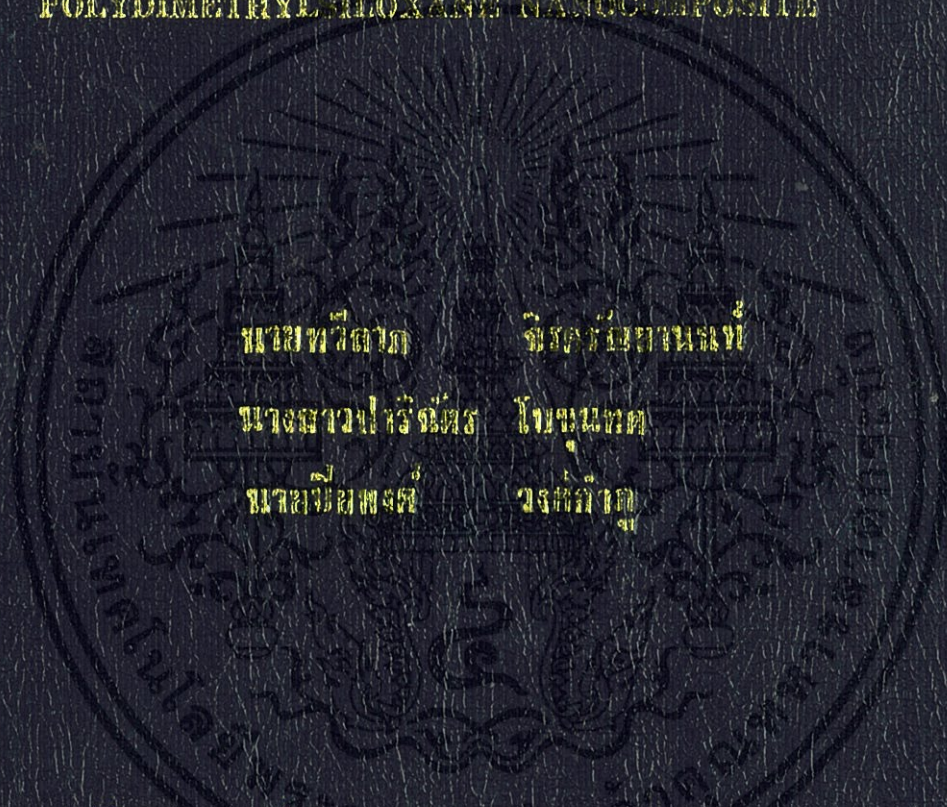


ผลของท่อนาโนคาร์บอนที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติเชิงกลของ  
เมทริกซ์ไททานเตตและพอลิไดเมทิลซิลอกเซนนาโนคอมโพสิต

EFFECT OF CARBON NANOTUBE ON THE DIELECTRIC AND  
MECHANICAL PROPERTIES OF BARIUM TITANATE AND  
POLYDIMETHYLSILOXANE NANOCOMPOSITE



นายทวีศักดิ์

จิตรวิชัยนันท์

นางสาวปวีณีพร

โชนนาค

นายวิชัยพงศ์

วงศ์ศักดิ์

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาศรณคดีศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ

ธนาเสนีคุณฉัตรกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ผลของแท่งนาโนคาร์บอนที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของ  
แบบเรียมไททานเตและพอลิไดเมทิลไซลอกเซนนาโนคอมโพสิต  
EFFECT OF CARBON NANOTUBE ON THE DIELECTRIC AND  
MECHANICAL PROPERTIES OF BARIUM TITANATE AND  
POLYDIMETHYLSILOXANE NANOCOMPOSITE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบรียรัมย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาสาระของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2556

**EFFECT OF CARBON NANOTUBE ON THE DIELECTRIC AND  
MECHANICAL PROPERTIES OF BARIUM TITANATE AND  
POLYDIMETHYLSILOXANE NANOCOMPOSITE**



**MR. TAWEE RAP JIRASARANYANON  
MISS PARICHAD BOKHUNTOD  
MR. PIYAPONG WONGKAMPOO**

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

**FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของแท่งนาโนคาร์บอนที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของ  
แบเรียมไททาเนตและพอลิไดเมทิลไซลอกเซนนาโนคอมโพสิต

Title Effect of carbon nanotube on the dielectric and mechanical properties of  
Barium Titanate and Polydimethylsiloxane nanocomposite

นักศึกษา นายทวิลาภ จิรศรัณยานนท์ รหัสนักศึกษา 53050233  
นางสาวปาริฉัตร โปขุนทด รหัสนักศึกษา 53050272  
นายปิยพงศ์ วงศ์กำภู รหัสนักศึกษา 53050273

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. ปานไพลิน สีหาราช	
รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	
ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของแท่งนาโนคาร์บอนที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของ แบเรียมไททาเนตและพอลิไดเมทิลไซลอกเซนนาโนคอมโพสิต
นักศึกษา	นายทวีลาภ จิรศรัณยานนท์ นางสาวปาริฉัตร โปขุนทด นายปิยพงศ์ วงศ์กำภู
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (BT) กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) ด้วยวิธี 0-3 คอมโพสิต โดยทำการเตรียมวัสดุผสม BT กับ PDMS ที่อัตราส่วนแบเรียมไททาเนตแตกต่างกัน (10% 20% 30% 40% และ 50% โดยน้ำหนัก) นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสมด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (CNT) ที่ปริมาณแตกต่างกัน (1% 2% 3% 4% และ 5% โดยน้ำหนัก) จากนั้นทำการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกล ของวัสดุที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่า วัสดุผสม BT-PDMS มีการกระจายตัวที่ไม่ดี เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ BT ลงใน PDMS มากขึ้นพบว่าวัสดุผสมมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ปริมาณ BT 50% ที่ความถี่ 1 kHz จะมีค่าไดอิเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 7.206 และค่าความความแข็งของวัสดุผสมจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ BT ลงใน PDMS โดยจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 50 ที่ BT 50% และยังพบว่าจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุผสม ค่ายังมอดูลัสของวัสดุผสม BT-PDMS จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ BT ลงในวัสดุผสม นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสมด้วย CNT จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CNT จะทำให้การกระจายตัวของ BT ใน PDMS ดีขึ้น การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคน้อยลง และเมื่อเพิ่มปริมาณ CNT ในวัสดุผสม ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้น โดยที่ปริมาณ CNT 5% ที่ความถี่ 1 kHz จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 9.31 และว่าค่าความความแข็งของวัสดุผสมจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณ CNT เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 55 ที่ CNT 5% และทำการทดสอบค่าแรงดึงของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT พบว่าค่ายังมอดูลัสจะมีค่าสูงสุดที่ CNT 2% แสดงให้เห็นว่าการเติม CNT จะช่วยปรับปรุงสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น เมื่อปริมาณแบเรียมไททาเนตที่ 50% จะทำให้วัสดุผสมมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากที่สุด

<b>Title</b>	Effect of carbon nanotube on the dielectric and mechanical properties of Barium Titanate and Polydimethylsiloxane nanocomposite
<b>Student</b>	Mr. Taweerap Jirasaranyanon Miss Parichad Bokhuntood Mr. Piyapong Wongkampoo
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Naratip Vittayakorn

### ABSTRACT

This research aimed on preparation of composites from Barium titanate (BT) and Polydimethylsiloxane (PDMS) by 0-3 composite method. The ratio of BT in composites was varied at 10, 20, 30, 40 and 50 wt%. The properties of composites were enhanced by carbon nanotube (CNT) at 1, 2, 3, 4 and 5 wt%. Physical, electrical and mechanical properties of prepared composites were then investigated. The result obtained from SEM shown aggregation indicating that the composites had bad dispersion. Nevertheless, Dielectric constant increased when increasing BT content in the composites. The highest dielectric constant, 7.206, was found at BT 50% by using testing frequency at 1 KHz. The hardness of the composites also increased by founding the maximum result, 50, at BT 50%. The tensile properties shown that increasing BT in the composites also increased young's modulus. The result obtained when adding CNT into the composites shown less agglomerate of BT in the composites indicating as better dispersion, higher dielectric constant, higher hardness and mechanical properties. Thus, adding CNT can improve properties of BT-PDMS composites

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชาโครงการงานพิเศษในหัวข้อเรื่อง ผลของแท่งนาโนคาร์บอนที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของแบเรียมไททานเตและพอลิโพรพิลีนไซลลอกเซนนาโนคอมโพสิต โครงการงานพิเศษนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากไม่ได้รับการช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย ตอบข้อซักถาม และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ตลอดจนให้ความสนใจจนกระทั่งโครงการงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ และ ดร. ปานไพลิน สี่หาราช ในการเป็นคณะกรรมการตรวจสอบงานวิจัย ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเบิกเครื่องมืออุปกรณ์ รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการต่างๆ

ขอบคุณพี่ออฟ พี่ลิ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และคอยช่วยเหลือ ตลอดจนกำลังใจ ที่ทำให้โครงการงานพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอบใจเพื่อนๆ เคมีอุตสาหกรรมรุ่นที่ 29 ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ และอยู่ร่วมกันมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพ่อและแม่ของผู้จัดทำที่เป็นกำลังใจและคอยห่วงใยอยู่เสมอ

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับโครงการงานพิเศษนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายทวิลาภ จิรศรีธยานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้นนางสาวปาริฉัตร โบบุณฑล วิชาชั้นด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้  
นายปิยพงศ์ วงศ์กำภู

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	4
2.1 คอมโพสิต (Composite)	4
2.2 ชนิดของคอมโพสิต	5
2.3 แบเรียมไททานเนต (Barium titanate; BaTiO <sub>3</sub> )	13
2.4 พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane ; PDMS)	17
2.5 แท่งนาโนคาร์บอน	19
2.6 เอกสารที่เกี่ยวข้องงานวิจัย	23
2.7 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)	43
2.7.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	43
2.7.2 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss tangent)	47
2.8 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	48
2.8.1 ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2 วิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด (FT-IR Spectrometer)	49
2.8.3 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	51
2.8.4 ศึกษาเอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)	53
2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	54
2.9.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)	54
2.9.2 ความแข็ง (Hardness)	57
2.10 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก	59
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง</b>	60
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	60
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	61
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	62
3.3.1 กระบวนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากแบเรียมไททานด์กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน	62
3.3.2 กระบวนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากแบเรียมไททานด์กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน	64
3.4 การตรวจสอบสมบัติ	65
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	67
4.1 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม BT-PDMS 67  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเหล่านี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	68
4.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	70
4.2.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุผสม BT-PDMS	70
4.2.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	71
4.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	73
4.3.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสม BT-PDMS	73
4.3.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	75
4.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี	76
4.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสม BT-PDMS	76
4.4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	78
4.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม	79
4.5.1 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม BT-PDMS	79
4.5.2 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	81
4.6 การทดสอบค่าความแข็งของวัสดุผสม	83
4.6.1 การทดสอบค่าความแข็งของวัสดุผสม BT-PDMS	83
4.6.2 การทดสอบค่าความแข็งของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	84
4.7 การทดสอบแรงดึงของวัสดุผสม	85
4.7.1 ความเครียด (Strain) ของวัสดุผสม	85
4.7.1.1 ความเครียดของวัสดุผสม BT-PDMS	85
4.7.1.2 ความเครียดของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7.2 ความเค้น (Stress) ของวัสดุผสม	88
4.7.2.1 ค่าความเค้นของวัสดุผสม BT-PDMS	88
4.7.2.2 ค่าความเค้นของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	89
4.7.3 ความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของวัสดุผสม	90
4.7.3.1 ความแข็งเกร็งของวัสดุผสม BT-PDMS	90
4.7.3.2 ความแข็งเกร็งของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	90
4.7.4 มอดุลัส (Young's Modulus) ของวัสดุผสม	91
4.7.4.1 ค่ามอดุลัสของวัสดุผสม BT-PDMS	91
4.7.4.2 ค่ามอดุลัสของวัสดุผสม BT-PDMS-CNT	92
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	96
5.1 สรุปผลวิจัย	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	101
<b>ภาคผนวก ก ข้อมูลมาตรฐาน JCPDS</b>	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของแบเรียมไททานेट	15
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน	17
ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่น ค่าความจุความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> /PVDF ที่ได้จากการคำนวณ	27
ตารางที่ 2.4 ความหนาและค่าความต้านทานของคอมโพสิต	42
ตารางที่ 2.5 สถิติพารามิเตอร์และลักษณะของความทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength)	42
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณอัตราส่วนของแบเรียมไททานेटกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน	62
ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณอัตราส่วนของแบเรียมไททานेटกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และแท่งนาโนคาร์บอน	64
ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่เตรียมได้	66
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองของวัสดุผสม BT/PDMS กับวัสดุผสม BT/PDMS/CNT	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะต่าง ๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอม โพลีต	4
รูปที่ 2.2 คอม โพลีตแบบชั้น	7
รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนดวิช	7
รูปที่ 2.4 การเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงานด้วยอนุภาค PSZ	10
รูปที่ 2.5 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่าง ๆ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส	11
รูปที่ 2.6 แบบจำลองของเฟาเออร์ 0-3 คอม โพลีต	13
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงผลึกแบเรียมไททานेट	14
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททานेट	16
รูปที่ 2.9 หน่วยซ้ำของ PDMS	17
รูปที่ 2.10 ลักษณะพื้นฐานของท่อนาโน	20
รูปที่ 2.11 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	20
รูปที่ 2.12 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน	21
รูปที่ 2.13 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่าง ๆ	22
รูปที่ 2.14 ภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	22
รูปที่ 2.15 ค่ายินยอมสัมพัทธ์ และการสูญเสียพลังงาน ของคอม โพลีตที่มีปริมาตรต่าง ๆ กัน ของคอม โพลีตก่อนและหลังการ โพลิง (Poling)	23
รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงในปริมาณความต้านทานที่มี MWCNT ในนาโนคอม โพลีต PE / MWCNT	25
รูปที่ 2.17 สมบัติเชิงกลของ PE และนาโนคอม โพลีตของ PE/MWCNT จะขึ้นอยู่กับ ปริมาตรที่ใส่ MWCNT	25
รูปที่ 2.18 ภาพ SEM ของคอม โพลีต โดยสัดส่วนปริมาตรเท่ากับ 0.3	26
รูปที่ 2.19 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอม โพลีต BaTiO <sub>3</sub> /PVDF ที่ 1 กิโลเฮิรตซ์	27
รูปที่ 2.20 กราฟ Stress-strain ของวัสดุคอม โพลีตและฟิล์ม โคพอลิเมอร์จะอยู่ภายใต้ การดึงยืดแนวเดียว	29
รูปที่ 2.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุ PZT เมื่อให้แรงเชิงกล โดยใช้ แท่งเทฟลอน และ นิ้วมือกดที่เวลาต่างกัน	30

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.22 ค่ากำลังไฟฟ้าของวัสดุ PZT ที่ความต้านทานต่างๆ	30
รูปที่ 2.23 ค่า Dielectric permittivity เมื่อเทียบกับความถี่ของคอมโพสิต PP/40 wt. % BT ที่ 0–3 wt.% MWNT	31
รูปที่ 2.24 ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อเทียบกับความถี่ของ นาโนคอมโพสิต PP/MWNT ที่มีและไม่มีคาร์บอนไฟเบอร์ 40 wt.% BT หรืออนุภาค m-BT	32
รูปที่ 2.25 แผนภาพจำลองของตัวตรวจจับ PZT NAFCs AE	33
รูปที่ 2.26 เวกเตอร์ของอินเตอร์ดิฟิรชันกับเส้นใย PZT ที่ได้จากกล้องแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	33
รูปที่ 2.27 สัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวตรวจจับเทียบกับเวลา	34
รูปที่ 2.28 เสถียรภาพของคอมโพสิตภายใต้ความเครียดกดอัด 0.23% เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ที่ความถี่ 0.33 Hz (ประมาณ 36000 รอบ)	35
รูปที่ 2.29 ภาพจากกล้องดิจิทัลแสดงแสงจากหลอด LED ที่เปิดด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิต	35
รูปที่ 2.30 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิตขณะทำการบิดงออย่างต่อเนื่อง	36
รูปที่ 2.31 ภาพ SEM ของ 2 ตัวอย่าง	37
รูปที่ 2.32 กราฟระหว่าง Stress – Strain ของตัวอย่าง PDMS/CNT และ PDMS บริสุทธิ์	38
รูปที่ 2.33 ค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT	38
รูปที่ 2.34 SEM ของ PMMA/BaTiO <sub>3</sub> คอมโพสิตที่ BaTiO <sub>3</sub> 45% โดยปริมาตร	39
รูปที่ 2.35 การวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ของวัสดุผสม PMMA/BaTiO <sub>3</sub>	40
รูปที่ 2.36 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของคอมโพสิต	41
รูปที่ 2.37 กระบวนการโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ	44
รูปที่ 2.38 ปริซึมมูลฐานของวัสดุที่มีการเกิดโพลาริเซชัน	45
รูปที่ 2.39 บทบาทของสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ	45
รูปที่ 2.40 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ	47
รูปที่ 2.41 แสดงแบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	49

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.42 Infrared spectrum ของ Aniline	50
รูปที่ 2.43 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR spectrometer	51
รูปที่ 2.44 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	52
รูปที่ 2.45 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุ	55
รูปที่ 2.46 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท	56
รูปที่ 2.47 เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer)	59
รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม BT 50% / PDMS 50%	68
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสมที่ BT 50% / PDMS 50% / CNT 5%	69
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เป็นภาพแบบ (SE) และภาพแบบ (BSE) ของวัสดุผสม BT/PDMS	71
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เป็นภาพแบบ (SE) และภาพแบบ (BSE) ของวัสดุผสม BT/PDMS/CNT	73
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของวัสดุผสมที่ BT 50 % กับ PDMS 50 %	74
รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของวัสดุผสมที่ BT 50% PDMS 50% CNT 5%	76
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสเปกตรัมของโครงสร้างของวัสดุผสม BT 50% กับ PDMS 50%	77
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะสเปกตรัมของโครงสร้างของวัสดุผสม BT 50% PDMS 50% CNT 5%	78
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของปริมาณของ BT ที่ผสมในวัสดุผสมที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz , 100 kHz , 1 MHz และ 2 MHz	80
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การสูญเสียไดอิเล็กทริกของปริมาณของ BT ที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz	81
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของปริมาณของ CNT ที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz	82
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การสูญเสียไดอิเล็กทริกของปริมาณของ CNT ที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz	83
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของปริมาณ BT ที่ผสมในวัสดุผสม	84
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของปริมาณ CNT ที่ผสมในวัสดุผสม	85

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ณ จุดขาดกับปริมาณของ BT	86
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ณ จุดขาดกับปริมาณของ CNT	87
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ณ จุดขาดกับปริมาณของ BT	88
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ณ จุดขาดกับปริมาณของ CNT	89
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของปริมาณ BT	90
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของปริมาณ CNT	91
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของปริมาณ BT	92
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของปริมาณ CNT	93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีความเจริญก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น มีผลทำให้มนุษย์พยายามหาวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุเดิมมาเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ วัสดุผสม (Composite) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ เนื่องมาจากวัสดุผสมจะปรับปรุงสมบัติโดยรวมของวัสดุให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากกว่าวัสดุที่เป็นชนิดเดียว ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์คอมโพสิต (Composite polymer) เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ เนื่องจากพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูง และความหนาแน่นต่ำทำให้วัสดุที่ได้มีน้ำหนักเบา เป็นต้น

คอมโพสิตนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ พอลิเมอร์คอมโพสิต เซรามิกคอมโพสิต และโลหะคอมโพสิต โดยในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เรียกว่า วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ซึ่งวัสดุผสมชนิดนี้มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาวัสดุอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น โดยจะมี 2 เฟส คือ เฟสเนื้อหลัก คือพอลิไคเมทิลไซลอกเซน และเฟสที่กระจายตัว คือ แบเรียมไททาเนต สำหรับวัสดุผสมที่มี 2 เฟสนั้น สามารถจัดเรียงติดกันได้ 10 แบบ คือ 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3 และ 3-3 โดยรูปแบบที่งานวิจัยนี้ศึกษา คือ แบบ 0-3 เนื่องจากเป็นรูปแบบการเรียงติดกันที่สามารถเตรียมได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับนาโนคอมโพสิตอย่างกว้างขวางโดยในช่วงแรกได้มีงานวิจัยคอมโพสิตพอลิเอทิลีน ร่วมกับแบเรียมไททาเนต ซึ่งจะพบปัญหาในเรื่องความคงทนไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อปริมาณแบเรียมไททาเนตเพิ่มมากขึ้นและพบความเปราะของคอมโพสิต ต่อมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคอมโพสิตที่ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน (Polypropylene) เมทริกซ์และแบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนซึ่งเป็นสารประกอบเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) จะสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับพลังงานเหล่านี้แสดงถึงความเป็นไปได้ของการใช้วัสดุนาโนที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในการใช้เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดในงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการศึกษาคอมโพสิตจากแบเรียมไททาเนตกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซน ซึ่งจะใช้แบเรียมไททาเนตขนาดอนุภาคนาโน เนื่องจากมีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่นใน

การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลและสามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และใช้พอลิโคมทิลไซลอกเซน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น สามารถตัดโค้งงอได้ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับคอมโพสิตของแบเรียมไททานิตและพอลิโคมทิลไซลอกเซน คือเมื่อนำมาขึ้นรูปนั้น จะเกิดปัญหาในเรื่องของการตกตะกอน และการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของแบเรียมไททานิต งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเติมท่อนาโนคาร์บอนซึ่งจะช่วยในเรื่องของการกระจายตัวของวัสดุภาคและศึกษาสมบัติว่าท่อนาโนคาร์บอนจะช่วยสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมอย่างไร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุผสมระหว่างแบเรียมไททานิตและพอลิโคมทิลไซลอกเซน
2. เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมระหว่าง แบเรียมไททานิต พอลิโคมทิลไซลอกเซน และแท่งนาโนคาร์บอน ในการขึ้นรูปวัสดุผสม
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมที่เตรียมได้
4. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยาของวัสดุผสมที่เตรียมได้
5. หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนและสมบัติของวัสดุผสมที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนแบเรียมไททานิตที่ 10% 20% 30% 40% และ 50% ของพอลิโคมทิลไซลอกเซน แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า
2. ศึกษาอัตราส่วนแท่งนาโนคาร์บอนที่ 1% 2% 3% 4% และ 5% ของคอมโพสิตแบเรียมไททานิตและพอลิโคมทิลไซลอกเซน แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า
3. เตรียมนาโนคอมโพสิตเพียโซอิเล็กทริกด้วยแบเรียมไททานิตร่วมกับพอลิโคมทิลไซลอกเซน โดยวิธี 0-3 คอมโพสิต
4. ตรวจสอบเฟส สมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น การกระจายตัว สมบัติเชิงกล

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเมอร์ แบเรียมไททานิต และแท่งนาโนเอกสารนี้เป็นเอกสารคาร์บอนในการเตรียมวัสดุผสม การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ
2. ทราบถึงวัฏภาค สมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น การกระจายตัว สมบัติเชิงกล ของวัสดุผสมที่เตรียมได้

3. ทราบถึงสมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุผสมที่เตรียมได้



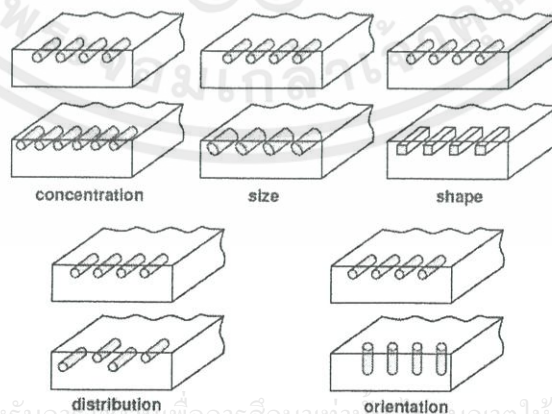
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คอมโพสิต (composite) [1]

คอมโพสิต (Composite) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือ โครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced phase) ยกตัวอย่างคอมโพสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (Lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibre) หรือกระดูก ซึ่งเป็นคอมโพสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (Apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น ในส่วนของคอมโพสิตสังเคราะห์นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมโพสิตที่ได้จะขึ้น อยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ รูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะต่าง ๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิต จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเป็นคอมโพสิตที่เกิดจากเมทริกซ์และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกันแล้ว สุดท้ายคอมโพสิตที่ได้ก็จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน



รูปที่ 2.1 ลักษณะต่าง ๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต ได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจาย และการจัดเรียงตัว [1]

## 2.2 ชนิดของคอมโพสิต

### 2.2.1 คอมโพสิตเสริมแรง

#### 2.2.1.1 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคคือ คอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใด ๆ กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) และคอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-strengthened composite)

#### 2.2.1.2 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่

คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในที่นี้คือเรามองภาพรวมของอนุภาค ไม่Zoomในระดับอะตอมหรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่จนเกินไปและอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ รูปร่างของอนุภาคอาจเป็นได้หลายแบบแต่ควรมีลักษณะสมมาตร (Equiaxed) คือมีขนาดเท่ากันในทุก ๆ ทิศทาง นอกจากนี้ ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้นด้วยค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของคอมโพสิตที่เกิดจากสององค์ประกอบ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบทั้งสอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ “กฎของการผสม (Rule of mixture)” โดยที่ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของคอมโพสิตนั้น ๆ จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าขอบเขตสูงสุดของค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ( $E_c(u)$ ) กับค่าขอบเขตต่ำสุดของค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ( $E_c(l)$ ) ของคอมโพสิตค่า  $E_c(u)$  และค่า  $E_c(l)$  สามารถหาได้จากสมการ

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (2.1)$$

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E$  คือค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น และ  $V$  คือสัดส่วนโดยปริมาตร และสัญลักษณ์ตัวห้อย  $c, m$  และ  $p$  แทนคอมโพสิต เมทริกซ์ และอนุภาค ตามลำดับ

ตัวอย่างของคอมโพสิตประเภทนี้ที่รู้จักกันดีคือ คอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยเมทริกซ์ของซีเมนต์ โดยมีทรายและกรวดทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่เพื่อช่วยในการเสริมแรง และไม่ว่ากรณีใดก็ตามก็มักจะช่วยเสริมแรงแล้วการที่ใส่ทรายกับกรวดลงไปผสมทำให้สามารถลดปริมาณของซีเมนต์ซึ่งมีราคาแพงกว่า จึงเป็นการลดต้นทุนอีกทางหนึ่งด้วย

### 2.2.1.3 คอมโพลีเมอร์ที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค

ในคอมโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยอนุภาคประเภทนี้อ่อนนุ่มกว่าที่กระจายตัวอยู่จะมีขนาดเล็กกว่าคอมโพลีเมอร์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่มาก โดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตรอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ (Particle-matrix interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงนี้จะคล้ายกับกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation hardening) ตัวอย่างของคอมโพลีเมอร์ประเภทนี้เช่น นิกเกิล ทีดี (TD nickel) คือ นิกเกิลอัลลอยที่เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงโดยการเติมอนุภาคของทอเรีย (Thoria,  $\text{ThO}_2$ ) ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรลงไปกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของนิกเกิลอีกตัวอย่างหนึ่งคือยางรถยนต์ ซึ่งได้จากการเติมผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร ปริมาณ 15-30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรลงไปยางวัลคาไนซ์ (Vulcanised rubber) เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความแกร่ง และความต้านทานการสึกหรอให้กับยาง

### 2.2.1.4 คอมโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย

คอมโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดูลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

