลืองวรานันท์, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ ออยุธยา และปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล. 2548. *วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ที่อป.
- [4] Clingerman, M.L. 1998. *Development and Modeling of Electrically Conductive Composite Materials*. Michigan : Michigan Technological University.
- [5] Quinn, P.E. BGC Engineering Inc., Victoria, BC. 2012. *A Geometric Examination of the Development of Critical States in Soil*. [Online]. Available : <https://petequinnramblings.wordpress.com/2012/04/05/a-geometric-examination-of-the-development-of-critical-states-in-soil-draft-paper/>
- [6] Adam, N. Avar, G. Blankenheim, H. Friederichs, W. Giersig, M. Weigand, E. Halfmann, M. Wittbecker, F.W. Larimer, D.R. Maier, U. Ahrens, S.M. Noble K.L. and Wussow, H.G. 2005. “Polyurethanes.” (2) : 1-56.
- [7] Wang, L. 2006. *Polyurethane Foam*. [Online]. Available : <https://pubs.acs.org/cen/whatstuff/84/8402foam.html>
- [8] อภิชาติ ต่านวิทยากุล. “ท่อนาโนคาร์บอน วัสดุในอนาคต.” *เทคโนโลยีวัสดุ*. 61(2553) : 13-18.
- [9] Burmistrov, I. Gorshkov, N. Ilinykh, I. Muratov, D. Kolesnikov, E. Anshin, S. Mazov, I. Issi, J.P. Kusnezov. D. “Improvement of carbon black based polymer composite electrical conductivity with additions of MWCNT.” *Composite Science and Technology*. 129(2016) : 79-85.
- [10] วิชรพันธุ์ มณีรัตน์. 2549. “การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนแบล็ค.” *ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [11] Mitsubishi Chemical. 2006. *Three Main Properties of Carbon Black*. [Online]. Available : <http://www.carbonblack.jp/en/cb/tokusei.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] ชลธิชา หอมวัน, ธัญรดา วัฒนภาณ และปฐมพร อุดมวงศ์ศักดิ์. 2558. “การศึกษาจุดนำไฟฟ้าของพอลิยูรีเทน/คาร์บอนนาโนทิวบ์คอมโพสิตที่เตรียมโดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว.” *ปริญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- [13] ณัฐินี โล่ห์พัฒนานนท์. “พอลิเมอร์เชิงประกอบ : ความรู้พื้นฐานและสมบัติ.” *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2552) : 1-13.*
- [14] Nicholls, R. “Composite construction materials handbook.” Department of Civil Engineering University of Delaware. (1976) : 1-22.
- [15] Koo, J.H. “Nanocomposite.” *Polymer nanocomposite. Processing, Characterization and application (2006)*
- [16] Sonnenschein, M. Wendt, B. Achroc, A. Sonney, J. and Ryan, A. “The relationship between polyurethane foam microstructure and foam aging.” *Polymer. 49 (2008) : 934*
- [17] Wong, P. Akinwande, D. 2011. “Synthesis of CNTs.” *Carbon Nanotubes and Graphene Device Physics. 11(1) : 3-5.*
- [18] Ganesh, E.N. 2013. “Single Walled and Multiwalled Carbon Nanotube Structure, Synthesis and Application.” *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 13(2) : 2278-3075.*
- [19] Picasa I. 2013. Carbon nanotubes. [Online]. Available : [http://www.slideshare.net/Picasa\\_10/carbon-nanotubes-28857394](http://www.slideshare.net/Picasa_10/carbon-nanotubes-28857394).
- [20] Yeetsorn, R. 2004. “A new Advanced Material Rapidly Interested Scientists.” *The Journal of KMITNB. 14 (2004) : 60-63.*
- [21] Y. Gogotsi. 2006. “Properties.” *Nanotubes and Nanofibers. 1 (2006) : 11-31.*
- [22] Orion Engineered Carbons. 2013. What is carbon black. [Online]. Available : <http://www.orioncarbons.com/carbon-black>.
- [23] อธิพิล แจ้งชัด. 2545. *คู่มือประกอบการสอน เทคโนโลยียาง.* กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] Jean-louis, H. Francoise, L. and Lucien, M. 2011. *Polymer Materials.* New Jersey : Wiley.
- [25] International Carbon black Association. 2016. Carbon black overview of use. [Online]. Available : <http://www.carbon-black.org/index.php/carbon-black-uses>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