### 2.2.2 คอมโพลีเมอร์โครงสร้าง (Structural composite)

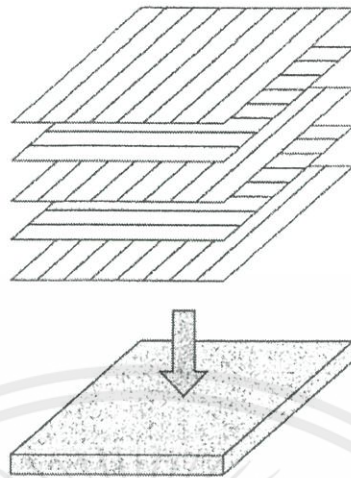
คอมโพลีเมอร์โครงสร้างสามารถประกอบขึ้น จากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพลีเมอร์ สมบัติของคอมโพลีเมอร์โครงสร้างนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย เราสามารถแบ่งคอมโพลีเมอร์โครงสร้างได้เป็นสองประเภทคือ คอมโพลีเมอร์แบบชั้น (Laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel)

### 2.2.3 คอมโพลีเมอร์แบบชั้น

คอมโพลีเมอร์แบบชั้นประกอบด้วยแผ่นชีท (Sheet) ที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทางเดียวมาเรียงซ้อนกัน ยกตัวอย่างเช่นแผ่นคอมโพลีเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจัดเรียงตัวขนานกัน แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนได้เป็นคอมโพลีเมอร์แบบชั้นเพื่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงควรเรียงแผ่นชีท

แบบสลับทิศทางของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวอย่างวัสดุคอมโพลีเมอร์ประเภทนี้เช่น กระดานสกี เป็นต้น

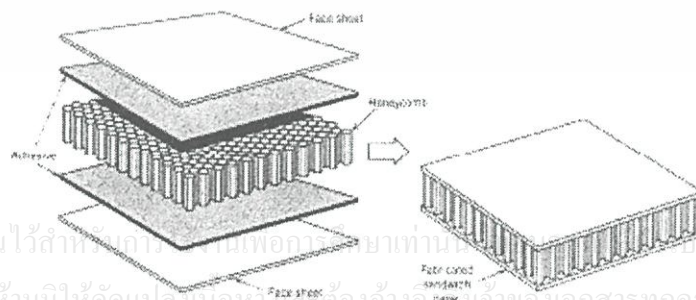
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 คอม โพลิตแบบชั้น [1]

#### 2.2.4 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel)

ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชเป็นคอม โพลิตโครงสร้างประเภทหนึ่ง ซึ่งมี ส่วนประกอบเป็นแกนกลางหรือที่เรียกว่า core และประกบที่ด้านบนและล่างด้วยแผ่นซีทที่เป็นผิวนอกหรือที่เรียกว่า face โดยมีแผ่นกาว (Adhesive) ทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่น core และ face ติดกัน หน้าที่ของแผ่น face คือเป็นตัวรองรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง ยกตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำ face เช่น อะลูมิเนียมอัลลอย เหล็กกล้า ไทเทเนียม ไม้อัด หรือแผ่นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นต้น ส่วน core จะช่วยเพิ่มค่า shear rigidity ในระนาบตั้งฉากกับแผ่น face และมักจะเป็น โครงสร้างที่โปร่งหรือมีรูพรุน รูปแบบโครงสร้างของ core ที่นิยมใช้คือแบบรังผึ้ง (Honeycomb) วัสดุที่ใช้ทำเป็น core เนื่องจาก core เป็น โครงสร้างแบบโปร่ง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรง และน้ำหนักเบา ดังนั้นผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชจึงนำไปใช้งานได้หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ทำเป็นหลังคาพื้นหรือกำแพงของอาคาร ทำเป็นชิ้นส่วนของปีกหรือช่องเก็บสัมภาระในเครื่องบิน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาย่านเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.5 ประเภทของคอมโพสิตแบ่งตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์

นอกจากการแบ่งประเภทของคอมโพสิตดังกล่าวข้างต้นแล้ว เรายังสามารถแบ่งประเภทของคอมโพสิตตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ได้เป็นสามประเภท ได้แก่ Polymer-Matrix Composites (PMCs), Metal-Matrix Composites (MMCs) และ Ceramic-Matrix Composites (CMCs)

### 2.2.5.1 Polymer-matrix composites (PMCs)

PMCs คือคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ส่วนวัสดุเสริมแรงเป็นได้หลากหลายทั้ง แก้วคาร์บอน และอะรามิด คอมโพสิตประเภทนี้มีการใช้งานแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก และขึ้นรูปง่ายที่อุณหภูมิห้องพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเมทริกซ์มากที่สุดคือพอลิเอสเทอร์และไวนิลเอสเทอร์ แต่นอกจากสองประเภทนี้แล้ว ยังมีพอลิเมอร์ประเภทอื่น ๆ อีก ยกตัวอย่างเช่น อีพอกซี ซึ่งมีราคาสูงกว่าพอลิเอสเทอร์หรือไวนิลเอสเทอร์ แต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและสามารถทนต่อความชื้นได้ดีกว่า หรือพอลิไอไมด์เรซิน (Polyimide resin) ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงถูกนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง (ถึง 230 °C) หรือพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether etherketone, PEEK) พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphynylene sulphide, PPS) พอลิอีเทอร์ไอไมด์ (Polyetherimide, PEI) ซึ่งมีศักยภาพที่จะประยุกต์ใช้เป็นยานอวกาศในอนาคต

#### (1) Glass fibre-reinforced polymer (GFRP) composites

ตัวอย่างของ PMCs ที่มีการใช้งานมากคือ Glass fibre-reinforced polymer (GFRP) composite โดยเส้นใยแก้วที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-20 ไมโครเมตร วัสดุที่ได้มีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังเฉื่อย (Inert) ทำให้สามารถใช้งานในสภาวะกัดกร่อนได้ ข้อจำกัดของวัสดุนี้คือ มีค่า rigidity ไม่สูง และใช้งานได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ใช้พอลิเมอร์ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง เช่น พอลิไอไมด์เรซิน (Polyimide resin) เป็นเมทริกซ์ จะสามารถใช้งานได้ถึง 300 องศาเซลเซียส การประยุกต์ใช้งาน PMCs เช่นตัวถังรถยนต์และเรือค้ำน้ำ พื้นในโรงงานอุตสาหกรรม storage container เป็นต้น

#### (2) Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites

Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites เป็น PMCs อีกประเภทหนึ่งที่ใช้กันมาก เส้นใยคาร์บอนที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-10  $\mu\text{m}$  และประกอบด้วยบริเวณที่มีเฟสเป็น กราไฟต์และบริเวณที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งมีผลต่อค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ของเส้นใย เส้นใยคาร์บอนนี้สามารถแบ่งประเภทตามค่ามอดูลัสได้เป็นสี่ประเภทคือ เส้นใยคาร์บอนที่มีค่ามอดูลัสมาตรฐาน ค่ามอดูลัสปานกลาง ค่ามอดูลัสสูง และค่ามอดูลัสสูงมาก เส้นใยคาร์บอนมีข้อดีคือ เป็นวัสดุไฟเบอร์ที่มีค่ามอดูลัสและความแข็งแรงสูงที่สุด สามารถคงค่า

มอดูลัสแรงดึงและความต้านทานแรงดึงได้ที่อุณหภูมิสูง มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง (ไม่ไวต่อความชื้นหรือตัวทำละลาย) มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดี ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่ดี นอกจากนี้ยังผลิตได้ง่ายและราคาไม่แพง ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน CFRP เช่น อุปกรณ์กีฬาและสันทนาการ filament-wound rocket motor cases ชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องบินทั้ง เครื่องบินการค้า และเครื่องบินทางการทหาร เป็นต้น

### (3) Aramid fibre-reinforced polymer composites

พอลิพาราฟีนีลีน เทเรพธาลาไมด์ (Polyparaphenylene terephthalamide) หรือที่นิยมเรียกว่า อะรามิด (Aramid) ประกอบด้วยหมู่เอไมด์ amide ( $-C(=O)NH-$ ) เรียงต่อกัน เส้นใยอะรามิดมีสมบัติที่ดีคือมีค่าความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใยสูง มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงมาก มีความเหนียวที่ดี ทนต่อการกระแทก การเกิดครีพ และความล้า นอกจากนี้ยังมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และสามารถคงสมบัติเชิงกลไว้ได้ที่อุณหภูมิช่วง  $-20$  ถึง  $200$  °C เพื่อต่อการทำปฏิกิริยากับสารละลายและสารเคมีต่าง ๆ (ยกเว้นกรดหรือเบสแก่) เส้นใยอะรามิดที่มีการผลิตทางการค้าได้แก่ Kevlar (Kevlar29, 49, 149 โดยบริษัท Dupont) หรือ Nomex เป็นต้น ตัวอย่างการใช้งานการอะรามิด ได้แก่ ยางรถยนต์ เชือก ใช้แทนแอสเบสทอส (Asbestos) ในเบรกรถยนต์และคลัทช์ อุปกรณ์กีฬา เสื้อกันกระสุน เป็นต้น

#### 2.2.5.2 Metal-Matrix Composites (MMCs)

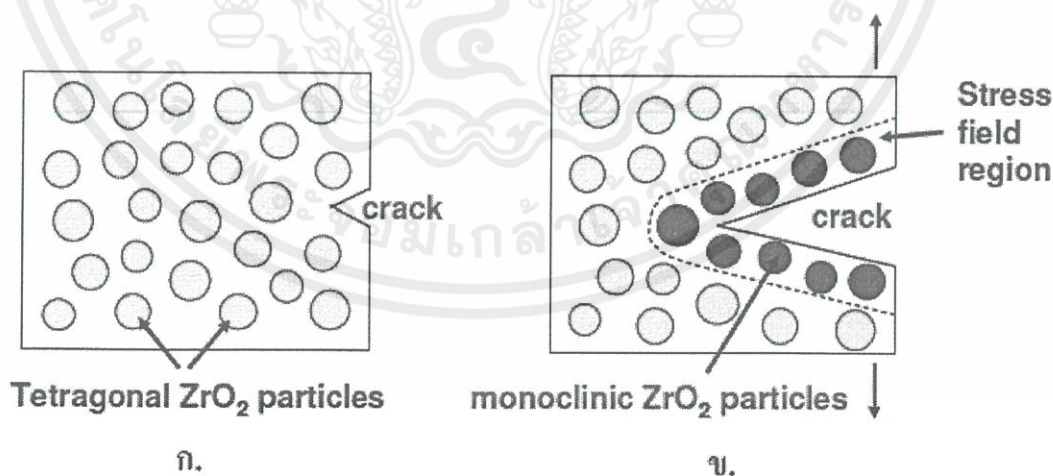
MMCs เป็นคอมโพสิตที่มีโลหะหรือโลหะผสมเป็นเมทริกซ์ ส่วนวัสดุที่ทำหน้าที่เสริมแรงนั้นสามารถเป็นได้ทั้งอนุภาค หรือเส้นใยทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ข้อดีของ MMCs ที่เหนือกว่า PMCs คือสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ แต่ว่ามีราคาแพง ดังนั้นมักถูกนำไปใช้ในงานเฉพาะที่ต้องการสมบัติเด่นทางด้านความแข็งแรงจำเพาะ ความแข็งตึงจำเพาะ ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานครีพ การนำความร้อน หรือความเสถียรของขนาด (Dimensional stability) เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน MMCs เช่น ใช้อลูมิเนียมอัลลอยเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเพื่อทำยานยนต์ หรือใช้อลูมิเนียมอัลลอยชั้นสูงเสริมแรงด้วยอนุภาค โบรอนเพื่อทำเป็นกระสวยอวกาศหรือยานอวกาศ เป็นต้น ซีเมนต์ (Cermet) หรือ Ceramic-metal composite คือ MMCs ที่มีเมทริกซ์โลหะน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิกจำพวกออกไซด์ โบไรด์ คาร์ไบด์ หรืออลูมินา ส่วนโลหะที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์อาจเป็นนิกเกิล โมลิบดีนัม หรือโคบอลต์ ยกตัวอย่าง ซีเมนต์ เช่น เมทริกซ์ของโคบอลต์หรือนิกเกิลที่ถูกเสริมแรงด้วยอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ หรือไทเทเนียมคาร์ไบด์ (อาจเติมมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ซึ่งวัสดุที่ได้มีความแข็งแรงมาก (รองจากเพชร) และสามารถทนความร้อนได้ดี ตัวอย่างการใช้งานของ

ซีเมนต์ได้แก่ ใช้ในกระบวนการผลิตตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ที่ต้องเจอสภาวะอุณหภูมิสูง

### 2.2.5.3 Ceramic-Matrix Composites (CMCs)

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเซรามิกสามารถทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่ข้อด้อยของเซรามิกคือมีค่าความทนทานต่อการแตกหักต่ำเมื่อเทียบกับโลหะ ดังนั้น เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นจึงนำมาทำเป็น CMCs ซึ่งการเสริมแรงสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุภาควิสเกอร์ หรือไฟเบอร์

ตัวอย่างหนึ่งของการทำเป็นชิ้นงาน CMCs เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้แก่ การเพิ่มความเหนียวโดยการเปลี่ยนเฟส ซึ่งใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนเฟสของอนุภาคเซอร์โคเนียในการยับยั้งการแตก โดยปกติแล้วเซอร์โคเนียจะมีเฟสเป็น โมโนคลินิกที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อทำการเติมอนุภาคของสารประกอบ  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{CeO}$  จะทำให้เกิดเป็น partially-stabilized zirconia (PSZ) ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลที่อุณหภูมิห้องเซรามิกที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์อาจเป็นอลูมินาหรือเซอร์โคเนีย ส่วนอนุภาคที่เสริมแรงจะเป็น PSZ โดยอนุภาค PSZ จะกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) ถ้าชิ้นงานคอมโพสิตนี้ได้รับแรงกระทำแบบดึงและทำให้เกิดรอยแตก (Crack) ในชิ้นงาน รอยแตกนี้จะค่อย ๆ โตขึ้น (Propagate) แต่เมื่อไปโดนอนุภาค PSZ อนุภาคเหล่านั้นจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากเตตระโกนอลไปเป็น โมโนคลินิก ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นและทำให้เกิดเป็นบริเวณที่มีความเค้นในชิ้นงาน และช่วยยับยั้งรอยแตกไม่ให้โตขึ้นอีก ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข)



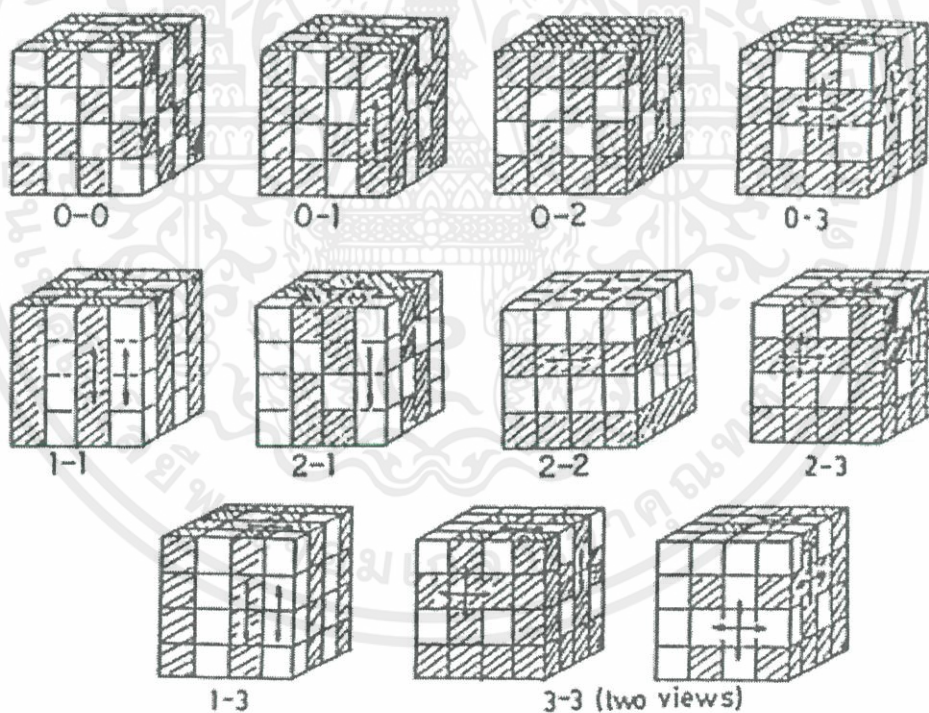
รูปที่ 2.4 การเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงานด้วยอนุภาค PSZ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า นอกจากนี้การเสริมแรงด้วยอนุภาคแล้ว การเสริมแรงด้วยวิสเกอร์ก็สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวของ CMCs ได้เช่นเดียวกัน กระบวนการที่วิสเกอร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรง

หรือความเหนียวเป็นได้ทั้งการช่วยเปลี่ยนทิศทางของรอยแตก ทำหน้าที่เป็นสะพานข้ามรอยแตก หรือช่วยกระจายความเค้นให้สม่ำเสมอบริเวณรอยแตก

### 2.2.6 การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในคอมโพสิต [2]

ในการเลือกเฟสของวัสดุคอมโพสิตแต่ละเฟส เพื่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน หรือสมบัติทางไฟฟ้า สัมพันธ์กับปริมาณ และรูปแบบการเรียงติดกันของแต่ละเฟส แนวความคิดของการเรียงติดกันถูกนำมาใช้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต โดย Newnham การเรียงติดกันอธิบายรูปแบบของแต่ละเฟสในวัสดุคอมโพสิต หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสที่มีการเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟสนั้น สามารถจัดเรียงติดกันได้ 10 แบบ คือ 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3 และ 3-3 ดังรูปที่ 2.5 โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริก ส่วนเลขตัวหลังจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริก



รูปที่ 2.5 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่าง ๆ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบง่ายที่สุดคือ 0-3 ซึ่งประกอบด้วยผสมเซรามิกกระจายอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer matrix) การเรียงติดกันแบบ 0-3 คือ เซรามิกเชื่อมต่อกันใน 3 มิติ และ

มีพอลิเมอร์บรรจุในรูพรุนในเนื้อเซรามิก อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะมีการเรียงติดกันแบบใดแบบหนึ่งล้วน ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนวิธีการเตรียม

พอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous structure) ส่วนเซรามิกมีโครงสร้างผลึก ทำให้วัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 มีเฟสที่ผลึก กระจายอยู่ในเมทริกซ์อสัณฐาน ข้อเด่นที่สำคัญมากของวัสดุคอมโพสิตนี้คือ การขึ้นรูปเป็นรูปร่างแบบต่าง ๆ ได้ง่าย เช่น การทำเป็นแผ่นบาง การทำเป็นแบบเส้นใย เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นโซนาร์และไฮโดรโฟน

วัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะการเรียงติดกันแบบ 0-3 เป็นวัสดุที่สามารถเตรียมได้ง่ายและสะดวกที่สุดใน 10 รูปแบบ โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเซรามิก (Volume fraction of ceramic,  $\phi$ ) กับพอลิเมอร์ แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$m_c = m_p \times \frac{\rho_c}{\rho_p} \times \frac{\phi}{1-\phi} \quad (2.3)$$

โดยที่  $m_c$  คือ มวลของเซรามิก

$m_p$  คือ มวลของพอลิเมอร์

$\rho_c$  คือ ความหนาแน่นของเซรามิก ( $\text{BaTiO}_3$  6.08 g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (PVDF 1.78 g/cm<sup>3</sup>)

$\phi$  คือ สัดส่วนของเซรามิก

ความหนาแน่นของคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเซรามิกและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ดังสมการ

$$\rho = \phi\rho_c + (1-\phi)\rho_p \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\rho_c$  คือ ความหนาแน่นของคอมโพสิต

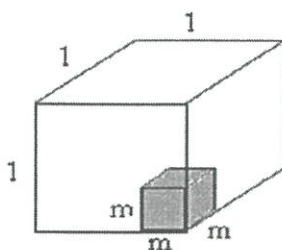
ทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.4) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนของคอมโพสิตกับความจุความร้อนของเซรามิกและพอลิเมอร์ดังสมการ

$$C = \phi C_c + (1-\phi)C_p \quad (2.5)$$

เมื่อ  $C$ ,  $C_c$  และ  $C_p$  คือ ความจุความร้อนของคอมโพสิต, เซรามิกและพอลิเมอร์ ตามลำดับ

แบบจำลองของเพาเออร์ (Pauer model) เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายลักษณะของ 0-3 คอมโพสิตที่มีสัดส่วนเซรามิกน้อย ๆ แสดงดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของเพาเออร์ 0-3 คอมโพสิต [3]

ในแบบจำลองนี้ หนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิตจะถูกบรรจุด้วยหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เล็ก ๆ ของเซรามิกที่มีความยาวด้านละ  $m$  ซึ่งมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิต สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.6)

$$\phi = m^3 \quad (2.6)$$

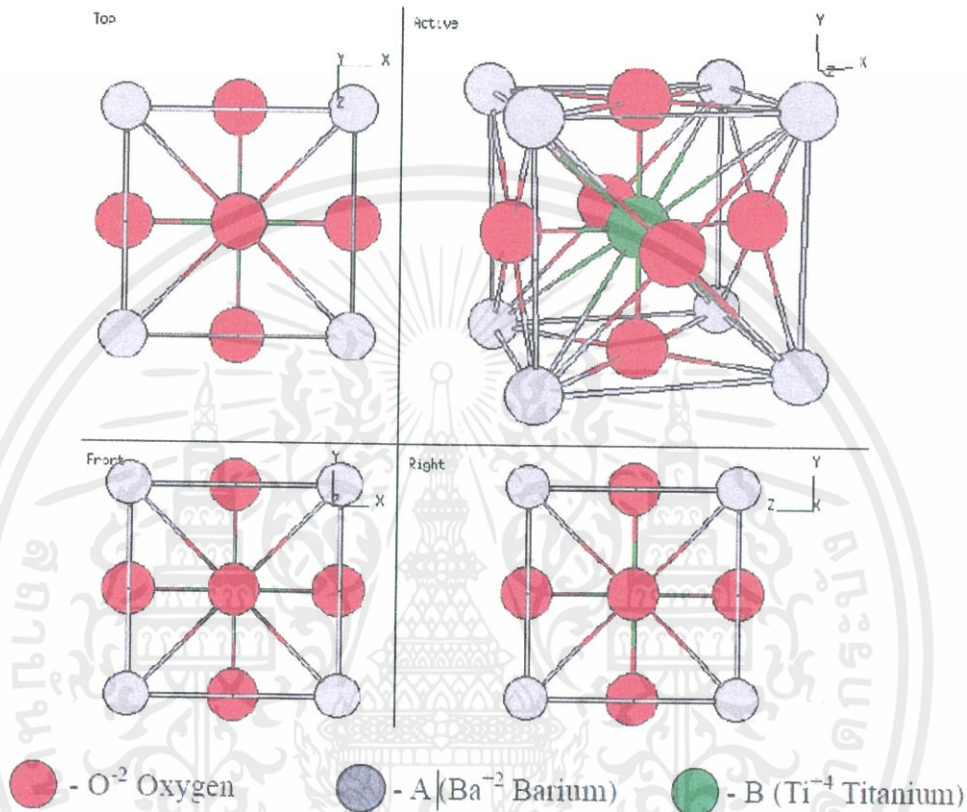
### 2.3 แบเรียมไททานเตต (Barium titanate; BaTiO<sub>3</sub>)

แบเรียมไททานเตต (Barium titanate) เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในนามวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) มีการค้นพบมาแล้วมากกว่า 60 ปีที่ผ่านมา โดยแบเรียมไททานเตตนั้นเป็นวัสดุเซรามิกที่ถูกใช้ในตัวเก็บประจุ (Capacitor) โดยในระยะแรกนั้นได้ทำการศึกษาไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และแบเรียมออกไซด์ (BaO) ซึ่งจะพบได้ตามธรรมชาติ และจะมีสมบัติไดอิเล็กทริก การผสมระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์ และ แบเรียมออกไซด์นั้น ถูกศึกษาโดย Thurnauer และ Deaderick ที่บริษัท American Lava ในปีคริสต์ศักราช 1941 [4] ซึ่งพบว่าสารที่ได้มีค่าไดอิเล็กทริกอยู่ที่ประมาณ 1000 ซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกมากกว่าเซรามิกที่เรารู้จักกันดี เช่น ไททานเนียมไดออกไซด์ประมาณ 10 เท่า ในเวลาต่อมา Wainer และ Solomon ในประเทศสหรัฐอเมริกา Ogawa และ Waku พร้อมทั้ง Wul และ Glodman [5] ได้ทำการศึกษาได้การศึกษาการผสมกันระหว่าง ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และแบเรียมออกไซด์ (BaO) อีกด้วย

ในปีคริสต์ศักราช 1945 และ 1946 โดย Von Hippel นักวิทยาศาสตร์รัสเซีย [6] นักวิทยาศาสตร์เหล่านี้ได้ทำการอธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกไว้ด้วย การค้นพบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อวงการเซรามิก โดยที่สามารถอธิบายเป็นครั้งแรกได้ว่า โครงสร้างของเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นประกอบไปด้วยวัสดุที่มีออกไซด์ พร้อมทั้งเกิดการรวมตัวกันด้วยซึ่งไม่ได้เกิดการรวมตัวกันของพันธะไฮโดรเจนเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 Goldschmidt ในปีคริสต์ศักราช 1926 [7] สำหรับการอธิบายรายละเอียดของโครงสร้างผลึกของแบเรียมไททานเตตในครั้งแรกถูกอธิบายโดย Helen D. Megaw ในปีคริสต์ศักราช 1945 ที่

อังกฤษ พบว่าโครงสร้างผลึกของแบเรียมไททานเนตมีเฟสของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง จากนั้นได้มีการศึกษาชิ้นส่วนของผลึกที่ถูกต้องโดย Miyake และ Ueda ในปีคริสต์ศักราช 1946 [8] ดังแสดงไว้ในรูป 2.7 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างผลึกแบเรียมไททานเนต



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างผลึกแบเรียมไททานเนต [9]

การค้นพบในครั้งแรกนั้นพบว่าแบเรียมไททานเนตมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่ไม่พบว่ามีสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) อย่างไรก็ตามในปีคริสต์ศักราช 1947 S.Roberts [10] ได้มีการค้นพบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของแบเรียมไททานเนตต่อเข้ากับไฟฟ้าแรงสูงต่อเข้ากระแสตรง ในปีคริสต์ศักราช 1950 W.P.Mason ได้ทำการศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกอีกครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงยุคของอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุใหม่ที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ต่ำ จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับวงจรไฟฟ้าที่มีความถี่สูง รวมถึงค่าความต่างศักย์สูง ซึ่งสารประกอบสเดียมไทด์ (Magnesium aluminium silicate) เข้ามาแทนที่เฟอร์โรอิเล็กทริกสำหรับการใช้เป็นฉนวน วัสดุนี้นั้นเหมาะแก่การใช้เป็นตัวเก็บประจุ คือ ไททานเนียมไดออกไซด์ ในรูปแบบแผ่นกลมและแบบท่อ หลังจากนั้นหลายปีมีความต้องการใช้สารที่คงค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) สูงด้วย ดังนั้นแบเรียมไททานเนตจึงเป็นคู่แข่งที่ดี เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าไททานเนียมไดออกไซด์ เพียงยังอยู่