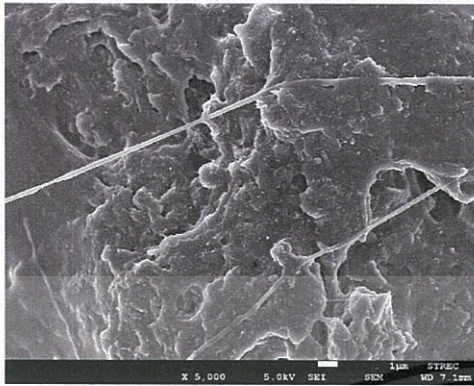
- [26] Paul Jame Brigandi. 2014. “Electrically Conductive Multiphase Polymer Blend Carbon-Based Composites.” Theses and Dissertation, Lehigh University.
- [27] เบญจพร หนูคล้าย. 2551. “วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและตัวเติมนาโนเป็นตัวตรวจทางอิเล็กทรอนิกส์.” ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [28] Richard, F. Mark, B. and Vijay, W. 2015. “Electromagnetic Shielding with Conductive Polymer Composite Materials.” *Society of Plastic Engineer, Plastic research online*.
- [29] Russo, P. Acierno, D. Marletta, G. and Destri, G. “Tensile properties, thermal and morphological analysis of thermoplastic polyurethane films reinforced with multiwalled carbon nanotubes.” *European Polymer Journal*. 49(2013) : 3315-3164.
- [30] Sumfleth et al. (2009). Synergistic effects in network formation and electrical properties of hybrid epoxy nanocomposites containing multi-wall carbon nanotubes and carbon black. *Material Science*. 44 : 3241-3247
- [31] Differential Scanning Calorimeter. 2016. DSC. [Online]. Available : [http://www2.nanotec.or.th/th/?page\\_id=559](http://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=559)
- [32] Jeol. 2015. JSM-7610F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope. [Online]. Available : <http://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-7610F.html>.
- [33] Dumbbell co., ltd. 2016. Super Dumbbell Cutters Available (Extracted) List of Corresponding Standards. [Online]. Available : [http://www.dumbbell.co.jp/english/super\\_dumbbell01.html](http://www.dumbbell.co.jp/english/super_dumbbell01.html).
- [34] Raman Spectroscopy. 2016. เทคนิคทางรามาน. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/https://www.mtec.or.th/list-all-categories/2145>



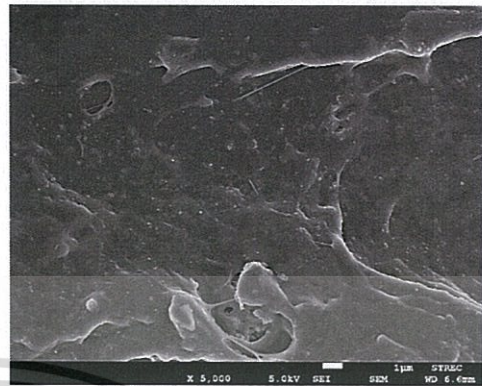
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

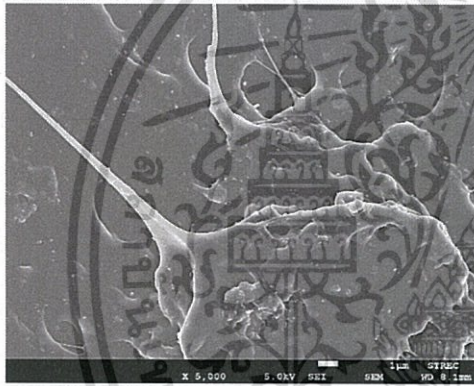
## ภาคผนวก ก



(a)



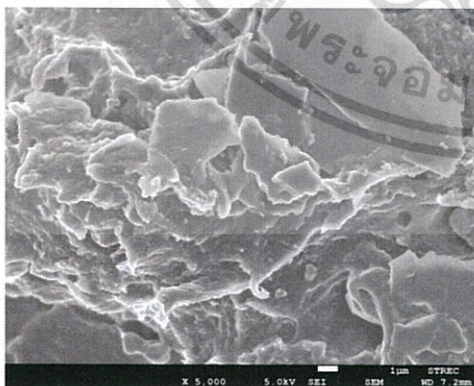
(b)