ในช่วงอุณหภูมิและความถี่ที่แคบ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันแบเรียมไททานเนตส่วนใหญ่ใช้ในการเก็บประจุ ทั้งในรูปแบบการเก็บประจุแบบแผ่นกลมและมัลติเลเยอร์เซรามิก หรือ MLCC ซึ่งแบเรียมไททานเนตถูกใช้เป็นสื่อไฟฟ้าของวัสดุเซรามิก ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) สำหรับ ไมโครโฟน และอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณ (Transducer) เป็นต้น โดยค่าโพลาไรซ์ธรรมชาติของแบเรียมไททานเนตมีค่าประมาณ 0.15 คูลอมต่อตารางเมตรที่อุณหภูมิห้อง และสมบัติของแบเรียมไททานเนตดังแสดงในตารางที่ 2.1

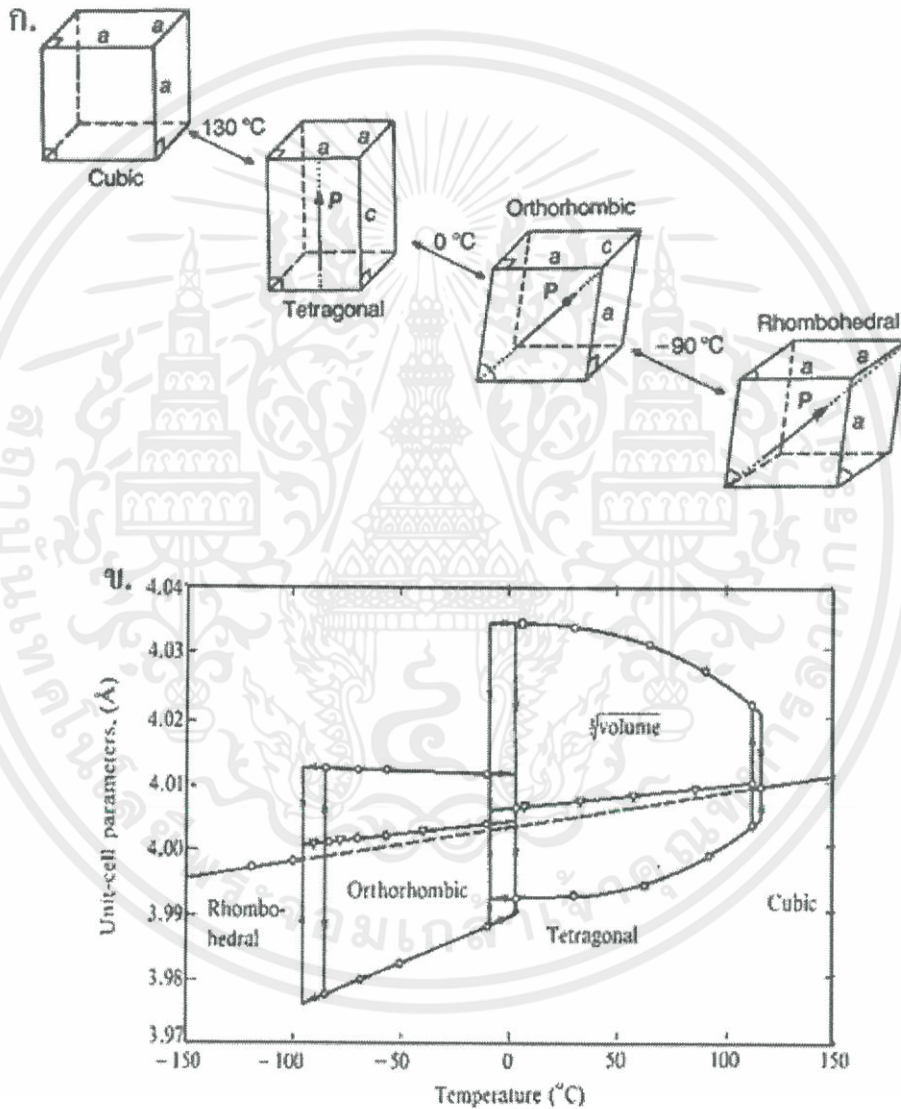
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของแบเรียมไททานเนต [11]

สมบัติ	
สูตร โมเลกุล	BaTiO <sub>3</sub>
มวล โมเลกุล	224.192 กรัมต่อ โมล
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีขาว
ความหนาแน่น	6.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1625 องศาเซลเซียส
การละลายในน้ำ	ไม่ละลาย
ความสามารถในการละลาย	ละลายในสารละลายกำมะถัน และกรดไฮโดรฟลูออริก

ประเภทของโครงสร้างผลึกรูปแบบต่าง ๆ ของแบเรียมไททานเนต (BaTiO<sub>3</sub>) แบเรียมไททานเนต มีโครงสร้างผลึกพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบ คือ 1. โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) จะขึ้นกับอุณหภูมิ 2. โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Non-Ferroelectric Hexagonal) นี้ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเสถียรที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1460 °C และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้องได้ดีอีกด้วย โดยปกติแล้วการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สร้างขึ้นใหม่ไปเป็นลูกบาศก์โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์นั้นจะเกิดได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1460 °C รูปร่างลูกบาศก์จะถูกนำมาใช้ในการผลิตเซรามิก

เอกสารนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงเฟสในเซรามิกแบเรียมไททานเนต การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ส่วนโครงสร้างผลึกของสาร BaTiO<sub>3</sub> ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอุณหภูมิคูรี (T<sub>c</sub>) ลงมานั้น จะเกิดการบิดเบี้ยว ไปเป็นเฟสเตตระโกนอล โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน c

จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาถึงที่อุณหภูมิประมาณ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  จึงเปลี่ยนจากเฟสเตตระโกนอลไปเป็นเฟสออร์ทอโรมบิก และที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  ก็จะเปลี่ยนจากเฟสออร์ทอโรมบิกไปเป็นเฟส ромโบฮีดรอล ตามลำดับ ดังแผนภาพแสดงในรูป 2.8 (ก) ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสาร  $\text{BaTiO}_3$  ตามอุณหภูมิดังที่กล่าวมานี้จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าที่มีขั้วในตัวเอง (Spontaneous polarization) ดังแสดงในรูป 2.8 (ข)



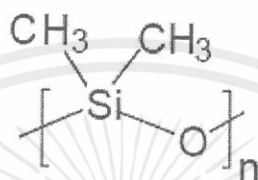
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททานेट ( $\text{BaTiO}_3$ ) (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึก

ของแบเรียมไททานेट (ข) แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททานेटในแต่ละอุณหภูมิ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane ; PDMS)

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกใช้ในยางซิลิกอน สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับเป็นฉนวนกันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่ใช้งานกลางแจ้ง โดยพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ประกอบด้วยสารอนินทรีย์เป็นแถบกลางที่มีซิลิกอน (Silicon) และออกซิเจน (Oxygen) สลับกัน มีหมู่เมทิล (Methyl) เกาะที่ตำแหน่งอะตอมซิลิกอนซึ่งเป็นโครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์ (รูป 2.9)



รูปที่ 2.9 หน่วยซ้ำของ PDMS [13]

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน มีสมบัติที่แสงทะลุผ่านได้ มีราคาถูก วัสดุพอลิไดเมทิลไซลอกเซน มีการใช้งานทั่วไปในการผ่าตัดศัลยกรรม และคอนแทกเลนส์ เมื่อแผ่นชิ้นส่วนหลักถูกสร้างขึ้นมาด้วยการรีนพอกสารประกอบซิลิโคนไปยังแม่พิมพ์ พิล์มโลหะจะถูกทำให้ระเหยไปเคลือบที่ผิวของแผ่นอีกชั้น เพราะสารประกอบชนิดนี้ไม่มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า จึงต้องมีการเพิ่มส่วนของโลหะเข้าไปเคลือบที่แผ่นสารประกอบเพื่อให้มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน [13]

สมบัติ	
สูตรโมเลกุล	$(\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi})_n$
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นของเหลวมัน ไม่มีสี
ความหนาแน่น	965 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
จุดหลอมเหลว	-49.9-40 องศาเซลเซียส
การละลายในน้ำ	ไม่ละลาย
ค่าโมดูลัสของยัง	360-870 KPa
ค่าการนำไฟฟ้า	$4 \times 10^{13} \Omega$
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	2.3-2.8
ค่าความแข็งแรงดึง	2.24 MPa

#### 2.4.1 สมบัติทางกลของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน เมื่อทำการเชื่อมโยงแล้ว (Cross-linked) จะมีลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้ ในสภาวะนี้พอลิเมอร์จะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเมื่ออยู่ภายใต้ความเค้น (Stress) หรือ ความเครียด (Strain) พอลิเมอร์จะกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อทำการปล่อยแรง สมบัติการยืดหยุ่น (Elastic) ของ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารเชื่อมโยง (Cross-linked agent) ที่อยู่ในพอลิเมอร์ เมื่อความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง (Cross-linked) สูงขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งมากขึ้น และเมื่อไม่มีหรือมีสารเชื่อมโยงน้อย พอลิเมอร์จะคงสภาพเป็นของเหลวหนืด เมื่อผ่านกระบวนการเชื่อมโยง (Curing process) จะเปลี่ยนพอลิไดเมทิลไซลอกเซน จากของเหลวไปเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้ (Elastic solid) พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ถูกใช้เป็นผนังสำหรับช่องทางระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic) และเป็นตัวสร้างพันธะระหว่างแผ่นซิลิกอน

#### 2.4.2 สมบัติทางเคมีของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยทั่วไปแล้วจัดเป็นสารเคมีประเภทเฉื่อย มีจุดเด่นคือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถซึมผ่านพื้นผิวได้ จากสมบัตินี้พอลิไดเมทิลไซลอกเซน จึงถูกนำไปพัฒนาใช้อย่างมากในระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic) แต่อย่างไรก็ตามตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ยังคงสามารถซึมผ่านพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนได้ จึงต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสม พอลิไดเมทิลไซลอกเซนยังถูกนำมาใช้มากขึ้นในกระบวนการสกัด (Extraction process) ได้อีกด้วย

#### 2.4.3 สมบัติทางแสงของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน เป็นวัสดุใสได้ในช่วงกว้างของความยาวคลื่น นอกจากนี้ เวลาที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงและอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการเชื่อมโยงสามารถกำหนดค่าดัชนีการหักเหแสง (Refractive index) ของชิ้นงานได้ เนื่องจากพอลิเมอร์สามารถขึ้นรูปได้ง่าย จึงถูกนำไปใช้เป็นเลนส์และกล้อง เช่นเดียวกัน ผลของค่าดัชนีการหักเหและสเปกตรัมการดูดซับของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน จะเปลี่ยนแปลงเมื่อสารอินทรีย์ถูกดูดซึมเข้าไปในพอลิเมอร์ จากสมบัตินี้จึงเป็นพื้นฐานที่นำไปใช้ในการทำเซ็นเซอร์นำแสงที่มีสารเคมีเป็นตัววัด (Sensor)

#### 2.4.4 สมบัติทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

พันธะของ Si-O จะมีขั้วที่แข็งแรงมาก (ซิลิโคนพอลิเมอร์ไม่มีขั้ว) เนื่องจากหมู่เมทิลที่เป็นกิ่งที่ป้องกันไม่ให้ขั้วของ Si-O อยู่ใกล้กันมากเกินไป ผลที่ได้จะทำให้มีแรงระหว่างโมเลกุลต่ำและส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแรงลอนดอน-แวนเดอร์วาลส์ (London-van der Waals interactions) แรงนี้จะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากลักษณะพิเศษของสายโซ่พอลิเมอร์

PDMS, ค่าความมีขั้วของโมเลกุล (Polarizability) จะทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของซิลิโคนที่สูงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene) ผลที่คาดไว้คือ ซิลิโคนพอลิเมอร์ร่วม (Silicone copolymers) ที่มีหมู่เมทิลเป็นหมู่แทนที่จะทำให้มีขั้วเพิ่มมากกว่า

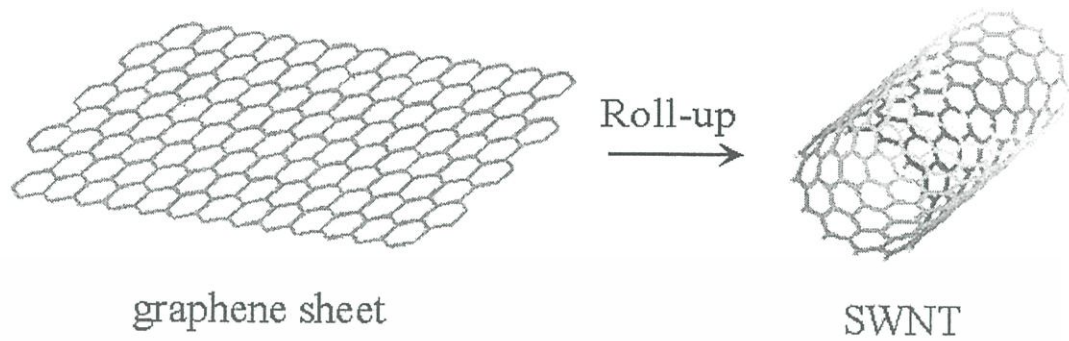
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน จะเพิ่มขึ้นด้วยค่าองศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization; DP) ของไซลอกเซนที่เป็นสายโซ่หลักได้อย่างรวดเร็ว ผลที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับ อัตราส่วนระหว่างไซลอกเซนและหมู่เมทิล (Siloxane-to-methyl-groups ratio) ซึ่งค่านี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในพอลิเมอร์ที่มีองศาการเกิดพอลิเมอร์น้อยที่สุด สำหรับพอลิเมอร์ที่มีค่าองศาการเกิดพอลิเมอร์สูงพบว่า การเติมเพียงหนึ่งหมู่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อตัวกลางเพียงเล็กน้อย

ในพอลิเมอร์อินทรีย์ส่วนใหญ่ พบว่าแรงดึงดูดที่แข็งแกร่งระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก สำหรับซิลิโคนแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular forces) มีค่าต่ำและไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ ดังนั้นความหนืด (Viscosity), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties), สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) และสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) อื่น ๆ จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) จะคล้ายกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าประกอบการสูญเสีย (Dissipation factor) ที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงความถี่กว้าง

## 2.5 แท่งนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube)

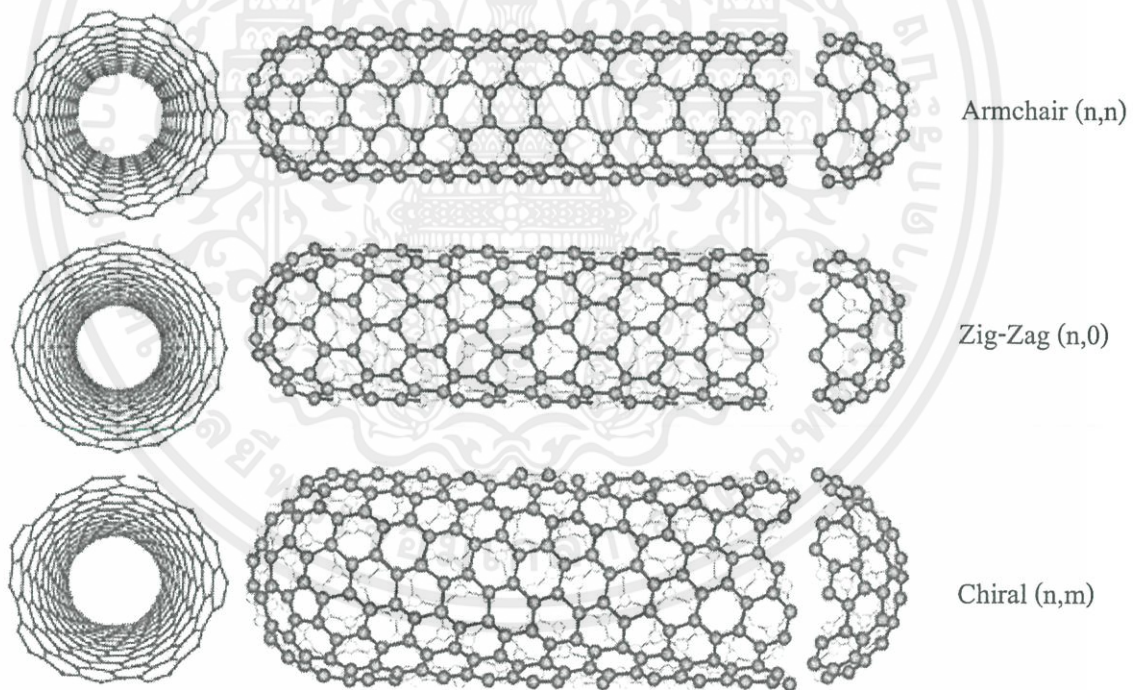
ท่อนาโนคาร์บอนจะประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็ก ๆ (โครงสร้างของอะตอมคาร์บอนจำนวน 6 อะตอมมาจัดเรียงตัวกันเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยม) จำนวนมากมายมาจัดเรียงตัวกันเป็นผนังท่อ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) [14] ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีลักษณะเหมือนกับแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นท่อแสดงดังรูปที่ 2.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนานาโนเมตร โดยอะตอมคาร์บอนเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันแบบ  $sp^2$  และสามารถแบ่งท่อนาโนคาร์บอนออกเป็นสองชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ลักษณะพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอน [15]

2.5.1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNTs) มีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



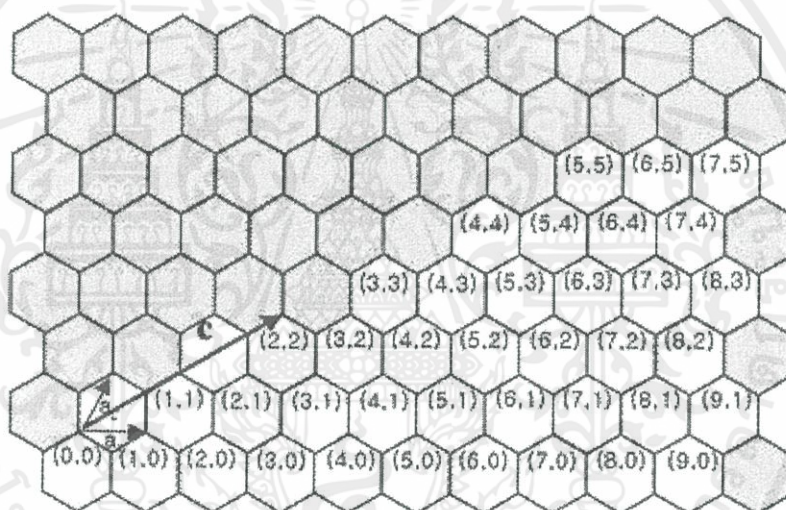
รูปที่ 2.11 รูปแบบ โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับศึกษาเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
โดยมีดัชนี  $(n, m)$  เป็นตัวบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนท่อนาโนคาร์บอน โดยกำหนดให้เวกเตอร์ผลัดพัทธ์ของผลรวมเวกเตอร์  $n + m$  คือ เส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ถ้า  $m = n$  จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Armchair  $(n,n)$  ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง  $(0,0)$  ไปพบกับตำแหน่ง  $(n,n)$  มีขนาดมุม  $\theta$  เท่ากับ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.13

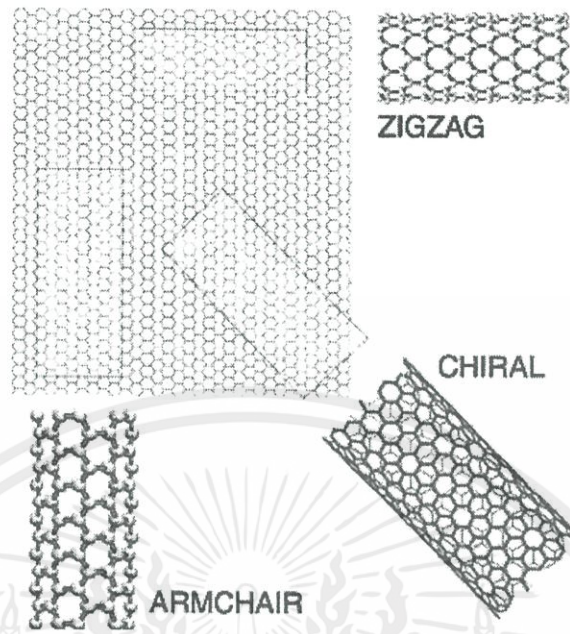
ถ้า  $m = 0$  จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Zig-zag  $(n,0)$  ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง  $(0,0)$  ไปพบกับตำแหน่ง  $(n,0)$  มีขนาดมุม  $\theta$  เท่ากับ 0 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.13

ถ้า  $m \neq n$  จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Chiral  $(n,m)$  ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง  $(0,0)$  ไปพบกับตำแหน่ง  $(n,m)$  มีขนาดมุม  $\theta$  เท่ากับ 0-30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.13



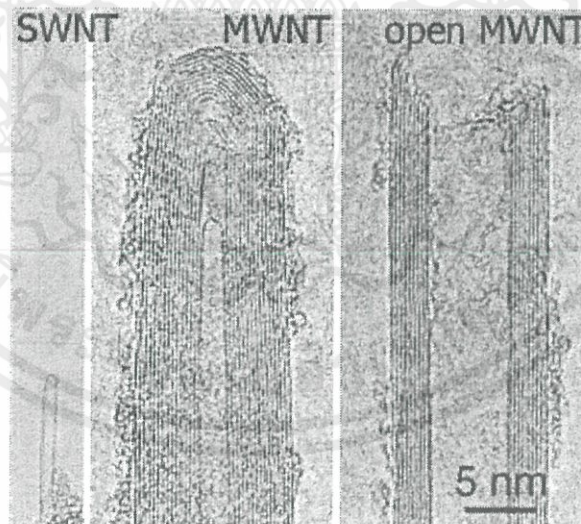
รูปที่ 2.12 คณิตบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่าง ๆ [18]

2.5.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNTs) คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันหลายชั้น ดังแสดงในรูป 2.14



ก

ข

ค

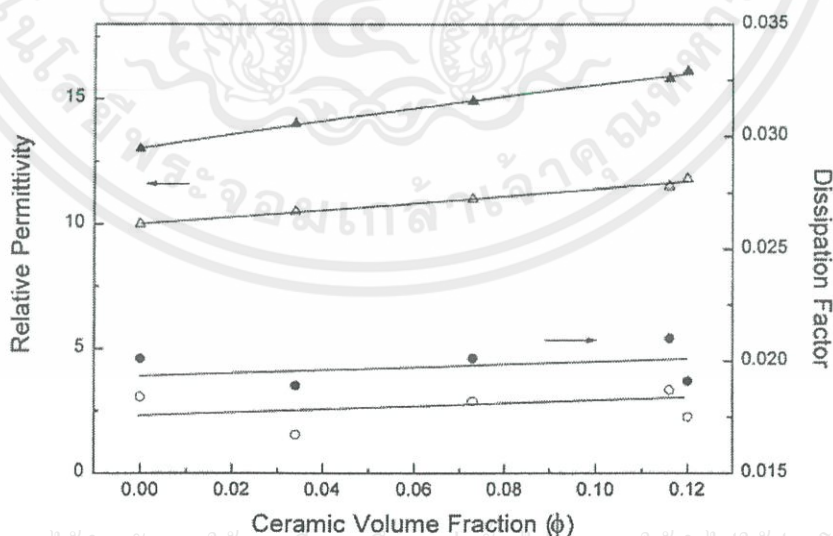
รูปที่ 2.14 ภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปิดและ (ค) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแบบท่อปลายเปิด

## 2.6 เอกสารที่เกี่ยวข้องงานวิจัย

ในปี 1991 เชดส์คี้ แซ่ลี [21] ได้เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT กับพอลิเอทิลีน โดยวิธีอัดรีดแผ่น (Calendaring method) แล้วอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดและผงเซรามิกเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) เเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการศึกษาสมบัติต่างๆ พบว่าวัสดุผสมที่เตรียมได้มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับปริมาณของ PZT สำหรับวัสดุผสมที่เติม PZT 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาณ สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) ได้ 14.5 pC/N และ 18.8 ตามลำดับ โดยที่ค่า  $d_{33}$  ของ PZT วัดได้ 173 pC/N และค่า  $\epsilon_r$  ของ PZT และพอลิเอทิลีน เท่ากับ 410 และ 4 ตามลำดับ

ในปี 1998 Chan และคณะ [22] เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่างเลดไทเทเนตเซรามิก (PbTiO<sub>3</sub> หรือ PT) และไวโนลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีน โคลพอลิเมอร์ ([P(VDF-TrFE)]) โดยเตรียมเลดไทเทเนตเตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล ทำให้ได้ผงเซรามิกที่มีขนาดเล็ก (Nanocrystalline powder) เเผาอบ (Annealing) ผงเซรามิกที่อุณหภูมิ 700 °C และเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ชนิดฟิล์มบางที่มีผงเซรามิกที่กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคฉาบแบบหมุน (Spin-coating technique) และได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สภาพยอม (Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าเมื่อปริมาณผงเซรามิกเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด **รูปที่ 2.15** ค่ายินยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) และการสูญเสียพลังงาน (dissipation factor) ของคอมโพสิตที่มีปริมาณต่าง ๆ กันของวัสดุผสมก่อนและหลังการโพลิง (Poling) [22]

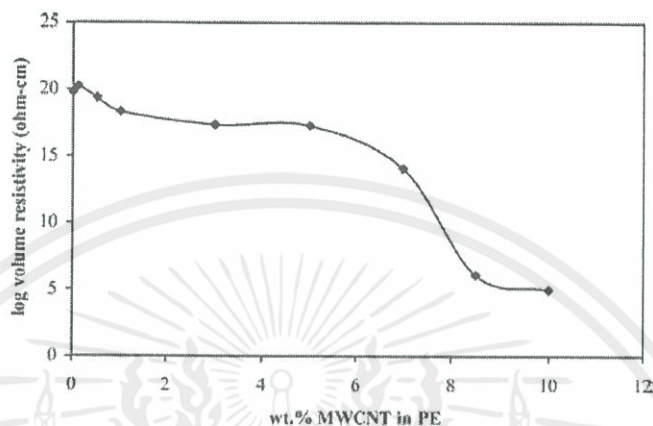
ในปี 2001 Ploss และคณะ [23] ศึกษาขั้นตอนการโพลของวัสดุผสมระหว่างสารเซรามิก PZT กับไวโนลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (P[VDF-TrFE]) โดยเตรียมคอมโพสิต ด้วยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลายแล้วตามด้วยเทคนิคการกดอัด จากการศึกษาพบว่า การโพลวัสดุผสมในแต่ละขั้นตอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม และการเพิ่มอุณหภูมิหรือการเพิ่มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลจะมีผลทำให้ค่า  $d_{33}$  ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณสารเซรามิก PZT เพิ่มขึ้นสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมดีขึ้น

ในปี 2002 Hilczer และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาการตอบสนองทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมนาโน  $Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O_3$ -PVDF ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 450 K ด้วยอัตรา 1K/min โดยใช้อนุภาคผง PZT ที่เตรียมจากระบวนการโซล-เจล พบว่า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุผสมมีค่าสูงซึ่งเป็นผลมาจากเฟสของเซรามิก แต่การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition) ของพอลิเมอร์และการผ่อนคลายทางไดอิเล็กทริก (Dielectric relaxation) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการขยับของกลุ่มโมเลกุลมีขั้ว โดยการหมุนของสายโซ่หลักของพอลิเมอร์นั้นเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม