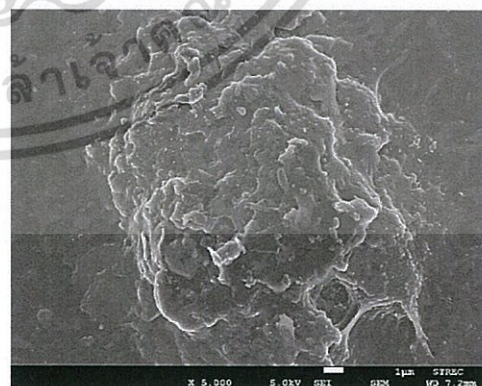
(c)



(d)



(e)

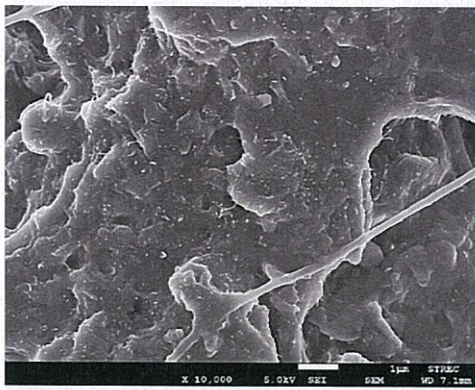


(f)

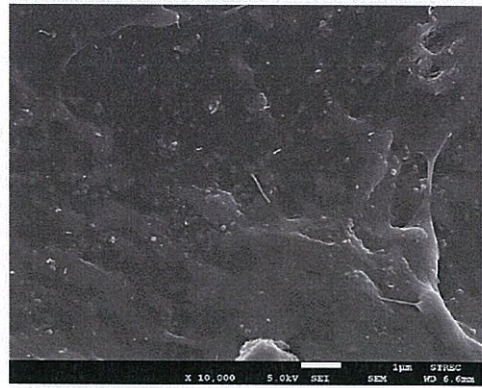
รูปที่ ก.1 ภาพ FESEM ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย x5000 (a) 0.3Es1:1, (b) 0.3Es1:3,

(c) 0.3Es1:7, (d) 0.4Es1:7, (e) 0.5Es1:1 และ (f) 0.5Es1:7

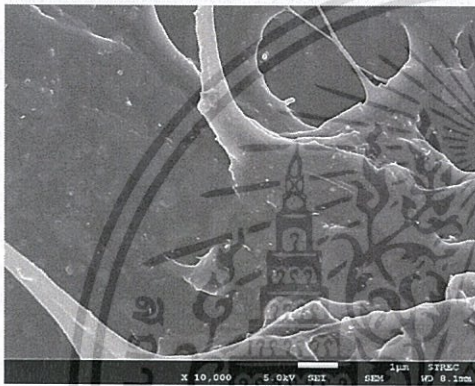
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



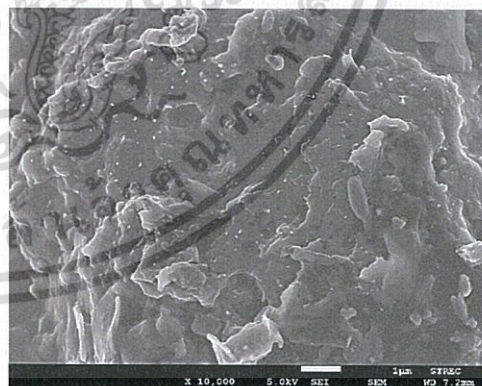
(c)



(d)



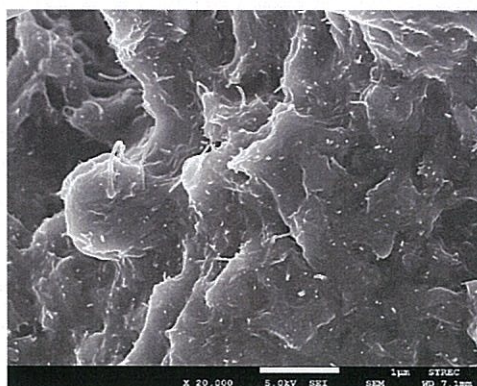
(e)



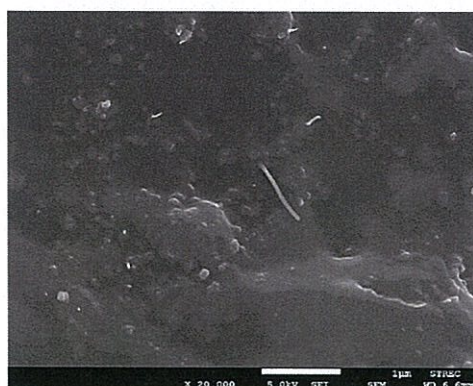
(f)