ในปี 2005 Tony McNally และคณะ [25] ได้ศึกษาพอลิเอทิลีน (Polyethylene ; PE) กับท่อนาโนคาร์บอนหลายชั้น (Multiwalled carbon nanotubes ; MWCNTs) ด้วยน้ำหนักสัดส่วนตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 โดยน้ำหนัก % เตรียมได้จากการผสมกันโดยการหลอมเหลวโดยใช้เครื่องรีดแบบสกรูคู่ (Mini-twin screw extruder) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและระดับของการกระจายตัวของ MWCNTs ใน PE เมทริกซ์ที่ความยาวของ scales ที่แตกต่างกันจะถูกตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM), กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy;AFM) และ wide-angle X-ray diffraction (WAXD) ทั้งเอกลักษณ์และการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของ MWCNTs จะเห็นได้ชัดเจน การนำไฟฟ้าและพฤติกรรมวัสดุยืดหยุ่น (Viscoelastic) ของวัสดุนาโนคอมโพสิตจะถูกนำมาตรวจสอบ จะพบว่าที่ประมาณ 7.5 % โดยน้ำหนักจะเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาค (Percolation threshold ) และการนำไฟฟ้าของ PE จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ค่ามอดุลัสสะสมเทียบกับ ส่วนโค้งความถี่ (Frequency curves) ซึ่งเป็นส่วนโค้งสูง เหนือจุดเริ่มต้นของการสร้าง และความสัมพันธ์ภายในของโครงสร้างนาโนทิวป์ ซึ่งบ่งบอกพฤติกรรมของ pseudo-solid-like ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าการยืดของชิ้นงานที่จุดขาด (Elongation at break) ของวัสดุประกอบนาโนจะลดลงเมื่อเพิ่ม MWCNT การลดลงของคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโนแม้ว่าจะมาพร้อมกันกับการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในการนำไฟฟ้า กลไกการเสริมแรงเชิงกลสำหรับ วัสดุคอมโพสิต

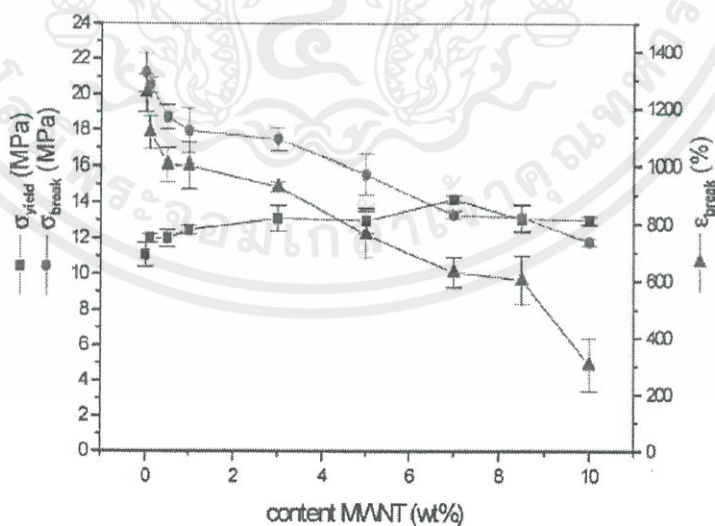
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PE/MWCNT คือแรงต้านระหว่างพื้นผิวของสารตัวเติมและไม่มีการซึมผ่านของสารตัวเติม อุณหภูมิของการเป็นผลึก ( $T_c$ ) และส่วนของ PE ที่เป็นผลึก ( $F_c$ ) มีการแก้ไขโดยการใช้ผสม MWCNTs อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PE ได้เพิ่มขึ้น 20 K เมื่อเติม MWCNT 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงในปริมาณความต้านทานที่มี MWCNT ในนาโนคอมโพสิต PE /MWCNT [25]

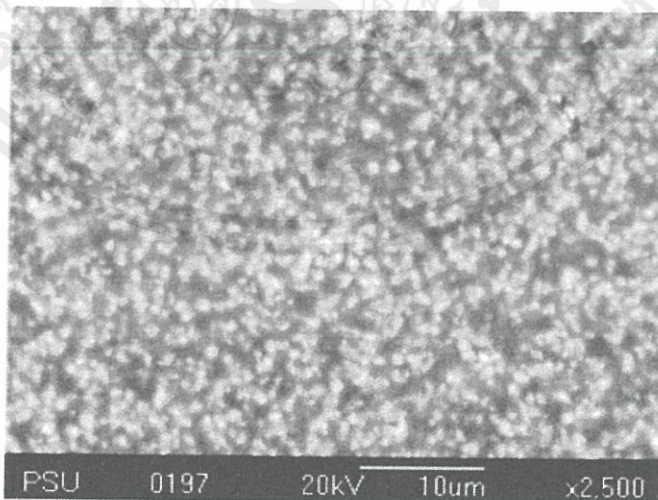
จะแสดงให้เห็นว่าปริมาณความต้านทาน (Volume resistivity) และการนำไฟฟ้า (Conductivity) มีการเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนน้ำหนักของ MWCNT ที่เติมใน PE เมทริกซ์ ซึ่งผลที่ได้คือ ปริมาณความต้านทาน (Volume resistivity) จะปรับตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWCNT ที่เติมใน PE เมทริกซ์



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.17 สมบัติเชิงกลของ PE และนาโนคอมโพสิตของ PE/MWCNT จะขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใส่ MWCNT ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น [25] จึงห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield stress) จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่ม MWCNT แต่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และค่าการยืดของชิ้นงานที่จุดขาด (Elongation at break) ทั้งสองค่าจะลดลงเมื่อเพิ่ม MWCNT ความเหนียว (Toughness) จะลดลงอย่างมากและการเพิ่ม MWCNTs ข้างต้น 0.1% โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้ตัวอย่างเปราะมากขึ้น

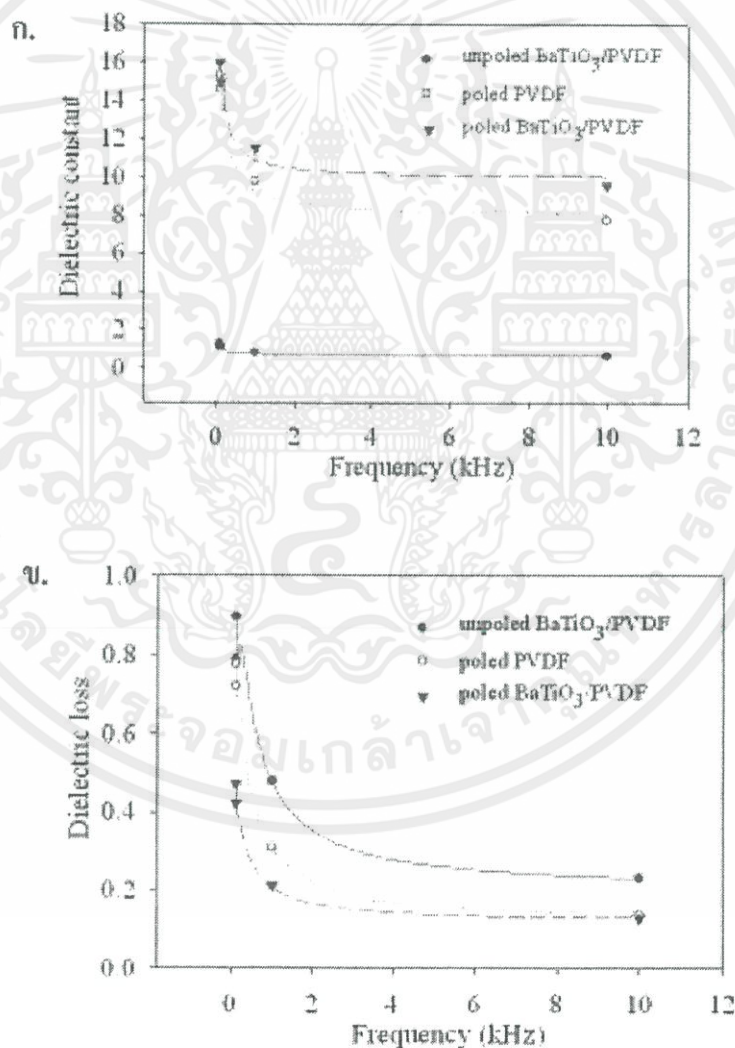
ในปี 2006 Hajeesaeh และคณะ[26]ได้ทำการวิจัย โดยงานวิจัยนี้ได้ขยายช่วงสมบัติวัสดุให้กว้างขึ้น โดยการเตรียมคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub>/PVDF เพื่อให้ได้คอมโพสิตแบบ 0-3 โดยไม่มีการติดกันของผงเซรามิก จึงใช้แบเรียมไททานเนต สกัดส่วนโดยปริมาณต่ำเท่ากับ 0.3 ใสในเมทริกพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) และกวนของผสมอย่างต่อเนื่อง ขึ้นรูปคอมโพสิตเป็นแผ่นด้วยวิธีการแบบเทป ตรวจสอบจุลโครงสร้างของคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่ามีการเรียงติดกันแบบ 0-3 เป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.18 จากนั้นนำแบบจำลองทางทฤษฎีและสมการมาใช้ในการศึกษาคอมโพสิตเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ผลการทดลองค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนเท่ากับ 3.21103 กก./ลบ.เมตร และ 3021.7 จูล/กก °C ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.3 คอมโพสิตได้ผ่านการโพลิงแบบโคโรนาก่อนการทดสอบการตอบสนองทางไดอิเล็กทริก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตที่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ณ อุณหภูมิห้อง เท่ากับ 11.5 และ 0.21 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.19 การเป็นไดอิเล็กทริกที่ดีและมีความสามารถในการคั่งอได้ของสาร ซึ่งให้เห็นว่าคอมโพสิตนี้น่าสนใจสำหรับประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการสิ่งประดิษฐ์น้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ผลิตง่ายและราคาข้อมเยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นสมควรใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น **รูปที่ 2.18** ภาพ SEM ของคอมโพสิต โดยสัดส่วนปริมาณเท่ากับ 0.3 [26] รรนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่น ค่าความจุความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub>/PVDF ที่ได้จากการคำนวณ [26]

Materials	Density at 25°C 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Heat capacity (J/kg°C)	Dielectric constant (at 1 kHz, 25°C )	Dielectric loss (at 1 kHz, 25°C )
Poled PVDF	1.901	2322.7	8.4 - 13.51	-
Poled BaTiO <sub>3</sub>	5.462	738.6	13012	-
Unpoled BaTiO <sub>3</sub> /PVDF	-	-	0.8	0.48
Poled PVDF	-	-	9.7	0.31
Poled BaTiO <sub>3</sub> /PVDF	3.21 (3.04)	3021.7 (1847.5)	11.5	0.21



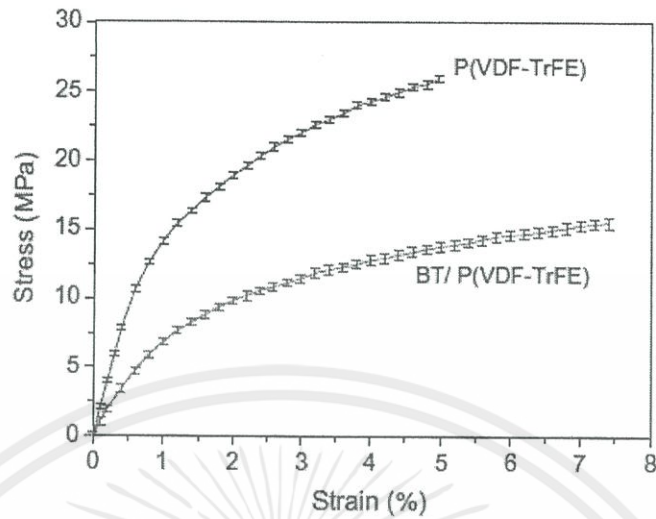
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.19 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (ข) ของคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub>/PVDF  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้  
ที่ 1 กิโลเฮิรต์ซ์ [26]

ต่อมา Liu และคณะ [56] ได้ศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพีแซดทีเซรามิกและพอลิไวนิลคลอไรด์ และเติมแกรไฟต์ในวัสดุคอมโพสิตโดยเตรียมวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคกดอัดร้อน (Hot-pressing) จากการศึกษา พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เติมแกรไฟต์โดยสัดส่วนของปริมาณ เท่ากับ 0.005 มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่ไม่เติมแกรไฟต์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

ในปี 2007 Chen และคณะ [27] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PZT กับพอลิเมออร์ชนิด Hydrogenated C5 aliphatic hydrocarbon tackifying resin โดยเตรียม PZT โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) และ PZT รูพรุนเตรียมโดยผสมผง PZT กับผงพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) และเตรียมวัสดุคอมโพสิตโดยวิธีแทรกซึมพอลิเมออร์เหลวเข้าไปในรูพรุนของ PZT จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณของ PZT เซรามิกลดลง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่า  $d_{33}$  ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่สัดส่วนโดยปริมาณของเซรามิกที่เท่ากัน วัสดุคอมโพสิตแผ่นแน่น (Sheet) มีความทนต่อการแตกหัก (Fracture strength) สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตรูพรุน พอลิเมออร์และวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุตรวจวัด (Sensors) และแอคชูเอเตอร์ (Actuators)

ในปี 2009 F. Fang และคณะ [28] ได้ศึกษาลักษณะพฤติกรรมการเสียรูปและการแตกหักภายใต้แรงดึงในทิศทางเดียว สำหรับคอมโพสิตแบบ 0-3 ของ  $BaTiO_3$ /poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) วัสดุผสมจะประกอบด้วยผง  $BaTiO_3$  จะแสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีความแข็งตึง (Stiffness) และความแข็งแรงหรือความเหนียวที่ด้านการแตกหักลดลง ดังรูปที่ 2.20 จะดำเนินการในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์สังเกตส่องกราด (SEM) และ การวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคด้วยแรงดึงแบบแกนเดียว ซึ่งสิ่งนี้จะแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณของผง  $BaTiO_3$  ขนาดเล็ก เข้าไปจะยับยั้งการเจริญเติบโตของขนาดผลึก ทำให้เกิดการลดลงของขนาดผลึกและรวมตัวกันแบบหลอมๆ ในโครงสร้างสายโซ่โม่เลกุล ดังนั้นคอมโพสิตความเครียดของการแตกหักจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งตึงและความแข็งแรงแตกหักลดลง

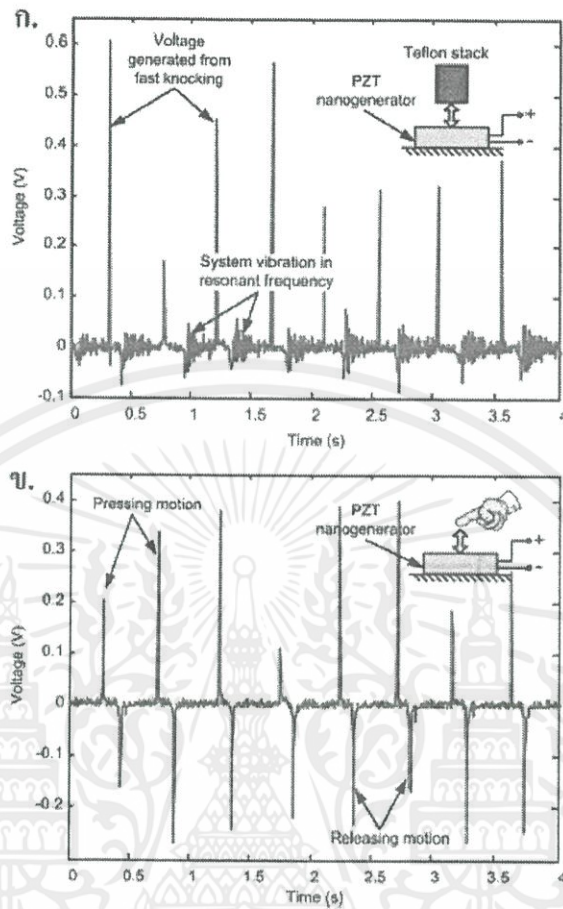
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



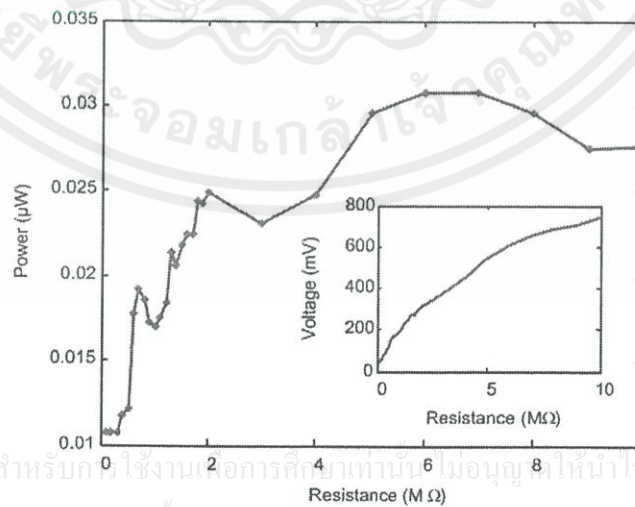
รูปที่ 2.20 กราฟ Stress-strain ของวัสดุคอมโพสิตและฟิล์มโคพอลิเมอร์จะอยู่ภายใต้การดึงยืดแนวเดียว [28]

ในปี 2010 Chen และคณะ [29] ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน (Nanogenerator) จากเส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกของ PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร จัดเรียงบนแพลตฟอร์มอินเตอร์ดิคิตอิเล็กโทรดบนแผ่นซิลิกอนจากนั้นเคลือบด้วยพอลิเมอร์ PDMS พบว่าเมื่อให้แรงเชิงกลกับวัสดุโดยใช้แท่งเทฟลอนกดลงไปบนแหล่งกำเนิดไฟฟ้า PZT จะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาถึง 600 mV ดังรูปที่ 2.21 ก และเมื่อเปลี่ยนแรงที่ให้โดยใช้นิ้วมือกด จะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.63 V (รูปที่ 2.21 ข) นอกจากนี้เมื่อให้ความต้านทานแก่วัด 6 MΩ พบว่าวัดค่ากำลังไฟฟ้าได้ถึง 0.3 μW แสดงดังรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



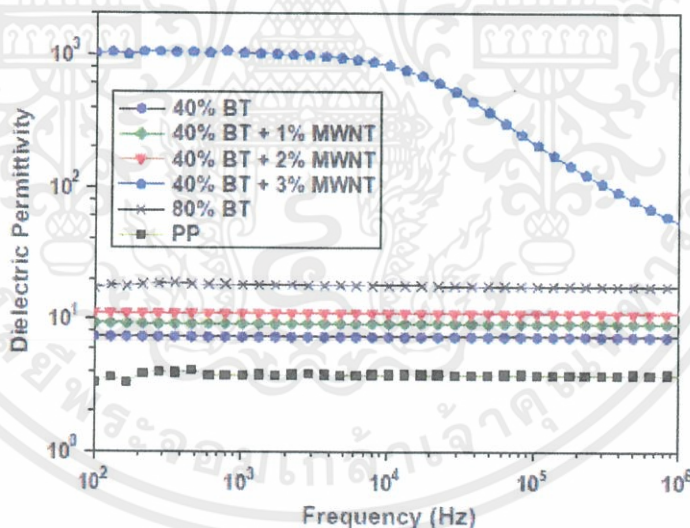
รูปที่ 2.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุ PZT เมื่อให้แรงเชิงกล โดยใช้ ก) แท่งเทฟลอน และ ข) นิ้วมือกดที่เวลาต่างกัน [29]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบทใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

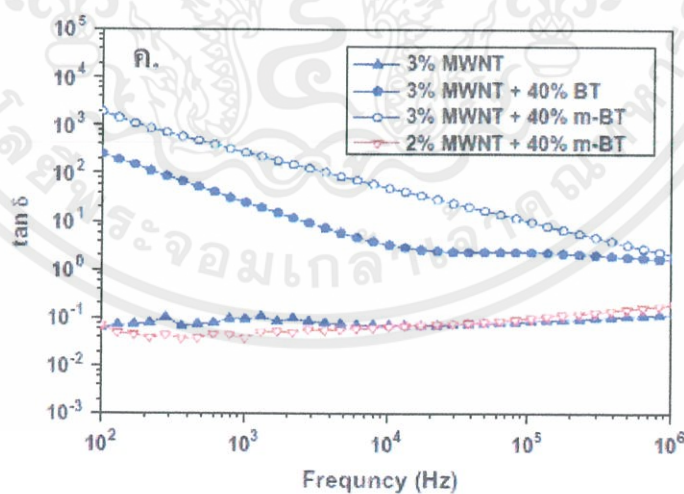
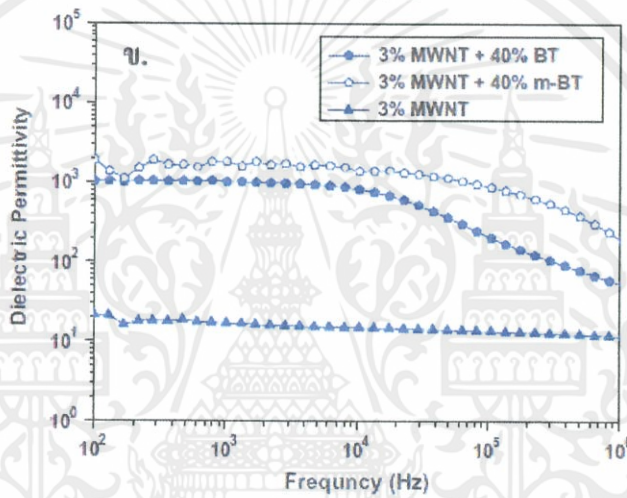
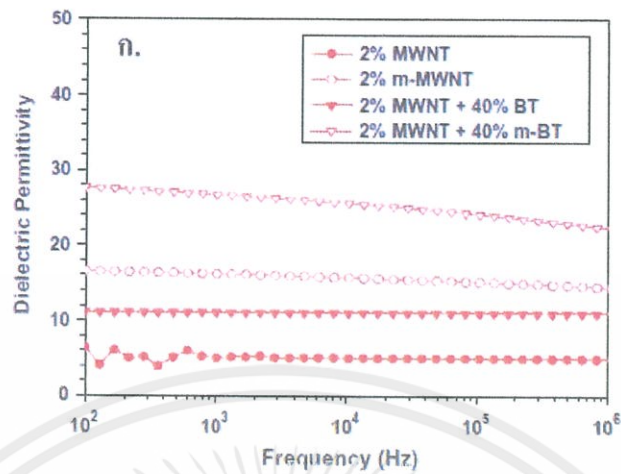
รูปที่ 2.22 ค่ากำลังไฟฟ้าของวัสดุ PZT ที่ความต้านทานต่างๆ [29]

ต่อมา Chang-Rong Yu และคณะ[30] ได้ทำการวิจัยนาโนคอมโพสิตโพลีโพรพิลีน (Polypropylene;PP) ถูกเตรียม โดยของผสมเหลวที่มีท่อนาโนคาร์บอนแบบที่เป็นผนังหลายชั้น (MWNT) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถนำไฟฟ้าได้และแบเรียมไททานเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ; BT) ที่เป็นอนุภาคของสารประกอบของเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) เพื่อให้พอลิโพรพิลีน สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยใส่ MWNT มากกว่า 3 wt.% การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของทั้ง MWNT หรือ BT จะมีไททานเนต ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นตัวเชื่อมสัมพันธ์เพิ่มเติม เพื่อช่วยการนำไฟฟ้าของนาโนคอมโพสิตของ PP/MWNT/BT ที่น่าสนใจ โดยการเปลี่ยนปริมาณทั้ง MWNT และ BT ซึ่งที่ MWNT 2 wt.% ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก (Dielectric permittivity) ของนาโนคอมโพสิต PP ที่มี 40 wt.% m-BT มีค่าถึง  $28 \times 10^2$  Hz และที่สำคัญค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในระดับที่ต่ำ ซึ่งจะเพียงพอสำหรับคอมโพสิตที่จะนำไฟฟ้าได้ ยิ่งไปกว่านั้นการรวมตัวของ MWNT จะทำให้ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก (Dielectric permittivity) ของ คอมโพสิต PP/BT เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะต่ำ การปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กทริก ทำให้นาโนคอมโพสิตเป็นที่น่าสนใจในการใช้งาน



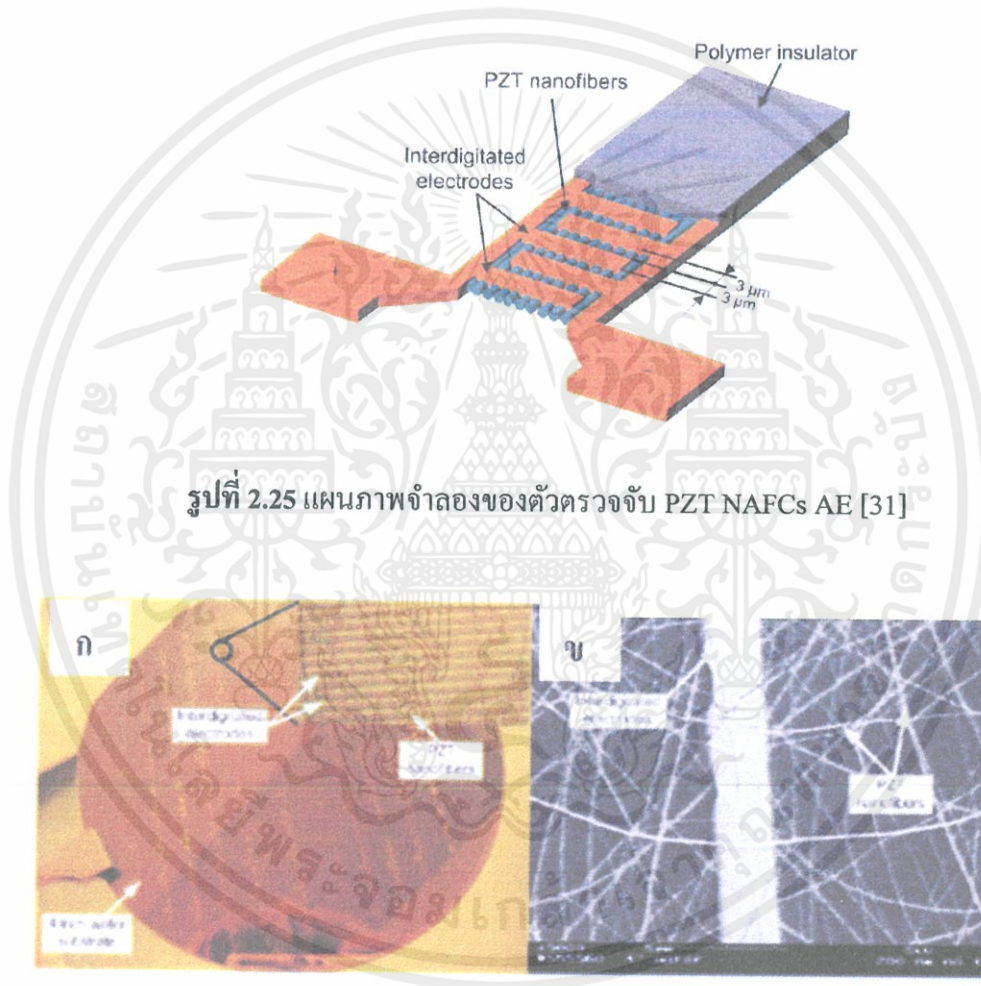
รูปที่ 2.23 ค่า Dielectric permittivity เมื่อเทียบกับความถี่ของคอมโพสิต PP/40 wt. % BT ที่ 0–3 wt.% MWNT [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 (ก. และ ข.) ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก และ (ค.) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อเทียบกับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความดีของ นาโนคอมโพสิต PP/MWNT ที่มีและไม่มี การใส่ของ 40 wt.% BT หรือ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป อนุภาค m-BT [30]