รูปที่ ก.2 ภาพ FESEM ของพื้นที่ผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  (a)  $0.3Es1:1$ , (b)  $0.3Es1:3$ , (c)  $0.3Es1:7$ , (d)  $0.4Es1:7$ , (e)  $0.5Es1:1$  และ (f)  $0.5Es1:7$

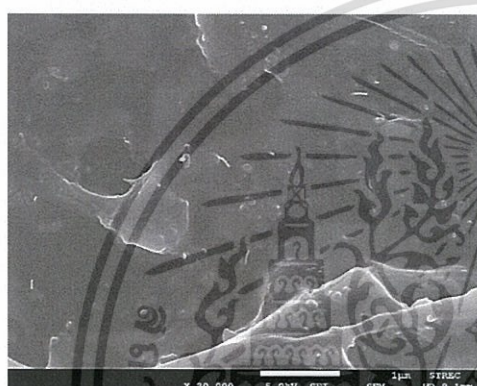
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



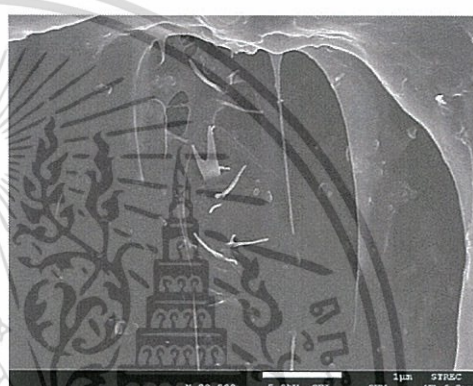
(a)



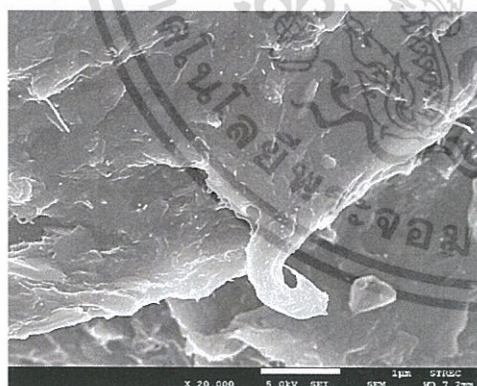
(b)



(c)



(d)



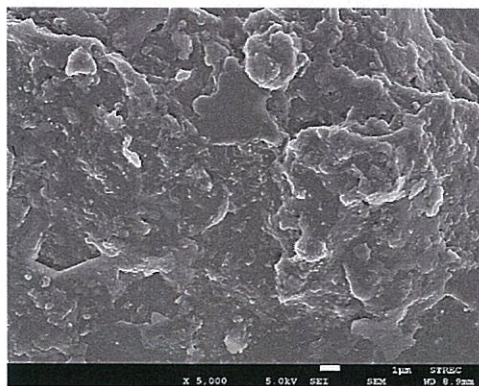
(e)



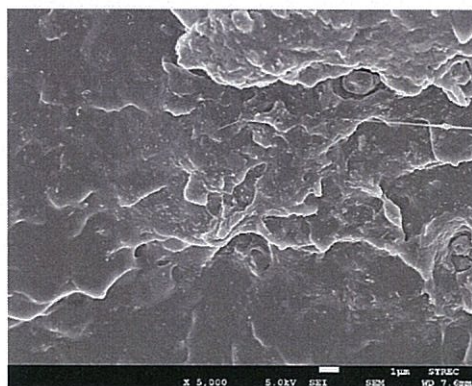
(f)

รูปที่ ก.3 ภาพ FESEM ของพื้นที่ผิวแตกหักที่กำลังขยาย x20000 (a) 0.3Es1:1, (b) 0.3ES1:3, (c) 0.3Es1:7, (d) 0.4Es1:7, (e) 0.5Es1:1 และ (f) 0.5Es1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