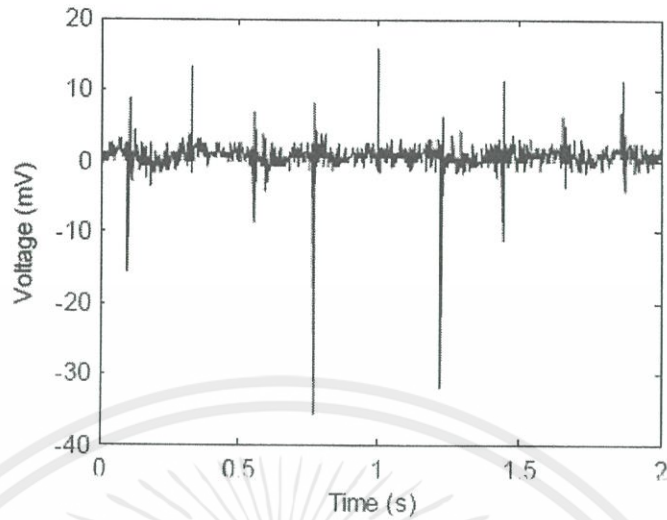
ในปี 2011 Chen และคณะ [31] ได้ทำการประดิษฐ์ เส้นใยนาโนคอมโพสิตที่สามารถสร้างพลังงานตัวเอง (Self-powered Nanoscale Active Fiber Composite; NAFC) ในการสร้างตัวตรวจจับที่มีความไวสูงบนพื้นฐานของการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก โดยการจัดเรียงเส้นใยนาโน PZT ขนาด 80 นาโนเมตร บนแผ่นซิลิกอน จากนั้นสร้างอินเทอร์ดิจิติลทรอบบนเส้นใยจากนั้นสปีนทับด้วยชั้นของพอลิเมอร์ PDMS ดังรูปที่ 2.25 และ 2.26 จากนั้นทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับเวลาพบว่าสามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้ออกมาได้ถึง 35 mV ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.25 แผนภาพจำลองของตัวตรวจจับ PZT NAFCs AE [31]

รูปที่ 2.26 เวฟฟอร์มของอินเทอร์ดิจิติลทรอบกับเส้นใย PZT ที่ได้จาก ก) กล้องแสง และ ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [31]

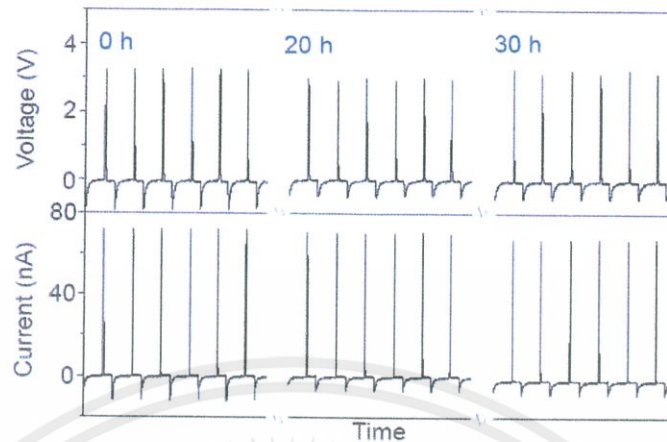
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 สัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวตรวจจับเทียบกับเวลา [31]

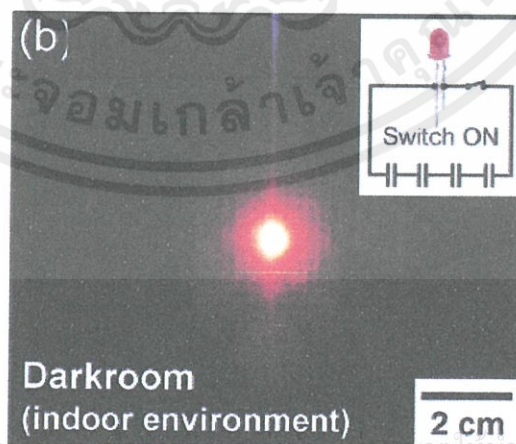
อย่างไรก็ตามในขณะที่ผลข้างต้นนี้เป็นที่โดดเด่น เรายังคงต้องการอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพการส่งออกของพลังงานที่สูงโดยใช้วัสดุเฟอโรอิเล็กทริกที่เตรียมได้ง่ายและไม่เป็นพิษ โดยในปี 2011 Jung และคณะ [32] ได้รายงานการประดิษฐ์วัสดุกำเนิดไฟฟ้าปลอดสารตะกั่วระดับนาโนที่มีความยืดหยุ่นและให้ประสิทธิภาพสูง โดยใช้ลวดนาโน (Nanowire) ของโซเดียมไนโอเบต (Sodium niobate;  $\text{NaNbO}_3$ ; NN) เตรียมเป็นคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ (Polydimethyl siloxane; PDMS) โดยทำการเตรียมลวดนาโน NN จากวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่อุณหภูมิต่ำและสามารถเห็นขนาดด้วยสนามไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าอุปกรณ์คอมโพสิตของลวดนาโน NN กับ PDMS พอลิเมอร์ ให้สัญญาณเพียงโซอิเล็กทริกที่สูงและมีความเสถียร ดังรูปที่ 2.28 โดยแสดงศักย์ไฟฟ้าออกมา 3.2 V และให้กระแส 72 nA (ความหนาแน่นกระแส 16  $\text{nA/cm}^2$ ) ภายใต้อุณหภูมิความเครียดกดอัด 0.23% ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าลวดนาโน NN อาจนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไร้สารตะกั่วในระดับที่ใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



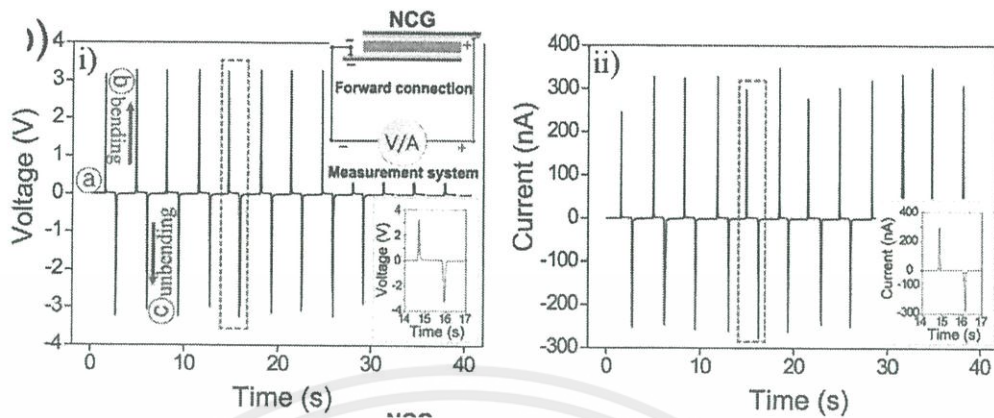
รูปที่ 2.28 เสถียรภาพของคอมโพสิตภายใต้ความเครียดกดอัด 0.23% เป็นเวลา 30 ชั่วโมงที่ความถี่ 0.33 Hz (ประมาณ 36000 รอบ) [32]

ในปี 2012 Park และคณะ [33] ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุกำเนิดพลังงานนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ง่าย ต้นทุนต่ำ และมีพื้นที่ผิวสูงได้จากอนุภาคนาโน BT ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ร่วมกับนาโนคาร์บอน โดยทำการกระจายตัวในพอลิเมอร์ PDMS ด้วยวิธีการปั่นกววนเชิงกลในการเตรียม เพื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์นาโนคอมโพสิต จากนั้นทำการสปินเคลือบบนแผ่นรองรับพลาสติกที่เคลือบด้วยโลหะ พบว่าภายใต้การเปลี่ยนแปลงเชิงกลจากภายนอกโดยการงอหรือจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์จากมือหรือเท้า จะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์ขึ้น และสามารถจ่ายให้กับหลอด LED ได้ดังรูปที่ 2.29 จากการบิดงอวัสดุอย่างต่อเนื่องพบว่าให้ศักย์ไฟฟ้าออกมา 3.2V และให้กระแส 250-350 nA แสดงในรูปที่ 2.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

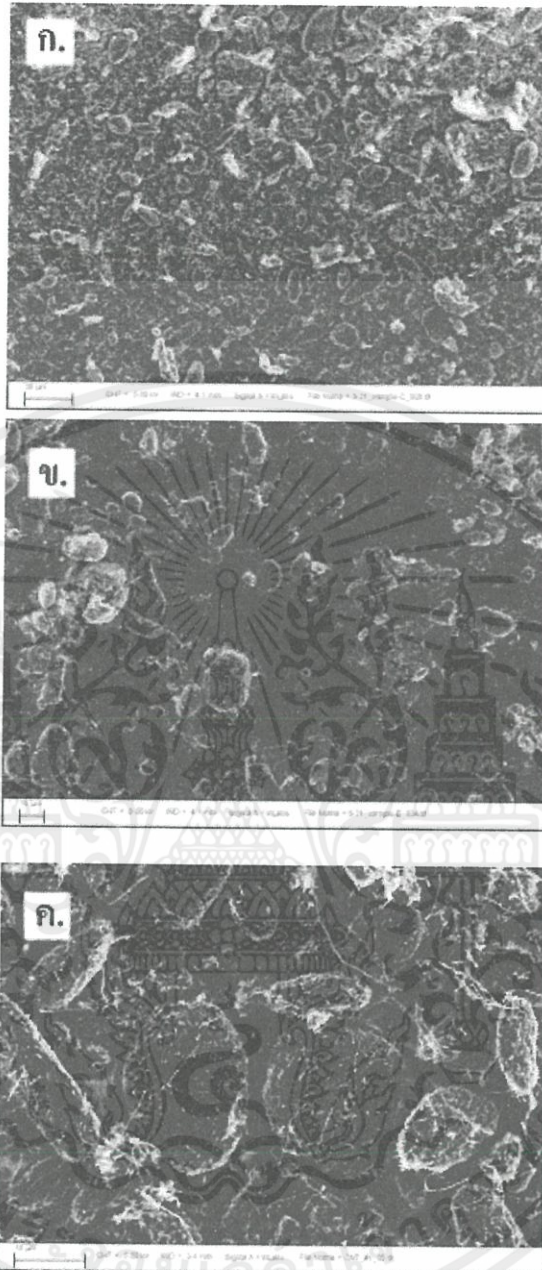
รูปที่ 2.29 ภาพจากกล้องดิจิทัลแสดงแสงจากหลอด LED ที่เปิดด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิต [33]



รูปที่ 2.30 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิตขณะทำการบิดงออย่างต่อเนื่อง [33]

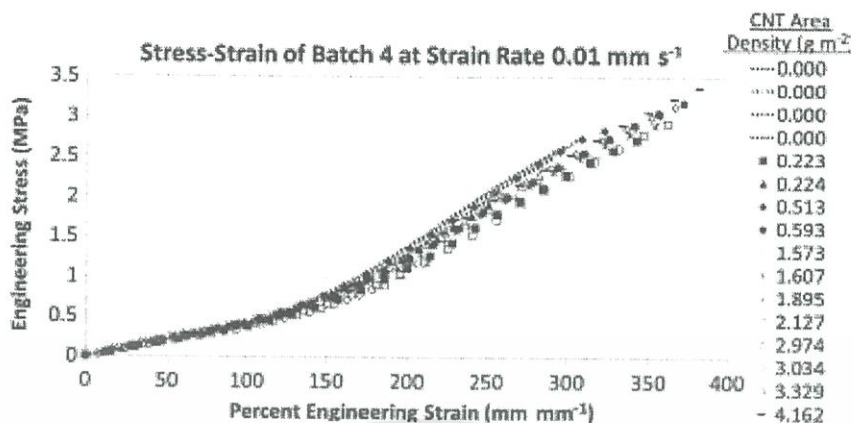
ต่อมา Jeffrey Salzbrenner และคณะวิจัย [34] ได้ทำการศึกษาผลกระทบทางไฟฟ้าและทางเชิงกลจากแผ่นบางๆของท่อนาโนคาร์บอนแบบที่เป็นผนังหลายชั้น (MWCNT) ที่อยู่บนพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) ซึ่งเป็นการสร้างแอคชูเอเตอร์ทางไฟฟ้า ชิ้นงานตัวอย่างของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีการเพิ่มของท่อนาโนคาร์บอนแบบที่เป็นผนังหลายชั้นถูกเตรียมและทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึงแบบแกนเดียวและนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Four-point Probe ซึ่งพบว่าจากการรวมกันของท่อนาโนคาร์บอนแบบที่เป็นผนังหลายชั้นบนพื้นผิวจะไม่เพียงมีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอย่างเดียว แต่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในด้านของประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โครงสร้างทางจุลภาพของท่อนาโนคาร์บอนแบบที่เป็นผนังหลายชั้นพบว่าประกอบด้วยเส้นใยทั้งแบบเส้นใยเดี่ยวๆ และเส้นใยแบบรวมเป็นกลุ่มก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



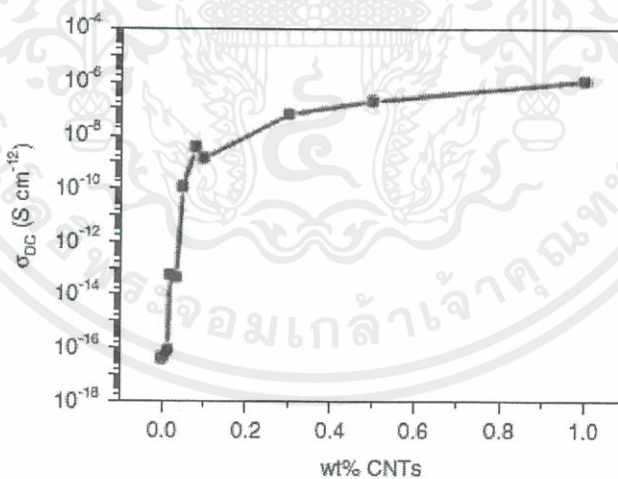
รูปที่ 2.31 ภาพ SEM ของ 2 ตัวอย่าง (ก) ตัวอย่างที่มีความหนาแน่น  $0.005413 \text{ kg m}^{-2}$  (ข) ตัวอย่างที่มีความหนาแน่น ตัวอย่างที่มีความหนาแน่น  $0.002941 \text{ kg m}^{-2}$  (ค) การรวมกันของ CNT เป็นกลุ่มก้อน [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 กราฟระหว่าง Stress – Strain ของตัวอย่าง PDMS/CNT และ PDMS บริสุทธิ์ [34]

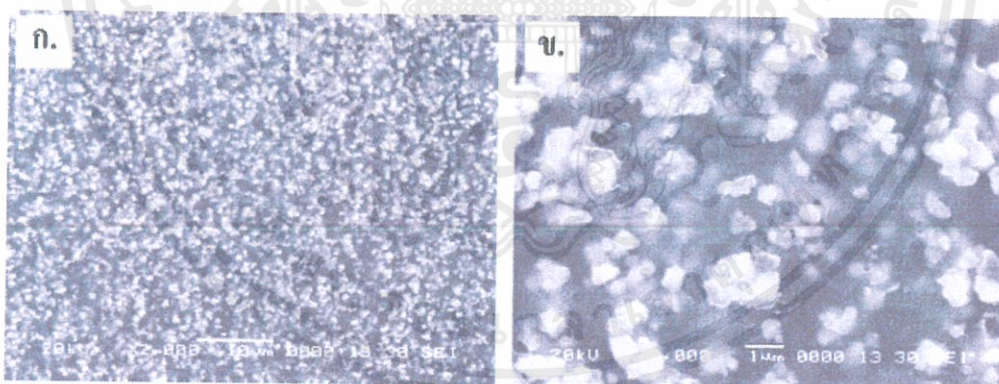
จากรูปที่ 2.32 แสดงการเพิ่มของปริมาณ CNT ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PDMS โดยพล็อตกราฟที่มีความหนาแน่นของวัสดุผสมตั้งแต่  $0.000 \text{ g m}^{-2}$  ถึง  $4.162 \text{ g m}^{-2}$  เห็นได้จากวัสดุผสม PDMS ที่บริสุทธิ์ มีความเค้นและความเครียดคล้ายคลึงกัน วัสดุผสมที่มีความเครียด จะเห็นได้จากการพล็อตในช่วงแรก จะมีความเค้นถึง 125% อย่างไรก็ตาม ที่ความเค้น 125 % ความแตกต่างของความเค้นและความเครียดจะมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในชั้นงาน การวัดการเปลี่ยนแปลงจะไม่สอดคล้องกับพื้นที่ใด ๆ โดยเฉพาะความหนาแน่น



รูปที่ 2.33 ค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT [34]

จากรูปที่ 2.33 จะเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาค (Percolation threshold) ของวัสดุผสม PDMS/CNT ที่ CNT ถูกเพิ่มเข้าไปในกลุ่มของ PDMS จากกราฟค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับ % โดยน้ำหนักของ CNT และว่าการเชื่อมโยงกันของอนุภาค (Percolation threshold) ที่ CNT 0.03% โดยน้ำหนักและสัดส่วนปริมาณวิกฤตที่ CNT 0.1 % โดยน้ำหนัก

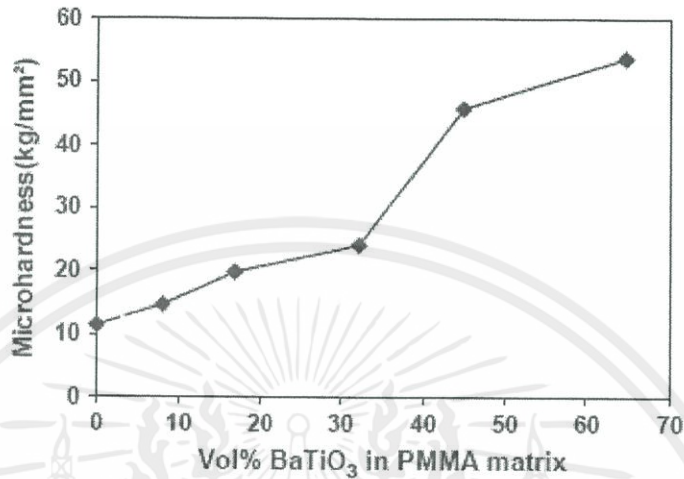
ต่อมา R.K. Goyal และคณะ[35] ได้วิจัยวัสดุผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate; PMMA) ที่ผสมกับ  $\text{BaTiO}_3$  เตรียมได้จากการทำเป็นสารละลายอย่างง่าย (Simple solution method) และตามด้วยการกดอัดด้วยความร้อน (hot pressing) โดยจะใช้ปริมาณ  $\text{BaTiO}_3$  ที่แตกต่างกันจาก 0-65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาณ ผลจากการส่อง SEM แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว และการยึดเกาะกันที่ดีของ  $\text{BaTiO}_3$  กับ PMMA ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของวัสดุคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จะพบการกระจายตัวที่ต่ำในค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม (มากกว่า 45% โดยปริมาณ) ที่มีความถี่ระหว่าง 100 Hz and 15 MHz ค่าประกอบการสูญเสีย (Dissipation Factor) ของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นจาก 0.021 ไปเป็น 0.029 สำหรับ PMMA บริสุทธิ์ที่เปลี่ยนเป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย  $\text{BaTiO}_3$  45% โดยปริมาณ แต่อย่างไรก็ตามวัสดุผสมที่เติม  $\text{BaTiO}_3$  65% โดยปริมาณ จะแสดงการกระจายตัวในค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อความถี่สูงขึ้น และเพิ่มค่าประกอบการสูญเสีย สมการ Lichtenecker (Lichtenecker equation) ใช้อธิบายได้ดีกับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ค่าความแข็งระดับจุลภาคของผิววัสดุ (Micro hardness) และค่าอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) ของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นประมาณ 4.7-fold และ  $42^\circ\text{C}$  ตามลำดับเมื่อเทียบกับ PMMA บริสุทธิ์ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of thermal expansion, CTE) ของวัสดุผสมที่ประกอบด้วย  $\text{BaTiO}_3$  65 % โดยปริมาณ จะมีค่าใกล้เคียงกับทองแดง (Copper)



รูปที่ 2.34 SEM ของ PMMA/ $\text{BaTiO}_3$  คอมโพสิตที่ปริมาณ  $\text{BaTiO}_3$  45 % (ก) กำลังขยายกล้องต่ำ (ข) กำลังขยายกล้องสูง [35]

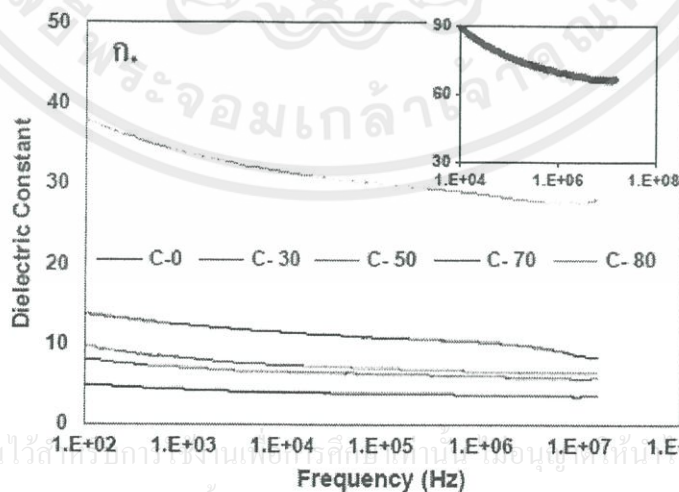
จากรูปที่ 2.34 จะแสดงให้เห็นภาพ SEM ของวัสดุผสม PMMA ที่มี BT ประมาณ 45 % ปริมาณจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาค BT กระจายอยู่ในเมทริกซ์ แต่บางครั้งพบว่า BT จะส่งผลทำให้เกิดช่องว่างและความหนาแน่นที่ได้จะต่ำกว่าความหนาแน่นในเชิงทฤษฎี ในการทำให้ BT กระจายตัวอยู่ใน PMMA เมทริกซ์ทำได้โดยการเคลือบด้วยการหมุนเหวี่ยงที่มีแรงเหวี่ยงสูง ไม่ว่าจะฉีกลงในอ่างน้ำร้อน หรือนำไปอบที่อุณหภูมิสูงๆ เพื่อให้ตัวแห้งและต้องล้างอ่างน้ำร้อนทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(High shear spin coating) และปรับปรุงอนุภาค BT ในเมทริกซ์ ซึ่งอาจส่งผลให้ความสามารถของ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างเมทริกซ์และอนุภาค BT ดีขึ้น

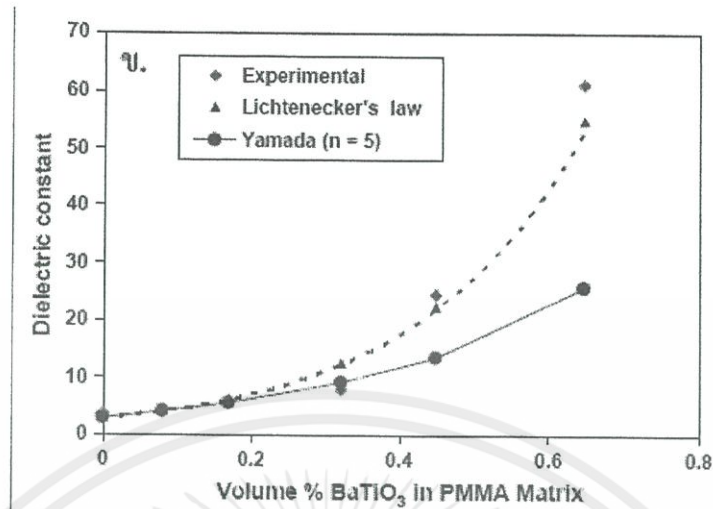


รูปที่ 2.35 การวัดความแข็งแบบไมโคร Vickers ของวัสดุผสม PMMA/BaTiO<sub>3</sub> [35]

จากรูปที่ 2.35 จะแสดงให้เห็นว่าค่าการวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ของวัสดุผสมจะ ขึ้นกับปริมาณของ BT ค่า การวัดความแข็งของวัสดุผสม จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วยการเพิ่มขึ้น ของปริมาณ BT ใน PMMA เมทริกซ์ ในกรณีของวัสดุผสม เนื่องจากความต้านทานในการเปลี่ยน รูปร่างของ PMMA เมทริกซ์จะมากขึ้นจากอนุภาค BT นอกจากนี้การปรับปรุงที่สำคัญของการ ความแข็งแรงที่พื้นผิว (Hardness) อาจเกิดจากการกระจายตัวที่ดีของผง BT ซึ่งมันจะมีการยึดติดที่ดี กับเมทริกซ์ PMMA ยืนยันได้จากภาพ SEM และความแข็งที่เพิ่มขึ้นของ BT (135 kg/mm<sup>2</sup>) ซึ่ง มากกว่า เมทริกซ์ PMMA บริสุทธิ์ (11.3 kg/mm<sup>2</sup>)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะขึ้นกับ (ก) ความถี่ (Frequency) (ข) ปริมาณ BT ใน PMMA เมทริกซ์ [35]

จากรูป 2.36(ก) และ 2.36(ข) จะแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของวัสดุผสม PMMA/BT จะขึ้นอยู่กับลอการิทึมของความถี่และปริมาณ BT ที่ใส่ตามลำดับ สามารถแสดงให้เห็นจากรูป 2.36(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของวัสดุผสมที่มีปริมาณ BT 45% ขึ้นไป จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เสถียรที่ความถี่ต่าง ๆ กันซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยอื่น ๆ รูป 2.36(ข) จะแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม ที่เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BT ใน PMMA เมทริกซ์ การที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเนื่องจากโพลาไรเซชันของ BT สูงกว่า ใน PMMA เมทริกซ์ของวัสดุผสมที่ยืดหยุ่นจะมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในงานวิจัย เนื่องจากการใช้งานที่มีศักยภาพในอุปกรณ์ไฟฟ้า

ในปี 2013 Subhan Salaeh และคณะวิจัย [36] จึงได้สังเคราะห์วัสดุผสมเซรามิก-พอลิเมอร์ จากแบเรียมไททาเนต ( $BaTiO_3$ ) กับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (ENR) อิทธิพลความเข้มข้นของ  $BaTiO_3$  ขึ้นอยู่กับลักษณะ แรงเชิงกล (แบบคงที่และแบบไดนามิก) ไดอิเล็กทริกและสมบัติทาง สัณฐานวิทยาของวัสดุผสมจะได้รับการตรวจสอบ ความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดที่ขาดจะ ลดลงเมื่อมีการใส่  $BaTiO_3$  เข้าไป ในขณะที่ค่าโมดูลัสการสะสมและค่าสภาพยอมจะเพิ่มขึ้น ส่วน สมบัติทางไฟฟ้าแบบไดนามิก ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม พบว่า จุดพิกัดที่ สูงสุดอยู่ในช่วงความถี่ที่ขยายได้ถึง 105 Hz สะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการผ่อนคลายของพอลิ เมอร์เมทริกซ์ การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์สัณฐานสูงกำลังขยาย (SEM) เพื่อยืนยัน โครงสร้างวัสดุผสมแบบ 0-3

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมา J. M. Martínez-Tarifa [37] และคณะได้ทำการวิจัย โดยการเตรียมวัสดุผสม HDPE ที่ผสมกับอนุภาคของ BaTiO<sub>3</sub> ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 nm โดยกระบวนการผสมด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball milling) พลังงานสูงและตามด้วยการอัดแบบร้อน (Hot pressing) โดยจะวัดค่าทางไฟฟ้าบางอย่าง เช่น ความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) และค่าความต้านทาน โดยได้ดำเนินการประเมินผลสมบัติทางไฟฟ้าของการใช้งานและปริมาณของอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> จึงถูกตั้งข้อสังเกตว่า ความต้านทานลดลงเมื่อปริมาณอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ความทนไดอิเล็กทริกจะลดลง เมื่อปริมาณอนุภาค BaTiO<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2.5 จนถูกตั้งข้อสังเกตว่า BaTiO<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น จะเกิดการล้มเหลวทางไดอิเล็กทริก (Dielectric failure) และการพังของไดอิเล็กทริก (Dielectric breakdown) จะน้อยกว่าปกติ

ตารางที่ 2.4 ความหนาและค่าความต้านทานของวัสดุผสม [37]

Sample	Thickness (μm)	Resistivity ×10 <sup>-13</sup> (Ω·cm)
HDPE-0BT	84	1.145
HDPE-1BT	66	0.937
HDPE-5BT	65	1.726
HDPE-10BT	71	0.710
HDPE-20BT	92	0.647

ตารางที่ 2.5 สถิติพารามิเตอร์และลักษณะของความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) [37]

Sample	$\alpha$ (kV)	$\beta$	Correlation (r)	Dielectric strength (kV/mm)
HDPE-0BT	14.21	4.0	0.99	61.58
HDPE-1BT	13.41	2.2	0.89	68.61
HDPE-5BT	12.78	2.7	0.93	60.38
HDPE-10BT	11.32	2.0	0.94	57.60
HDPE-20BT	11.47	4.3	0.94	51.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

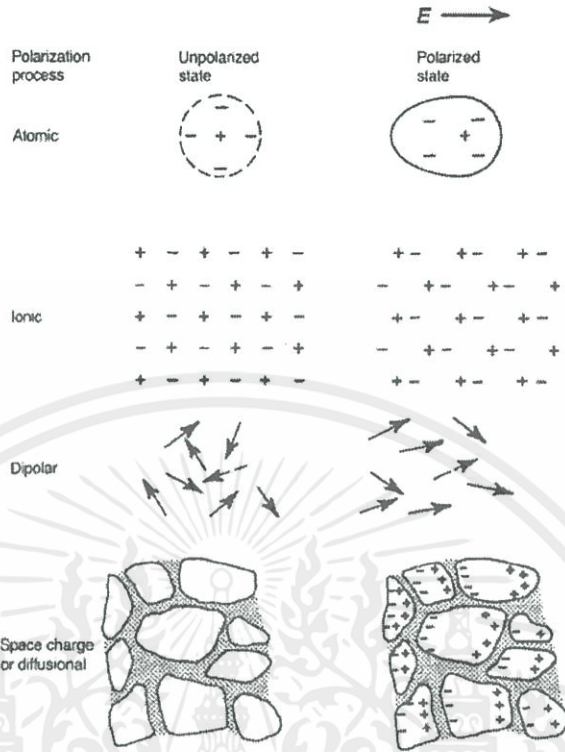
## 2.7 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

สารที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก คือ สารที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกนั้น ๆ หรือบอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกนั้น ๆ จะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าตัวของตัวเก็บประจุสูญญากาศ

ทั้งนี้สารทุกชนิดจะประกอบด้วยส่วนย่อยที่เรียกว่าโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลปกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอน และกลุ่มอิเล็กตรอน โดยมีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันและอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลเกิดการแยกประจุ โดยที่กลุ่มประจุบวกจะถูกผลักไปในทิศทางตามสนามไฟฟ้า และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางสวนทางกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสารก็จะก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) เล็ก ๆ และชี้ในทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ซึ่งสารไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (Nonpolar molecule) นอกจากนี้ยังมีสารไดอิเล็กทริกบางชนิดที่มีโมเลกุลก่อตัวเป็น โมเมนต์ขั้วคู่อยู่แล้ว แต่ทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้า (Electric dipole) ชี้ในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ และเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อโมเลกุล จะทำให้ขั้วคู่เล็ก ๆ เหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าโมเลกุลมีขั้ว (Polar molecule) และเรียกโมเมนต์ประเภทนี้ว่า ขั้วคู่ถาวร (Permanent dipole)

### 2.7.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( Dielectric constant ) [38]

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นสมบัติไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้าสถิต (Dielectrics in static electric fields) คือ เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริกในอุดมคติ จะไม่มีการนำพาของประจุในช่วง พิสัยยาวเกิดขึ้น จะมีก็แต่เพียงการจัดเรียงประจุกันใหม่อย่างจำกัดเท่านั้น จึงต้องอาศัยโมเมนต์ขั้ว (Dipole moment) และเรียกว่าการเกิดขั้วหรือการโพลาไรเซชัน (Polarization) การเกิดโพลาไรเซชันในระดับอะตอม นั้นเป็นการกระจัดของอิเล็กตรอนในอะตอมที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของนิวเคลียส สำหรับในวัสดุไดอิเล็กทริกจะมีการเกิดโพลาไรเซชันแบบไดโพลิกเกี่ยวข้องกับการกระจัดสัมพัทธ์ของแคตไอออนและแอนไอออนเพิ่มเติมเข้ามาอีก โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้จะไปทำการจัดวางทิศทางของโมเลกุลภายในวัสดุเสียใหม่ ส่วนการเกิดโพลาไรเซชันแบบประจุวากาศ (Space charge polarization) นั้นจะเกี่ยวข้องกับการขนส่งของพาหะนำประจุที่เป็นไปอย่างจำกัดจนกระทั่งพาหะเหล่านี้มาหยุดคอกันอยู่ที่บริเวณกำแพงพลังงานศักย์ ซึ่งอาจจะเป็นขอบเกรนหรือขอบเฟส (Phase boundary) ก็ได้ โดยกระบวนการเกิดโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 กระบวนการโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ [38]

โดยหลักการพื้นฐานแล้ว ขั้วคู่ไฟฟ้าจะประกอบด้วยสองจุดประจุที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกันอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $\delta x$  ซึ่งค่าโมเมนต์ขั้วคู่  $p$  ของแต่ละขั้วคู่ไฟฟ้านั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$p = Q \delta x \tag{2.7}$$

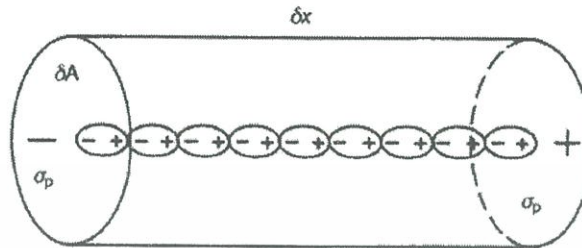
ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีความเป็นบวกอยู่ในแนวเส้นตรงที่ลากจากประจุลบไปยังประจุบวก

วัสดุที่มีการเกิดโพลาไรเซชันนั้นก็เปรียบเสมือนกับปริซึมขั้วคู่มูลฐาน (Elementary dipolar prisms) ที่มีความหนาแน่นประจุของพื้นผิวหน้าที่อยู่ตรงปลายปริซึมด้านหนึ่งเป็น  $+\sigma_p$  และอีกด้านหนึ่งเป็น  $-\sigma_p$  ดังในรูปที่ 2.33 สำหรับค่าโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุ นั้น จะเรียกว่า การเกิดขั้วหรือโพลาไรเซชัน  $P$  และสามารถมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ในแต่ละย่าน จากรูปที่ 2.38 จะได้อิทธิพลของเวกเตอร์ต่าง ๆ เป็น

$$\delta p = \sigma_p \delta A \delta x = \sigma_p \delta V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หรือทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก (2.8) ไปใช้

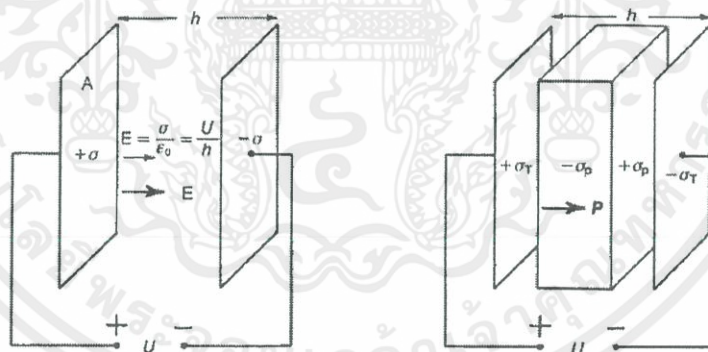
โดยทั่วไปแล้ว  $\sigma_p = n \cdot P$  เมื่อ  $n$  เป็นเวกเตอร์หน่วยที่พุ่งตั้งฉากตรงออกมาจากพื้นผิวล้อมปิดของวัสดุที่มีการเกิดโพลาริเซชัน



รูปที่ 2.38 ปริซึมมูลฐานของวัสดุที่มีการเกิดโพลาริเซชัน [38]

ความสัมพันธ์ที่สำคัญหลาย ๆ อย่างนั้น สามารถพบได้จากการพิจารณาถึงอิทธิพลของการนำสารไดอิเล็กทริกมาใส่เข้าไปในช่องว่างที่อยู่ระหว่างแผ่นระนาบคู่ขนานของตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 2.39 ซึ่งจากทฤษฎีของเกาส์ (Gauss's theorem) นั้นสนามไฟฟ้า  $E$  ทั้งที่อยู่ระหว่างและที่ตั้งฉากอยู่กับแผ่นระนาบคู่ขนานที่มีความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวเป็น  $\sigma$  และมีสุญญากาศกั้นอยู่จะมีค่าเป็น

$$E = \sigma / \epsilon_0 \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.39 บทบาทของสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ [38]

เนื่องจากว่ามีการให้ความต่างศักย์ขนาดเท่ากันแก่ทั้งสภาวะ (ก) และ(ข) ดังนั้น  $E$  จึงเป็นเช่นเดิมแต่ในกรณี (ข) นั้น ความหนาแน่นประจุที่มาจากเกิดการเกิดโพลาริเซชัน  $\sigma_p$  บนผิวหน้าของสารไดอิเล็กทริกจะไปหักล้างกันกับความหนาแน่นประจุรวม  $\sigma_T$  บางส่วนที่อยู่บนแผ่นระนาบของสารนี้ได้ด้วยเหตุนี้ความหนาแน่นประจุยังผลที่ทำให้เกิด  $E$  ในกรณี (ข) จึงลดลงเหลือเพียง  $\sigma_T - \sigma_p$  และจะไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\epsilon_0} \quad (2.10)$$

ความหนาแน่นประจุโดยรวม  $\sigma_T$  จะสมมูลกันกับขนาดของเวกเตอร์การกระจัดทางไดอิเล็กทริก  $D$  ดังนั้นจึงได้ว่า

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.11)$$

ถ้าสารไดอิเล็กทริกที่พิจารณาอยู่นั้นมีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น การเกิดโพลาริเซชันก็จะเป็นสัดส่วนกับค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวของวัสดุ ซึ่งถือว่าเป็นกรณีแบบปกติทั่วไปและจะได้ว่า

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (2.12)$$

เมื่อค่าคงที่ไร้นหน่วยอย่างใด ( $\chi_e$ ) เป็นสภาพรับไว้ได้ทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) โดยปกติแล้ว  $\chi_e$  เป็นเทนเซอร์ (Tensor) ลำดับที่สอง ถ้าสมมุติว่า  $P$  และ  $E$  นั้นร่วมเส้นตรงกัน  $\chi_e$  จะเป็นสเกลาร์ (Scalar) อย่างง่ายและจาก (2.11) และ (2.12) จะได้ว่า

$$D = \epsilon_0 E + \chi_e \epsilon_0 E = (1 + \chi_e) \epsilon_0 E \quad (2.13)$$

เนื่องจาก  $D = \sigma_T$ ,

$$\frac{Q_T}{A} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \frac{U}{h} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $Q_T$  เป็นค่าประจรรวมบนแผ่นตัวเก็บประจูดังนั้นจึงได้ค่าความจุ ( $C$ ) เป็น

$$C = \frac{Q_T}{A} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.15)$$

เนื่องจากสุญญากาศนั้นมีค่าสภาพรับไว้ได้เป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุที่เป็นเพียงแผ่นคู่ขนาดอันว่างเปล่าจึงมีค่าความจุ ( $C_0$ ) เป็น

$$C_0 = \frac{A}{h} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้านำสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพรับไว้ได้  $\chi_e$  มาใส่เข้าไปในช่องว่างระหว่างแผ่นคู่ขนานก็จะทำให้ค่าความจุเพิ่มขึ้นด้วยค่าตัวประกอบ  $1 + \chi_e$  ซึ่งสภาพยอม (Permittivity) หรือ  $\mathcal{E}$  ของสารไดอิเล็กทริกนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0(1 + \chi_e) \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} = (1 + \chi_e)\mathcal{E}_r$$

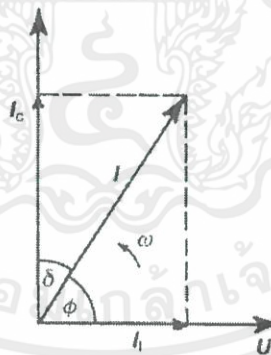
ดังนั้น ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นคู่ขนาน เป็นดังความสัมพันธ์

$$C = \mathcal{E}_r \mathcal{E}_0 \frac{A}{h} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\mathcal{E}_r$  เป็นสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือที่นิยมเรียกกันว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของสารไดอิเล็กทริก

### 2.7.2 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ( Dielectric loss tangent ) [39]

เมื่อสารไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสที่ไหลผ่านสารไดอิเล็กทริกจะมีเฟสหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสาร ไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ [39]

ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการสูญเสียพลังงาน โดยการสูญเสียพลังงานเฉลี่ยสามารถหาได้โดยพิจารณากระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสีย  $I$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต่ออายุไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \sin(\omega t) I_0 \cos(\omega t - \delta) dt \quad (2.18)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (2.18) จะได้

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0 U_0 \sin \delta$$

เนื่องจาก  $I_0 = I_c / \cos \delta$  และ  $I_c = \omega U_0 C$  ดังนั้น พลังงานที่สูญเสียเฉลี่ย คือ

$$\bar{P} = \frac{1}{2} U_0^2 \omega C \tan \delta \quad (2.19)$$

เมื่อ  $U_0 / \sqrt{2}$  และ  $I_0 / \sqrt{2}$  คือ ความต่างศักย์รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Rms voltage) และ กระแสรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Rms current) ตามลำดับ

โดยที่  $\tan \delta$  เรียกว่า การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss tangent)

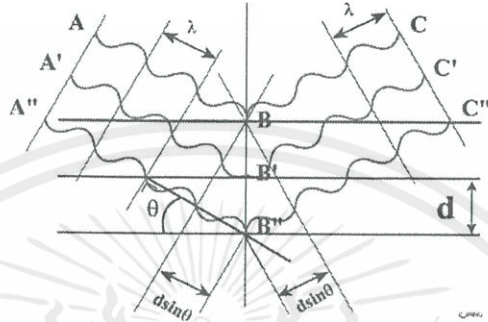
## 2.8 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

### 2.8.1 ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของหน่วยเซลล์ (Unit Cell) ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบ (Pattern) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของเอกสารนี้เป็แต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง ได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยัง ค้าไม่ว่ากรณีใด สามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ  $2d \sin \theta = n \lambda$  ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ



รูปที่ 2.41 แสดงแบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [40]

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณ หรือ หาค่าประกอบตัวอย่างที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ในตัวอย่าง ว่ามีส่วนกี่ % ได้ โดยการใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

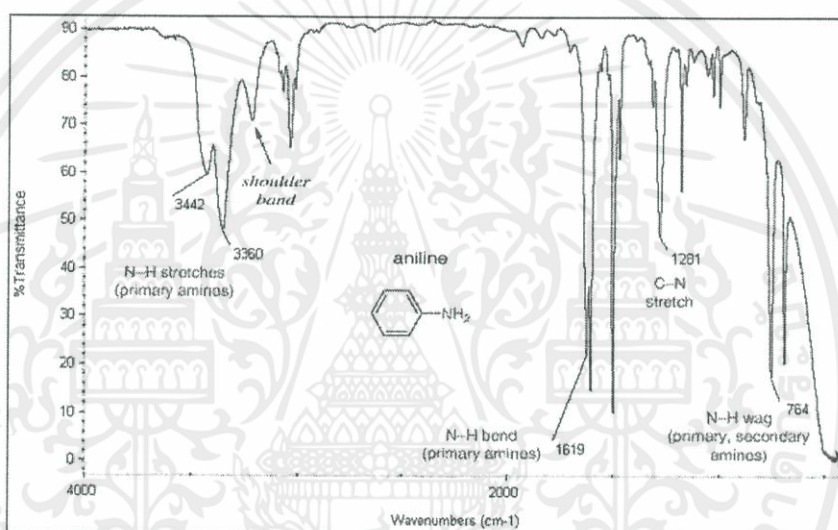
### 2.8.2 วิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด (FT-IR Spectrometer)

FT-IR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ  $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่ สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงรังสีวิทยุ (Visible radiation) กับรังสีไมโครเวฟ (Microwave radiation) โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสาร Near Infrared ( $12800-4000 \text{ cm}^{-1}$ ) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ 2. กลาง Middle Infrared ( $4000-200 \text{ cm}^{-1}$ ) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 3. Far Infrared ( $200-10 \text{ cm}^{-1}$ )

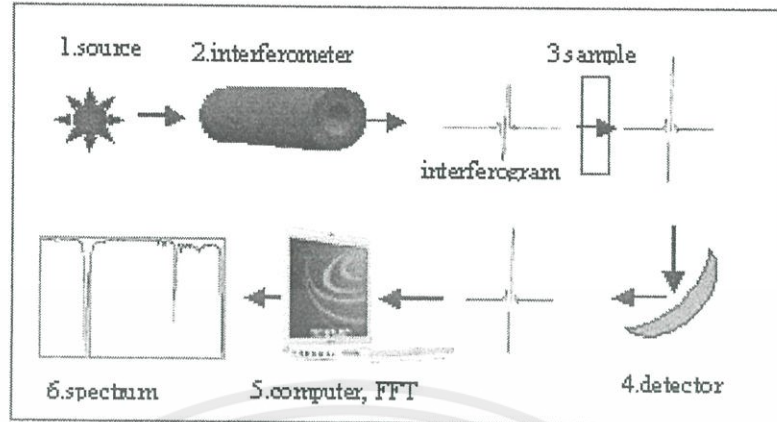
ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้อง เท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (Wave number) กับความส่องผ่านของแสง (Transmittance) ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum



รูปที่ 2.42 Infrared spectrum ของ Aniline [41]

การใช้เครื่อง FTIR spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่าง ใช้เวลาน้อยและไม่สิ้นเปลืองสารเคมีจึงนิยมนำมาใช้เพื่อการตรวจสอบสารในเชิง คุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ชนิดของสารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างสารสกัดจากพืช ตัวอย่างพอลิเมอร์ เป็นต้น นอกจากการวิเคราะห์โดยใช้ช่วง Middle IR แล้ว ช่วง Near IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

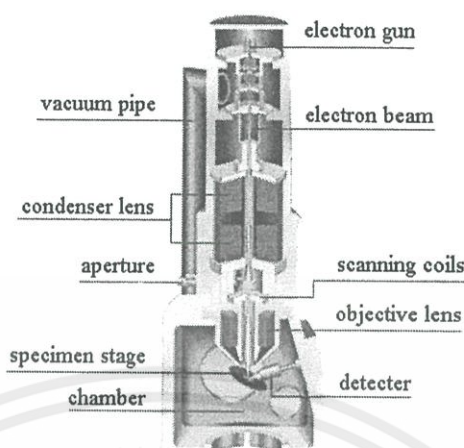


รูปที่ 2.43 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR spectrometer [42]

### 2.8.3 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัมพันธภาพของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัมพันธภาพบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัมพันธภาพของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.44 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [43]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่อิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอน โวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับความพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

## 2.8.4 ศึกษาเอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

### 2.8.4.1 ทฤษฎีว่าด้วยรามานสเปกโตรสโคปี (Theory of Raman Spectroscopy)

Raman scattering เกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสงโมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยบางส่วนเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางด้วยการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่มีการชนส่วนน้อยอีกส่วนหนึ่งคือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อย เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering)

เมื่อก้าวถึงปรากฏการณ์ของการเกิดกระเจิง ในกระบวนการกระเจิงนั้น สิ่งที่สำคัญที่จะต้องเน้นคือ การดูดกลืนแสงหรือโฟตอนเริ่มต้น และการให้อิมพัลส์ของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น เป็นกระบวนการเกิดอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยานี้ขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนในโมเลกุลถูกรบกวน หรือ distorted ได้ง่ายเพียงใด คุณสมบัติอันนี้เรียกว่า polarizability ถ้า polarizability ของโมเลกุลเปลี่ยนไปในระหว่างการสั่นของโมเลกุล จะมีผลต่อการเกิด raman shifted ของโฟตอนจากการเกิดอันตรกิริยาหรือโฟตอนเริ่มต้นด้วยพลังงาน  $h\nu_i$

ดังนั้น โมเลกุลที่ทำให้แสงโมโนโครมาติกเกิดการกระเจิงแล้วเกิด Raman shifted lines ได้ โมเลกุลนั้นจะต้องเกิดการสั่นแล้วทำให้ polarizability ของสารนั้นเปลี่ยนไป

### 2.8.4.2 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectrometer)

องค์ประกอบของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์นั้น ส่วนที่สำคัญก็คือ ต้องมีเครื่องที่จะสามารถวัดแสงที่กระเจิงได้ ซึ่งโดยปกติแล้วเป็นแสงที่มีน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูงๆ อย่างไรก็ตาม เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ก็ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูง

2. ระบบใส่สารตัวอย่าง (Sample illumination system)

### 3. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่เหมาะสม

#### 2.8.4.3 ประโยชน์ของการใช้เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี

ประโยชน์ของการนำเทคนิคนี้ไปใช้ทางเคมีคือ ใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์สารต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และชีวสาร (Biological substances) ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะได้ผลออกมคล้ายกับเทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ดังนั้น เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน คือ ใช้หลักการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อการพิสูจน์ตรวจสอบชนิดของสาร โดยสเปกตรัมจะต้องเหมือนกันถ้าเป็นสารเดียวกัน แต่ถ้าลักษณะของสเปกตรัมไม่เหมือนกัน ก็อาจใช้หาพวกฟังก์ชันนัลกรุปของโมเลกุลได้โดยเทียบตำแหน่งของแบนด์ในสารตัวอย่างกับ correlation chart หรือตำแหน่งของฟังก์ชันนัลกรุป

## 2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) [44]

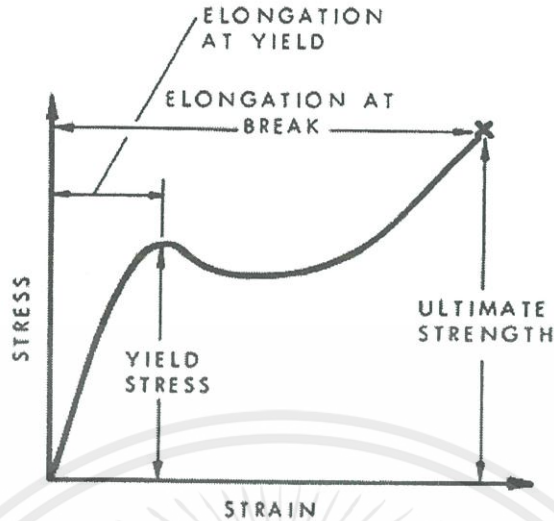
ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุที่จะรับด้วยแรงกระทำโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการแตกหัก สมบัติของวัสดุนั้นจะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด และสามารถทดสอบได้โดยการทำการทดลอง การทดสอบที่สำคัญ คือ การทดสอบโดยการดึงหรือการอัด (Tension or compression test) การทดสอบตัวอย่างของวัสดุไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสมชนิดต่าง ๆ จะต้องทำเป็นรูปทรง และขนาดตามมาตรฐานก่อนที่จะทำการทดสอบ เช่น มาตรฐานสมาคมอเมริกันสำหรับการทดสอบวัสดุ (American Society for Testing and Materials Standard ASTM) มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard; JIS) หรือมาตรฐานอื่น ๆ ที่ยอมรับกันทั่วโลก ซึ่งมาตรฐานเหล่านี้เป็นตัวบังคับ และสามารถเป็นแนวทางในการทดสอบได้

### 2.9.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) [44]

ความทนแรงดึงสามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่ดึงวัสดุด้วยแรงภายนอก แรงกระทำจะถ่ายทอดตลอดแนวของชิ้นตัวอย่าง ทิศทางการเคลื่อนที่ภายในแกนตามแนวแรงจะมีการต้านกัน การเกิดแรงต้านนี้เกิดขึ้นทั่วบริเวณของชิ้นตัวอย่าง จะส่งผลให้เกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ขึ้นภายในวัสดุ โดยความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียดสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุได้เรียกว่า กราฟความเค้น - ความเครียด ดังรูปที่

2.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.45 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุ [44]

กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุจะแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างหน่วยแรง และความเครียดภายในขอบเขตของความยืดหยุ่น การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงจะทำให้เพิ่มความเครียดอย่างเป็นสัดส่วน หลักการนี้ค้นพบโดย โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) โดยใช้สปริง จึงเรียกชื่อว่า กฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งแสดงในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.20)$$

โดย E แทนค่าคงที่ของความเป็นสัดส่วน (Constant of proportionality) ซึ่งเรียกว่า มอดูลัสของความยืดหยุ่น หรือ มอดูลัสของยัง (modulus of elasticity or Young's modulus)  $\sigma$  แทนค่าความเค้น และ  $\varepsilon$  แทนค่าความเครียด สมการนี้เป็นสมการของแนวเส้นที่เหยียดตรงเริ่มต้นของกราฟความเค้น – ความเครียด ดังนั้นมอดูลัสของความยืดหยุ่นจึงเท่ากับความชัน (Slope) ของเส้นกราฟความเครียดเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอะตอมที่เคลื่อนที่ไปขณะถูกแรงมากระทำ ค่านี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับค่าความเค้น มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร (mm/mm) หรือนิวต่อนิ้ว (in/in) บางครั้งอาจใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้ การคำนวณค่าความเครียดหาได้จากอัตราส่วนระหว่างส่วนต่างของความยาว ( $\Delta L$ ) ต่อ ความยาวเดิม ( $L_0$ ) ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.21)$$

ความเค้นสามารถคำนวณได้จากแรงภายนอก (F) ที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (A) และเกิดการต่อต้านขึ้น โดยมีหน่วยการวัดเป็นแรงต่อพื้นที่ เช่น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) นิวตันต่อตารางเมตร ( $N/m^2$ ) หรือ ปาสคาล (Pa) โดยแสดงดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง (2.22) นำไปใช้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.22)$$

แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ และส่งผลให้เกิดความเค้นนั้นมีดังนี้

- ความเค้นแรงดึง (Tensile stress)
- ความเค้นแรงอัด (Compressive stress)
- ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress)
- ความเค้นแรงคด โค้ง (Bending or flexural stress)

ความเค้นแรงดึง คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการดึงโดยแรงภายนอกมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเป็นหน่วยแรงต่อพื้นที่

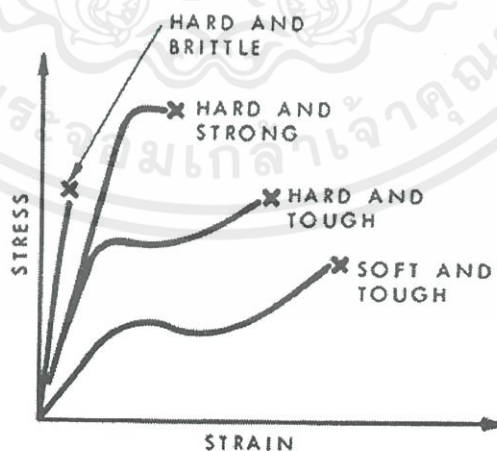
ความเค้นแรงอัด คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงคดหรือกด ซึ่งพยายามให้วัสดุอัดแน่นติดกันหรือ ทำให้อะตอมของวัสดุอัดแน่น การทดสอบแบบนี้วัสดุจะเกิดแรงต้านจากแรงอัดเพื่อให้เกิดการคืนตัวของวัสดุในการรักษาสภาพของตัวเองให้สมดุล

ความเค้นแรงเฉือน คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการทดสอบการดึงหรือการอัดเพื่อให้วัสดุเลื่อนผ่านกัน ซึ่งพื้นที่จะขนานกับทิศทางของแรงภายนอกที่กระทำ

ความยืด (Elongation) เป็นความสามารถของวัสดุในการยืดตัว เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การทดสอบหาค่าความยืดนี้มักใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อเปรียบเทียบกับความยาวเดิมของวัสดุว่ายืดได้กี่เปอร์เซ็นต์

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความยืด (\% elongation)} = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (2.23)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดสามารถบอกสมบัติของวัสดุได้ว่าเป็นวัสดุประเภทใด เช่น เป็นวัสดุที่เหนียว (Ductile) หรือเป็นวัสดุที่เปราะ (Brittle) ดังรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.46 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท [44] ขณนี้เป็นการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าหากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.2 ความแข็ง (Hardness) [45]

ความหมายของค่าความแข็งของวัสดุ นั้น หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทาน การเจาะผ่าน (Indentation) หรือ ความสามารถในการทนต่อการขูดขีด ดังนั้นค่าความแข็งของ ตัวอย่างการทดสอบจะเป็นหน่วยที่ขึ้นอยู่กับวิธีการ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ค่าของความ แข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นคือ พลาสติก และเซรามิกจะแข็งกว่าพวก พอลิเมอร์

#### การทดสอบความแข็ง

มีอยู่หลายวิธี แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็งและ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาทีเป็น มาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) จะใช้สูตรคำนวณดังนี้คือ

$$Bhn = \frac{\text{แรงที่ใช้กด}}{\text{พื้นที่ของรอยบุ๋ม}} = \frac{P}{(\pi D / 2) \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $Bhn$  = Brinell Hardness Number มีหน่วยเป็นแรง/หน่วยพื้นที่  
 $P$  = แรงที่ใช้กด  
 $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบอล (Indenter)  
 $d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยบุ๋ม

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกด ไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

2. การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบแบบนี้คล้าย กับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่าค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือ ขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสม กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึก ของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรง กระทำเล็กน้อยคือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กก. ขึ้นอยู่กับ ขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้จะ

เป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถวัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบ่มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

3.การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันว่าหัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ การคำนวณค่า Vickers Hardness Number (VHN) หรือ Diamond-Pyramid Hardness (DPH) ใช้สูตร

$$DPH = \frac{1.8544F}{D^2} \quad (2.25)$$

โดยที่  $F$  = น้ำหนักที่กด (กก.)