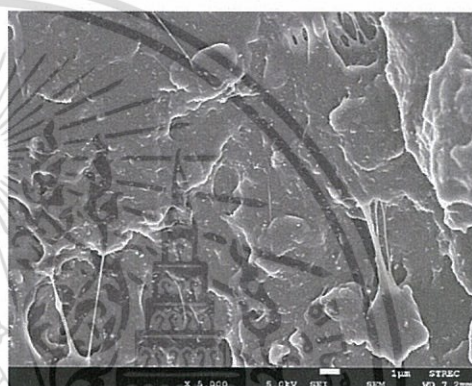
(a)



(b)

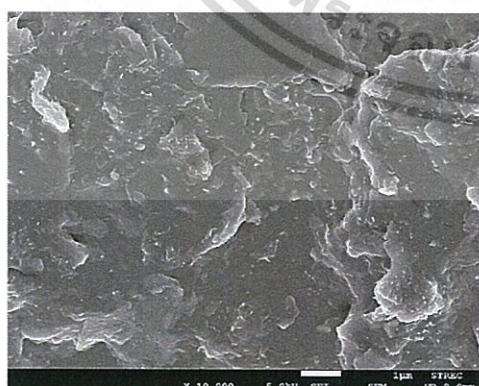


(c)



(d)

รูปที่ ก.4 ภาพ FESEM ของพื้นที่ผิวแตกหักที่กำลังขยาย x5000 (a) 0.3Eth1:7, (b) 0.4Eth1:7, (c) 0.5Eth1:1 และ (d) 0.5Eth1:7

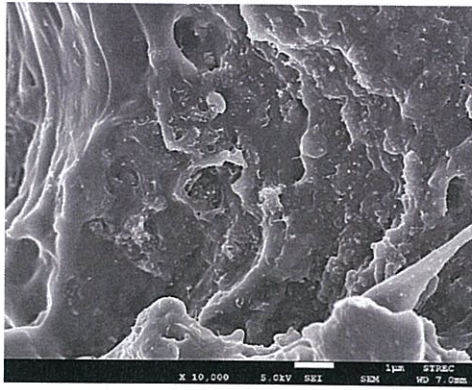


(a)

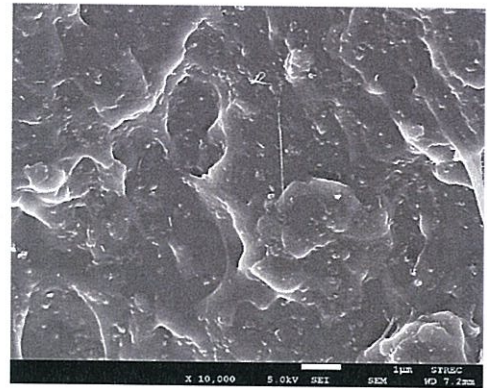


(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

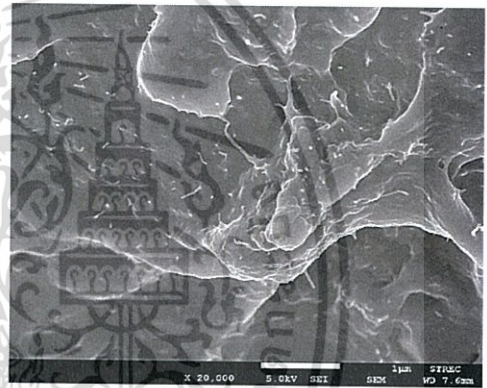


(d)

รูปที่ ก.5 ภาพ FESEM ของพื้นที่ผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 10000$  (a) 0.3Eth1:7, (b) 0.4Eth1:7, (c) 0.5Eth1:1 และ (d) 0.5Eth1:7



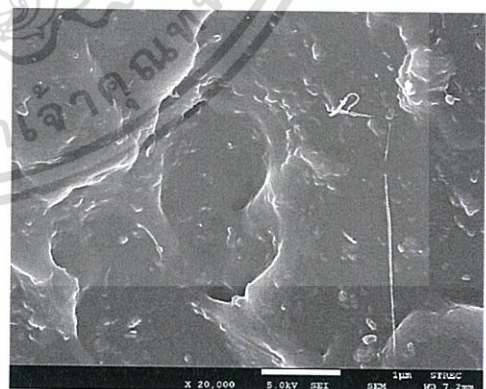
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ ก.6 ภาพ FESEM ของพื้นที่ผิวแตกหักที่กำลังขยาย  $\times 20000$  (a) 0.3Eth1:7, (b) 0.4Eth1:7, (c) 0.5Eth1:1 และ (d) 0.5Eth1:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