$D$  = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทะแยงมุม (mm)

1.8544 เป็นค่า  $2 \sin(\theta/2)$  เมื่อ  $\theta$  = มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของเพชร ซึ่ง  $= 136^\circ$

#### ความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness)

เครื่องมือที่นิยมใช้วัดความแข็งกดอีกชนิดคือ ดูโรมิเตอร์ (Durometer) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 มักมีขนาดเล็ก กะทัดรัด สะดวกในการใช้งาน นิยมใช้และเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายทั่วโลก มักใช้แรงสปริงในการกด (Spring-loaded durometer) สเกลสำหรับเครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์คือ 0 ถึง 100 คือความแข็งของวัสดุแข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระจก ดูโรมิเตอร์ชนิด A หรือชอร์ A (Type A or Shore A durometer) ใช้วัดพอลิเมอร์อ่อนนิ่ม เช่น ยางใช้วัสดุที่มีความแข็งไม่เกิน 90 ถ้าวัสดุมีความแข็งกดเกิน 90 จะใช้ดูโรมิเตอร์ชนิด D หรือชอร์ D (Type D or Shore D durometer) ซึ่งมีรูปร่างของหัวกดและความแข็งของสปริงแตกต่างกันไป

ข้อเสียของเทคนิคการวัดความแข็งกดด้วยหัวดูโรมิเตอร์ คือ ความไม่แน่นอนของค่าที่วัดได้ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ทำการทดสอบ ค่าที่อ่านได้ยังขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการกด และระยะเวลาในการกด ทั้งนี้เนื่องจากการคืนตัวเนื่องจากความยืดหยุ่น (Elastic recovery) และปรากฏการณ์ คีป (Creep) ของพอลิเมอร์นั่นเอง บางมาตรฐานใช้ค่าที่อ่านได้สูงสุด บางครั้งอาจใช้ค่าที่อ่านได้หลังจากการกดระยะเวลาหนึ่ง เช่น 5 วินาที หรือ 30 วินาที เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบต้องมีความหนาอย่างน้อย  $\frac{1}{4}$  นิ้ว อาจทำการขึ้นรูปตัวอย่างโดยวิธีการหล่อแบบหรือตัดจากแผ่น อาจใช้การซ้อนตัวอย่างหลายแผ่นเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ ตัวอย่างของเครื่องคูโรมิเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 เครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) [46]

## 2.10 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

ไดอิเล็กทริก คือ สารที่ไม่นำไฟฟ้า และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงสมบัติอย่างหนึ่งของตัวเก็บประจุ โดยทำการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ( $\tan \delta$ ) ของเซรามิกที่เตรียมได้เทียบกับการเปลี่ยนแปลงความถี่และสัดส่วนองค์ประกอบ แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้จากสมการที่ 2.26

$$\epsilon_r = \frac{C_p d}{\epsilon_0 A} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของสารตัวอย่าง

$C_p$  คือ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสารตัวอย่าง

$d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (cm)

$A$  คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (cm<sup>2</sup>)

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า  $8.85 \times 10^{-12}$  ฟารัด/เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1. กล่องพลาสติกแบบ 3 ช่อง
- 3.1.2. กระจกเอทานอล
- 3.1.3. ซ้อนตักสาร
- 3.1.4. บีเปตขนาด 5 มิลลิลิตร 1 บีเปต
- 3.1.5. บีเปตขนาด 1 มิลลิลิตร 1 บีเปต
- 3.1.6. เข็มฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร 1 บีเปต
- 3.1.7. บีกเกอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร 5 ใบ
- ขนาด 50 มิลลิลิตร 5 ใบ
- ขนาด 500 มิลลิลิตร 1 ใบ
- 3.1.8. อลูมิเนียมฟรอยล์ (Aluminum foil)
- 3.1.9. แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.10. แท่งแม่เหล็กคนสาร
- 3.1.11. หลอดหยด
- 3.1.12. เทปทองแดง (Copper tape)
- 3.1.13. เทปคาร์บอน (Carbon tape)
- 3.1.14. กรรไกร
- 3.1.15. ถุงซิปล
- 3.1.16. เวอร์เนียร์คิิตอล
- 3.1.17. เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
- 3.1.18. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น EVO MA 10
- 3.1.19. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrometer :IR) ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นให้ตีพิมพ์ลงในสื่อ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

- 3.1.20. เครื่องรามานสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Raman Spectrometer) รุ่น DXR Smart Raman ยี่ห้อ Thermo scientific
- 3.1.21. เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) ผลิตโดยบริษัท Siemens รุ่น D8 Advance
- 3.1.22. เครื่อง LCZ มิเตอร์ รุ่น Agilent E4980A ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 2 MHz
- 3.1.23. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester) ชนิด Shore A รุ่น GS-719N Type A บริษัท Teclock
- 3.1.24. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Tester machine; UTM) รุ่น LR5K บริษัท LLOYD instruments

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1. แบเรียมไททานเตชขนาดอนุภาคนาโน ( $\text{BaTiO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99.95% ผลิตโดยบริษัท Advanced Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.2. ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เบส หรือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi}$ )<sub>n</sub> ผลิตโดยบริษัท DOWN-CORNING ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.3. ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เคียวริง เอเจนท์ (SILICONE ELASTOMER CURING AGENT) ผลิตโดยบริษัท DOWN-CORNING ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.4. เอทานอล ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) Analytical Reagent A.R. ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan Limited ประเทศไทย
- 3.2.5. แท่งนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ผลิตโดย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.3.1 กระบวนการเตรียมคอมโพสิตจากแบเรียมไททานेट (BT) กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS)

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณอัตราส่วนของแบเรียมไททานेटกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

	PDMS (%)	BT (%)	PDMS (ml)	BT (g)
1	90 %	10 %	10	1.0780
2	80 %	20 %	10	2.425
3	70 %	30 %	10	4.1571
4	60 %	40 %	10	6.4667
5	50 %	50 %	10	9.700

#### การเตรียมวัสดุคอมโพสิตมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชั่งปริมาณแบเรียมไททานेट ( $BaTiO_3$ ) ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 ในเครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.0001 กรัม ลงบนอลูมิเนียมฟรอยล์ จากนั้นนำแบเรียมไททานेटที่ชั่งมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 25 ml ใบที่ 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ จนครบทุกอัตราส่วน
2. เติมพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ( $C_2H_6OSi$ )<sub>n</sub> 10 ml ลงในบีกเกอร์ใบที่ 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ
3. เติมซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เคียวริง เอเจนท์ 1 ml ลงในบีกเกอร์ใบที่ 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ
4. บั่นกวนให้สารในบีกเกอร์ทั้ง 5 ใบให้ผสมเข้ากันเป็นเวลา 30 นาที
5. เมื่อบั่นกวนเสร็จนำสารในบีกเกอร์ทั้ง 5 ใบ เทลงบนกล่องพลาสติกแบบ 3 ช่อง แล้วเกลี่ยให้เท่ากัน
6. ตั้งสารทั้ง 5 อัตราส่วนทิ้งไว้ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. หลังจาก 24 ชั่วโมง ทำการลอกชิ้นงานออกจากกล่องพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

8. นำชิ้นงานที่ได้มาตัดแล้วทำการวัดความหนา และขนาด เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทั้งหมดให้หมดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้

9. นำชิ้นงานทั้ง 5 ตัวอย่างมาทำซ้ำ โดยนำไปทำออกซิเจนพลาสมา เพื่อให้ชิ้นงานเกาะติดกับเทปทองแดง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้
  - 9.1 ใส่ตัวอย่างเข้าไปในเครื่อง โดยหงายด้านที่ต้องการจะประกบกันขึ้น เมื่อใส่ตัวอย่างเสร็จแล้ว จากนั้นกด Pump
  - 9.2 เปิดวาล์วให้ออกซิเจนเข้าไปในเครื่อง Plasma Cleaner
  - 9.3 Pump ให้มีค่าความดันอากาศถึง 500 mmHg แล้วทำการปิดวาล์ว
  - 9.4 เปิดวาล์วแก๊ส
  - 9.5 หมุนวาล์วแก๊สให้เข็มอยู่ที่ 1.5 kg/cm
  - 9.6 Pump ให้มีค่าความดันอากาศถึง 100 mmHg
  - 9.7 เปิดวาล์วให้มีค่าความดันของออกซิเจนให้อยู่ในช่วง 100 -200 mmHg
  - 9.8 จากนั้นกดปุ่ม Power แล้วปรับ RF เป็น High จับเวลา 1.10 นาที
  - 9.9 หมุนปุ่ม RF เป็น Off แล้วกดปุ่ม Power เพื่อปิด
  - 9.10 ปิดวาล์ว Gas ทั้งหมด และปิด Pump
  - 9.11 ปล่อยออกซิเจนออกจากเครื่อง
10. นำตัวอย่างที่ทำออกซิเจนพลาสมาและขั้วทองแดงมาประกบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 กระบวนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากแบเรียมไททาเนต (BT) กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (CNT)

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณอัตราส่วนแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน

	PDMS (ml)	BT (g)	CNT (%)	CNT (g)
1	10	9.7	1 %	0.1959
2	10	9.7	2 %	0.395
3	10	9.7	3 %	0.600
4	10	9.7	4 %	0.8083
5	10	9.7	5 %	1.0210

#### การเตรียมวัสดุคอมโพสิตมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชั่งแบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) และแท่งนาโนคาร์บอนตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2 ในเครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 4 ตำแหน่ง ลงบนออลูมิเนียมฟรอยล์ จากนั้นนำแบเรียมไททาเนตและแท่งนาโนคาร์บอนที่ชั่งมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 25 ml ใบที่ 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ จนครบทุกอัตราส่วน
2. เติมหะเอทานอล ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) 6 มิลลิลิตร เพื่อให้สารทั้ง 2 กระจายตัวและผสมเข้ากัน
3. กวนให้เข้ากันและนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $80\text{ }^\circ\text{C}$  ให้เอทานอล ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) ระเหยประมาณ 40 นาที
4. เติมพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi}$ )<sub>n</sub> 10 ml ลงในบีกเกอร์ใบที่ 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ
5. เติมซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เคียวริง เอเจนท์ 1 ml ลงในบีกเกอร์ใบที่ 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ
6. ปั่นกวนให้สารที่ใส่เข้าไปในบีกเกอร์ทั้ง 5 ใบผสมเข้ากันเป็นเวลา 30 นาที
7. เมื่อบั่นกวนเสร็จนำสารในบีกเกอร์ทั้ง 5 ใบ เทลงบนกล่องพลาสติกแบบ 3 ช่อง แล้วเกลี่ยให้เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ให้เท่ากัน

8. ตั้งสารทั้ง 5 อัตราส่วนทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. หลังจาก 24 ชั่วโมง ทำการลอกชิ้นงานออกจากถาดพลาสติก
10. นำชิ้นงานที่ได้มาตัดแล้วทำการวัดความหนา และขนาด เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน
9. นำชิ้นงานทั้ง 5 ตัวอย่างมาทำซ้ำโดยนำไปทำออกซิเจนพลาสมา
10. นำตัวอย่างที่ทำออกซิเจนพลาสมาและขั้วทองแดงมาประกบกัน

### 3.4 การตรวจสอบสมบัติ

#### 3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

##### 1. ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีวัสดุผสมที่มีปริมาณสารที่แตกต่างกันที่เตรียมได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของวัสดุผสมที่เตรียมได้ที่มุมต่าง ๆ เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยขนาดของมุมตกกระทบใช้ในช่วง  $3-60^{\circ}$  ด้วยอัตราเร็ว  $1^{\circ} / \text{นาที} / \text{มิลลิแอมป์} / \text{โวลต์}$

##### 2. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุผสม นำชิ้นงานไปหักในไนโตรเจนเหลวโดยแช่เป็นเวลา 10 วินาที ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำมาเคลือบด้วยทองและนำไปเข้าเครื่อง SEM โดยการศึกษาลักษณะวิทยาของวัสดุผสมที่มีปริมาณสารที่แตกต่างกัน

##### 3. วิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด (FT-IR Spectrometer)

นำวัสดุผสมมาตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเริ่มจากนำวัสดุผสมมาอัดเป็นเม็ดรวมกับ โพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide, KBr) ซึ่งโพแทสเซียมโบรไมด์ จัดเป็นสารเฉื่อยยอมให้คลื่นรังสีอินฟราเรดผ่านได้และมีช่วงคลื่นอินฟราเรดที่กว้างกว่าสารอื่น ๆ ที่มีสมบัติเดียวกัน

#### 4. การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

นำวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโพรพิลีนไคโกลอกเซน ที่เตรียมได้มาทำการทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน เพื่อยืนยันโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดในช่วง  $100 - 3200 \text{ cm}^{-1}$

##### 3.4.2 การทดสอบสมบัติทางกล

###### 1. ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเครียด ณ จุดขาด (Strain at break)	ASTM D 412	%
ความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break)	ASTM D 412	MPa
มอดูลัส (Young's modulus)	ASTM D 412	MPa
ความแข็งเกร็ง (Stiffness)	ASTM D 412	GPa

ความเครียด ณ จุดขาด, ความเค้น ณ จุดขาด, มอดูลัส และความแข็งเกร็ง

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D412 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบล ขนาด  $7 \times 5$  เซนติเมตร<sup>2</sup> จำนวน 1 ชิ้นงานของแต่ละสูตร

###### 2. ความแข็ง (Hardness)

นำชิ้นงานของวัสดุผสมที่มีปริมาณสารแตกต่างกันมาทำการทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งชนิด Shore A โดยใช้แรงกด 4000 กรัม

##### 3.4.3 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม โดยการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant,  $\epsilon_r$ ) ของชิ้นทดสอบ โดยใช้เครื่อง LCZ มิเตอร์ รุ่น Agilent E4980A โดยวัดที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเพื่อให้นักวิจัยในสาขาอื่น ๆ ได้ศึกษาและใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

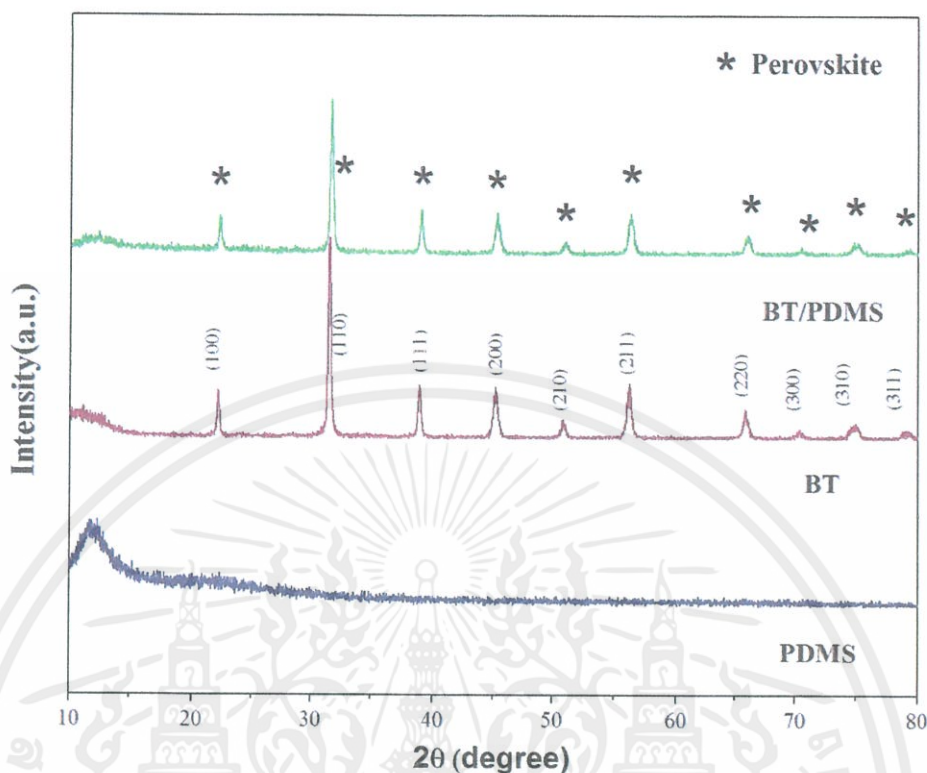
บทนี้นำเสนอผลการทดลองในส่วนของเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่างแบเรียมไททานตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน และแบเรียมไททานต พอลิไคเมทิลไซลอคเซนและการปรับปรุงด้วยแท่งนาโนคาร์บอน รวมถึงผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่เตรียมได้ พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

##### 4.1.1 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผสมแบเรียมไททานตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน

เมื่อนำวัสดุผสมแบเรียมไททานตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน มาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ  $BaTiO_3$  ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 โดยมีพีค  $2\theta$  ขึ้นที่มุม  $22.261$ ,  $31.645$ ,  $38.886$ ,  $45.375$ ,  $51.097$ ,  $56.249$ ,  $66.118$ ,  $70.657$ ,  $75.158$  และ  $79.466^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100), (110), (111), (200), (210), (211), (220), (300), (310) และ (311) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของพอลิไคเมทิลไซลอคเซน เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสารตัวอย่างที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม และไม่มีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

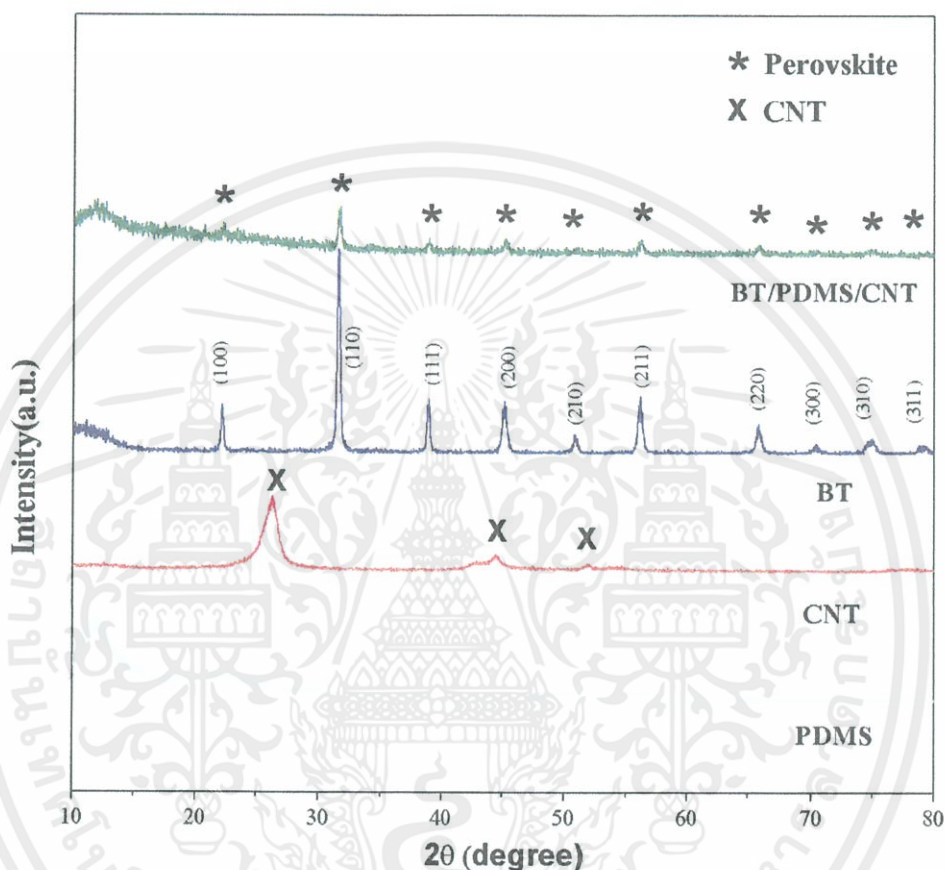


รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม BT 50% / PDMS 50%

#### 4.1.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์วัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

จากการนำวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนมาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม BT/PDMS/CNT โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO<sub>3</sub> ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 โดยมีพีค 2θ ขึ้นที่มุม 22.261, 31.645, 38.886, 45.375, 51.097, 56.249, 66.118, 70.657, 75.158 และ 79.466° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100), (110), (111), (200), (210), (211), (220), (300), (310) และ (311) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PDMS เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้ และนอกจากนี้ ยังได้ทำการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของแท่งนาโนคาร์บอน มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคาร์บอน ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 75-1621 จะพบพีคที่มุม

$2\theta$  ขึ้นที่มุม 26.228, 44.365 และ 50.381 ° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002), (101) และ (102) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสารตัวอย่างที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม และไม่มีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น



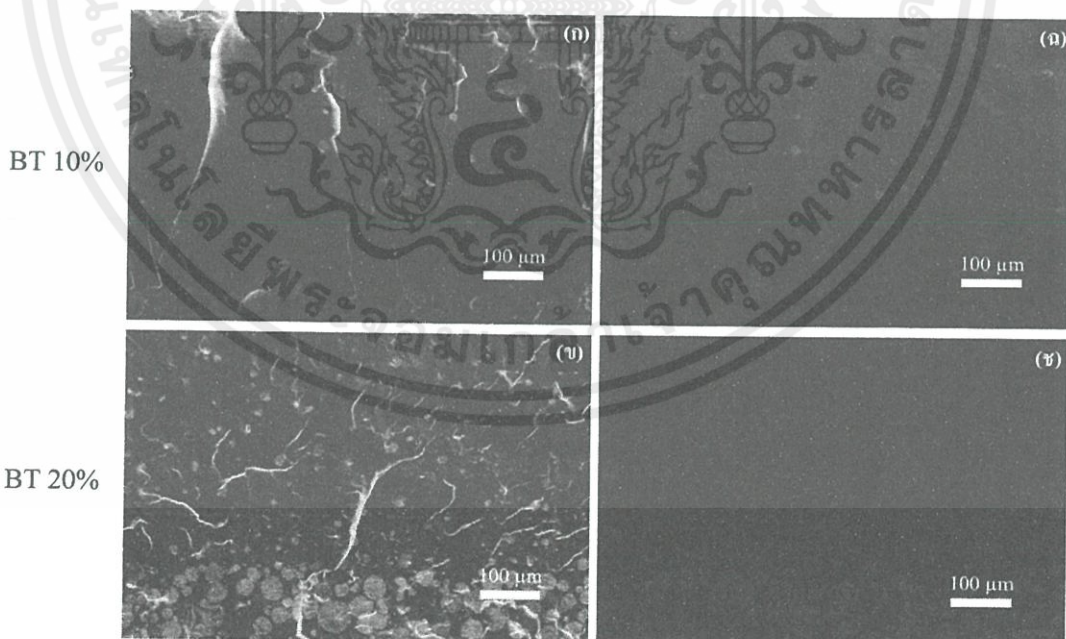
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสมที่ BT 50% / PDMS 50% / CNT 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

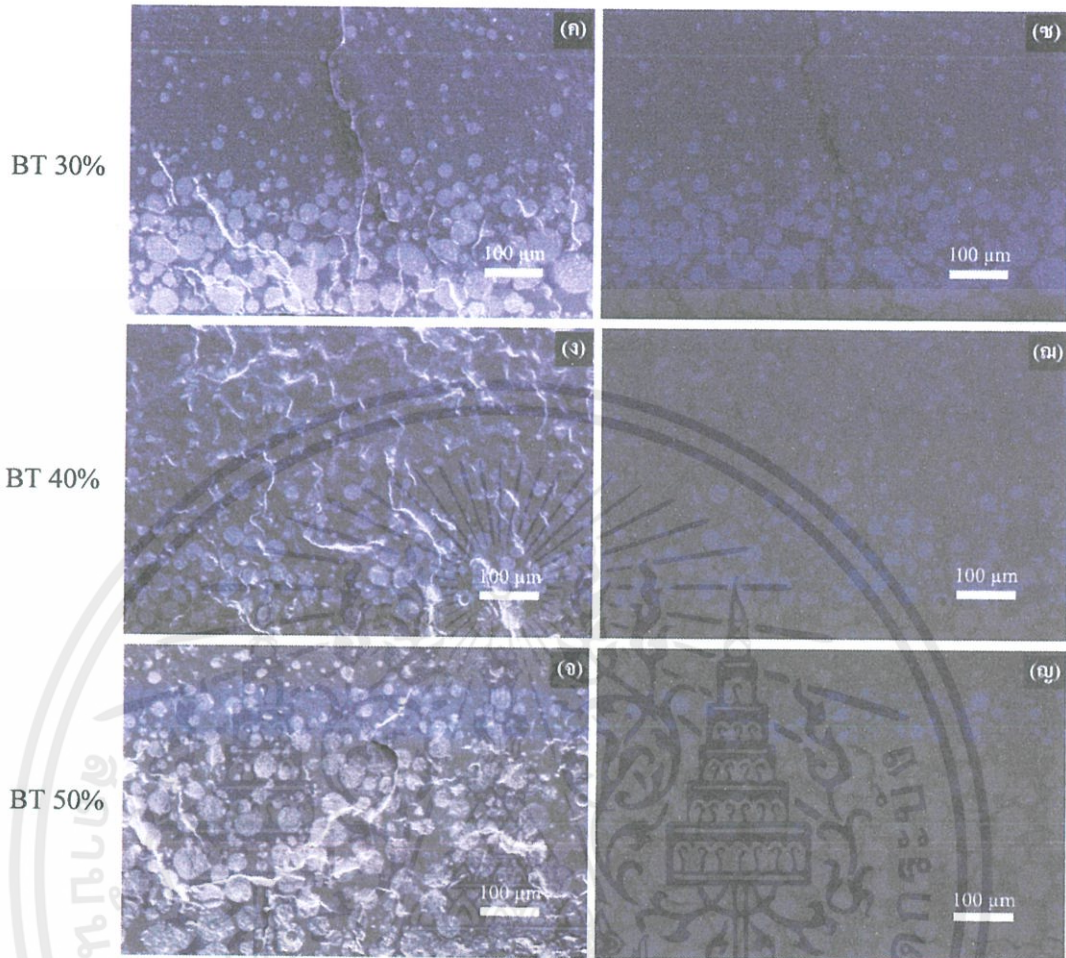
## 4.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

### 4.2.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องของวัสดุผสมแบเรียมไททานตกับพอลิโพรพิลีนไฮดรอกซีเซลลูโลส

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมและแบเรียมไททานตกับพอลิโพรพิลีนไฮดรอกซีเซลลูโลสที่เตรียมได้จากการนำไปหักในไนโตรเจนเหลว มาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณรอยหักของวัสดุผสม ซึ่งมีการปรับปริมาณแบเรียมไททานต 10% 20% 30% 40% 50% ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก)-(ง) ซึ่งภาพ (ก)-(จ) เป็นภาพแบบ Secondary electron (SE) และ (ฉ)-(ง) เป็นภาพแบบ Backscattered electron (BSE) ซึ่งจากการส่องของ BSE จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามี 2 เฟส ภาพมืดจะเป็นเฟสของพอลิโพรพิลีนไฮดรอกซีเซลลูโลส ส่วนภาพสว่างนั้นจะเป็นเฟสของแบเรียมไททานต ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททานตมากขึ้นตามลำดับ จะเกิดการตกตะกอนและอนุภาคของแบเรียมไททานต มีการจับตัวกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้ว อนุภาคของแบเรียมไททานตที่ใช้ในงานวิจัยจะมีขนาดอนุภาคเพียง 50 นาโนเมตร แต่ในภาพจะเห็นได้ว่าก้อนที่สว่างมีขนาดถึงระดับไมโครเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

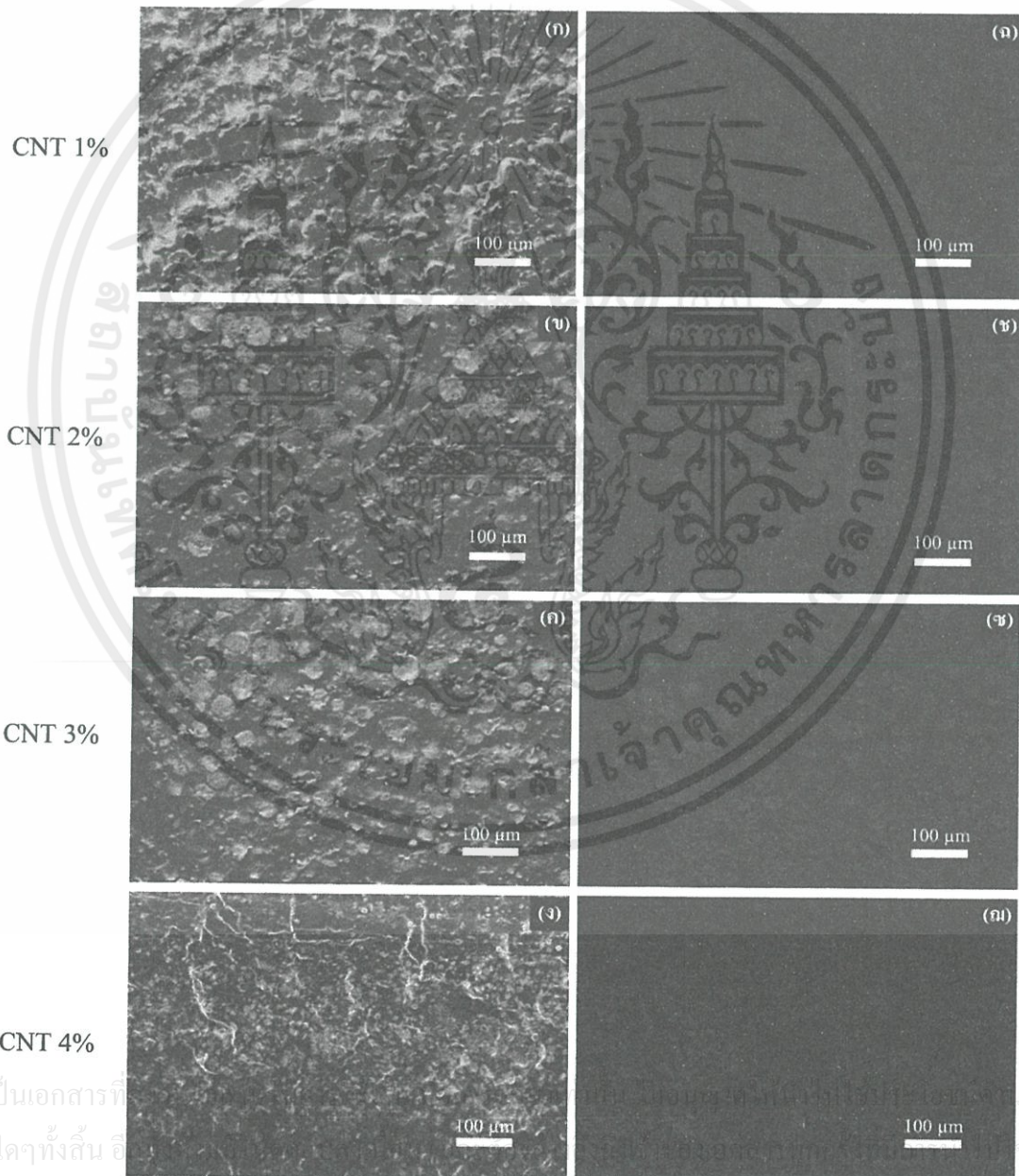


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เป็นภาพแบบ (SE) (ก),(ข),(ค),(ง),(จ) และ ภาพแบบ (BSE) (ฉ),(ช),(ฅ),(ญ) ของรอยหักวัสดุผสม PDMS-BT เมื่อมีการปรับปริมาณ BT ที่ (ก),(ฉ) 10% (ข),(ช) 20% (ค),(ฅ) 30% (ง),(ฅ) 40% (จ),(ญ) 50%

#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบสถานะยานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องของวัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

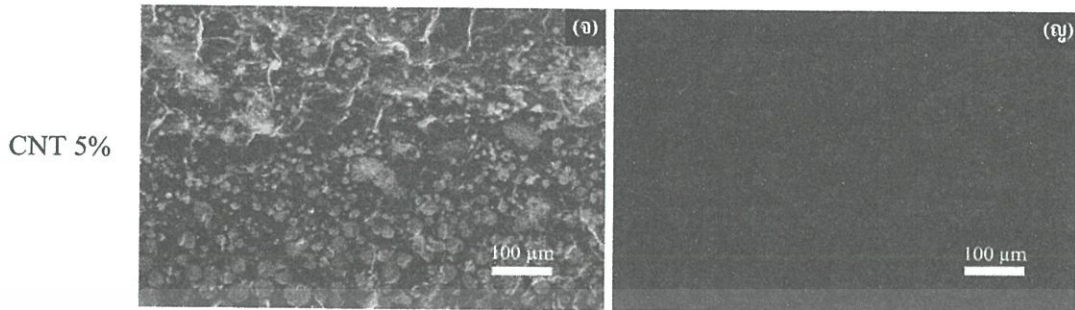
เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและมีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้จากการนำไปหักในไนโตรเจนเหลว มาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณรอยหักของวัสดุผสม ซึ่งมีการปรับปริมาณแท่งนาโนคาร์บอน 1% 2% 3% 4% 5% ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก)-(ญ) ซึ่งภาพ (ก)-(จ) เป็นภาพแบบ Secondary electron (SE) และ (ฉ)-(ญ) เป็นภาพแบบ

Backscattered electron (BSE) โดยการเติมผงนาโนคาร์บอนเข้าไปนั้นเพื่อต้องการให้แบเรียมไททานตเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น และไม่เกิดการตกตะกอน ซึ่งผลที่ได้จากการส่องภาพ SEM จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงนาโนคาร์บอนมากขึ้น จะทำให้แบเรียมไททานตเกิดการกระจายตัวดีขึ้น และการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) น้อยลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบภาพ (ก),(ข) ที่มีการเติมผงนาโนคาร์บอน 1% และภาพ (จ),(ฉ) ที่มีการเติมผงนาโนคาร์บอนที่ 5 % จะเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคแบเรียมไททานตมีขนาดลดลง โดยที่ผงนาโนคาร์บอน 1% อนุภาคแบเรียมไททานตจะมีขนาด 30-60 ไมโครเมตร แต่เมื่อมีการเติมผงนาโนคาร์บอน 5% ขนาดอนุภาคของแบเรียมไททานตจะมีขนาดประมาณ 10-20 ไมโครเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อี

การ  
การ



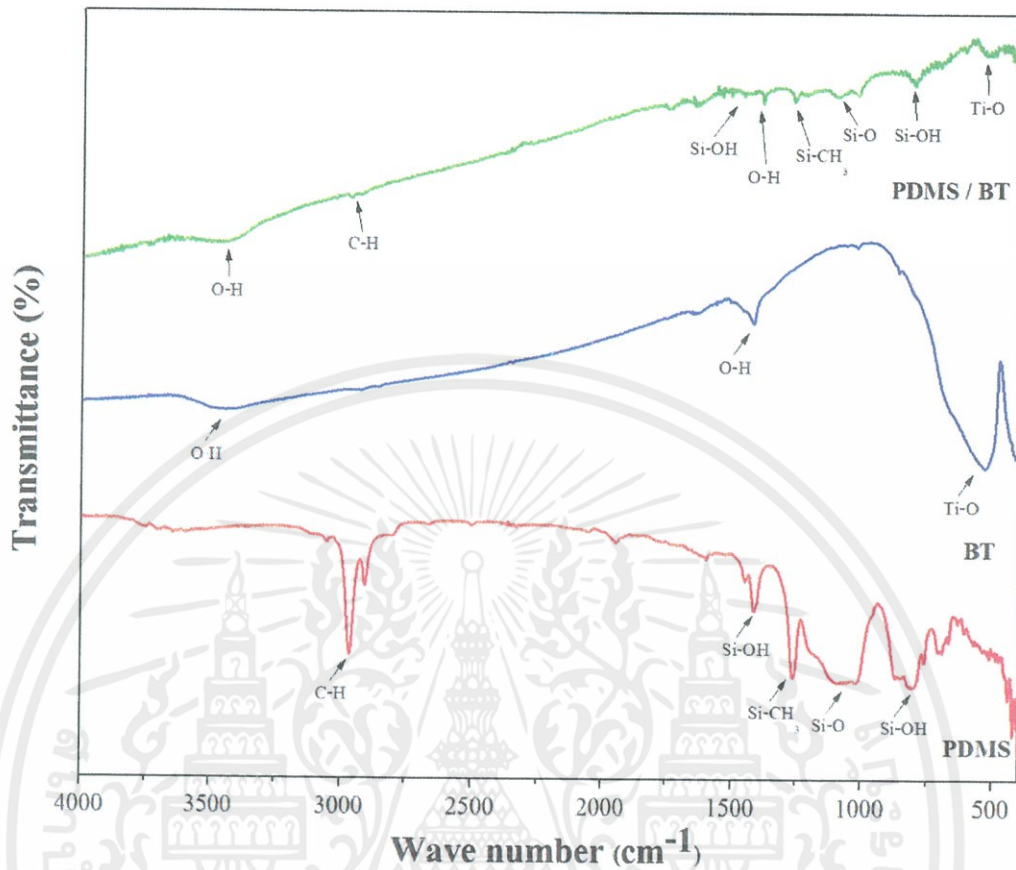
**รูปที่ 4.4** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เป็นภาพแบบ SE (ก),(ข),(ค),(ง),(จ) และ ภาพแบบ BSE (ฉ),(ช),(ซ),(ฅ),(ฉ) ของรอยห้กวัสดุผสม PDMS-BT-CNT เมื่อมีการปรับปริมาณ CNT ที่ (ก),(ค) 1% (ข),(ช) 2% (ค),(ซ) 3% (ง),(ฉ) 4% (จ),(ญ) 5%

#### 4.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ( Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR )

##### 4.3.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

หลังจากการทำการเตรียมวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนแล้ว จากนั้นนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเริ่มจากนำวัสดุผสมมาอัดเป็นเม็ดร่วมกับ โพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide, KBr) ซึ่งโพแทสเซียมโบรไมด์ จัดเป็นสารเนื้อขยอมนให้คลื่นรังสีอินฟราเรดผ่านได้และมีช่วงคลื่นอินฟราเรดที่กว้างกว่าสารอื่น ๆ ที่มีสมบัติเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



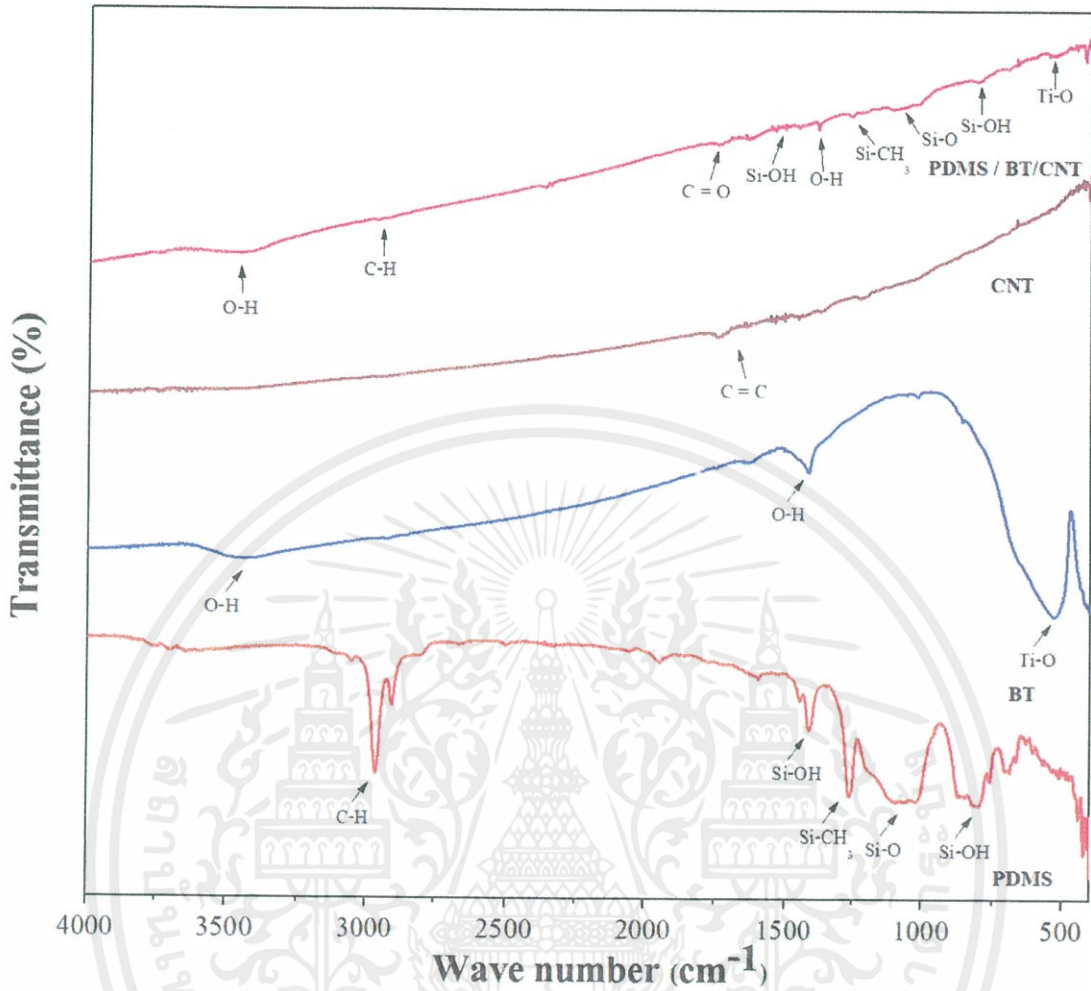
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของวัสดุผสมที่ BT 50 % กับ PDMS 50 %

จากรูปที่ 4.5 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอคเซน พบว่าสเปกตรัมแสดงพีคที่เลขคลื่นประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  และเลขคลื่นประมาณ  $1630\text{ cm}^{-1}$  และที่เลขคลื่นประมาณ  $1384\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) อันเนื่องมาจากความชื้นและสารอแกนิก ในสารละลายพอลิเมอร์ และพบพีคการสั่นของ (Ti-O stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $539\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบเรียมไททานเนต นอกจากนี้ยังพบพีคการสั่นของพันธะภายในพอลิเมอร์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่  $1000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  โดยพบพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ  $2963\text{ cm}^{-1}$  ของ ( $\text{CH}_3$  stretching) และพีคการสั่นของ (Si-OH bending) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1412\text{ cm}^{-1}$  อีกทั้งยังพบพีคการสั่นของ (Si- $\text{CH}_3$  stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1251\text{ cm}^{-1}$  และพีคการสั่นของ (Si-O stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1091\text{ cm}^{-1}$  โดยแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไดเมทิลไซลอคเซน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดังกล่าวประกอบด้วย 2 เฟสคือ เฟสของเซรามิกแบเรียมไททานเนตและเฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลไซลอคเซน ผสมกันอยู่ โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม

#### 4.3.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

จากนั้นทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จากรูปที่ 4.6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน มีแนวโน้มเดียวกับของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนคือพบพีคที่เลขคลื่นประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  และเลขคลื่นประมาณ  $1630\text{ cm}^{-1}$  และที่เลขคลื่นประมาณ  $1384\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) อันเนื่องมาจากความชื้นและสารออกเนกิก ในสารละลายพอลิเมอร์ และพบพีคการสั่นของ (Ti-O stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $539\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบบเรียมไททานเนต นอกจากนี้ยังพบพีคการสั่นของพันธะภายในพอลิเมอร์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่  $1000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  โดยพบพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ  $2963\text{ cm}^{-1}$  ของ ( $\text{CH}_3$  stretching) และพีคการสั่นของ (Si-OH bending) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1412\text{ cm}^{-1}$  อีกทั้งยังพบพีคการสั่นของ (Si- $\text{CH}_3$  stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1251\text{ cm}^{-1}$  และพีคการสั่นของ (Si-O stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1091\text{ cm}^{-1}$  โดยแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน นอกจากนี้พบว่าพบพีคการสั่นของพันธะ (C = C stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1680\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในแท่งนาโนคาร์บอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดังกล่าวประกอบด้วย 3 เฟส คือ เฟสของเซรามิกแบบเรียมไททานเนต เฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



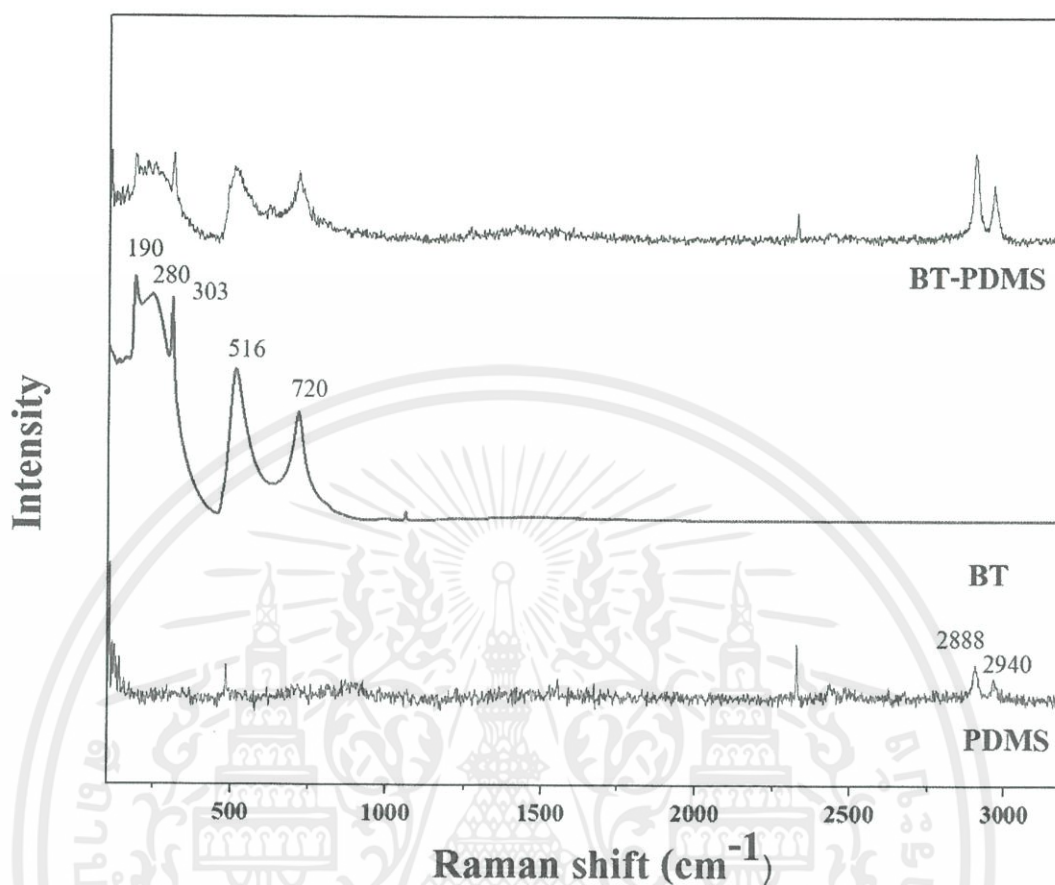
รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของวัสดุผสมที่ BT 50% PDMS 50% CNT 5%

#### 4.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

##### 4.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสมแบเรียมไททานตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

นำวัสดุผสมแบเรียมไททานตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ที่เตรียมได้มาทำการทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน เพื่อยืนยันโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดในช่วง  $100 - 3200 \text{ cm}^{-1}$  ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



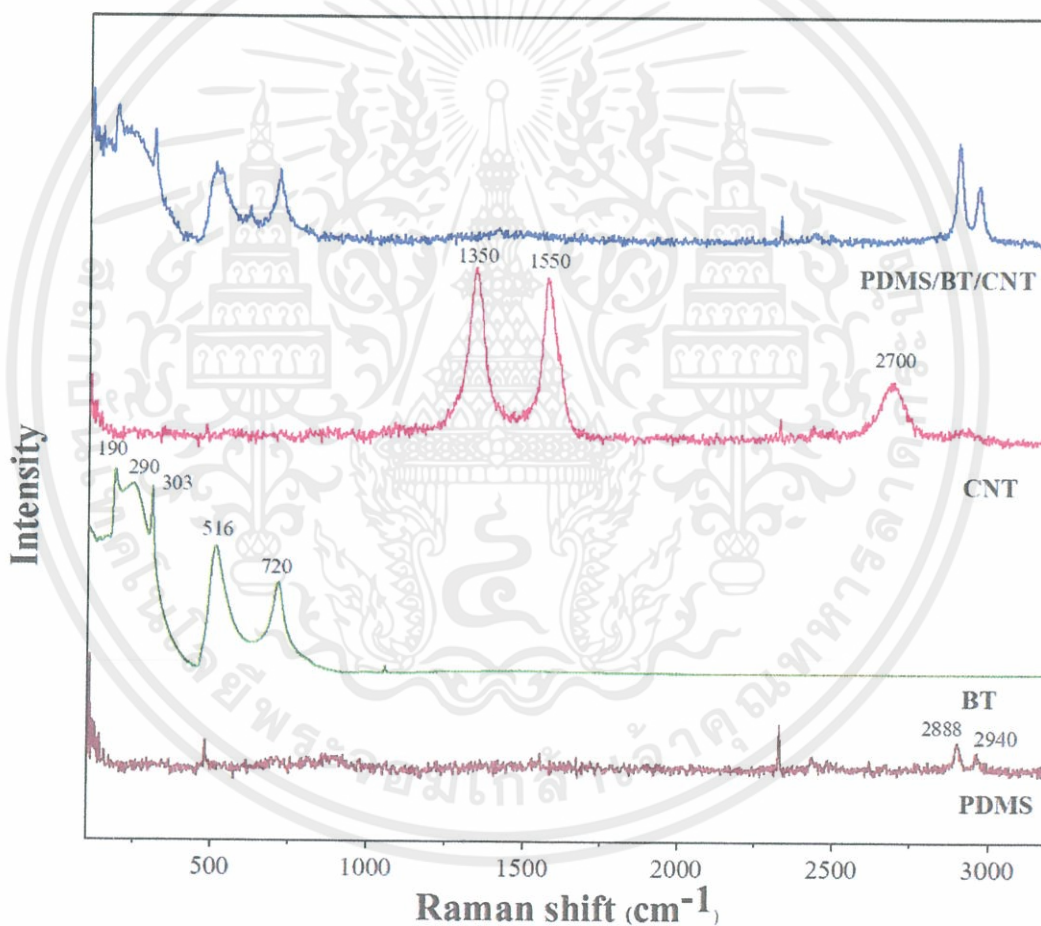
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสเปกตรัมของ โครงสร้างของวัสดุผสม BT 50% กับ PDMS 50%

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของโครงสร้างของวัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน จะพบพีกของแบเรียมไททานेटเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720  $\text{cm}^{-1}$  สอดคล้องกับผลรามานของ  $\text{BaTiO}_3$  (P4mm) แบบเตตระโกนอล คือ  $4E(\text{TO} + \text{LO}) + 3A_1(\text{TO} + \text{LO}) + B_1(\text{TO} + \text{LO})$  [47] ซึ่งพีกที่เลขคลื่น ประมาณ 190  $\text{cm}^{-1}$  สอดคล้องกับโหมด E(TO) เลขคลื่นประมาณ 140, 303 และ 640  $\text{cm}^{-1}$  คือโหมด E(LO) [47] เลขคลื่นประมาณ 280  $\text{cm}^{-1}$  คือโหมด  $A_1(\text{TO})$  และโหมด E(TO) [47] เลขคลื่นประมาณ 520  $\text{cm}^{-1}$  เป็นโหมด E(TO) และ  $A_1(\text{TO})$  เลขคลื่นประมาณ 720  $\text{cm}^{-1}$  คือโหมด  $A_1(\text{LO}) + E(\text{LO})$  [48] นอกจากนี้ยังมีพีกที่เลขคลื่นประมาณ 303  $\text{cm}^{-1}$  สอดคล้องกับ  $E(3\text{TO}) + E(2\text{LO}) + B_1$  [47] และพบพีกของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888  $\text{cm}^{-1}$  และ 2940  $\text{cm}^{-1}$  โดยแสดงถึงความเข้มของพีกอสมมาตร (Asymmetric) ถึงสมมาตร (Symmetric) ของการสั่นของพันธะไฮโดรเจนของหมู่เมทิล ( $\text{CH}_3$ ) [20] โดยแสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่ได้เป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย 2 เฟส คือ เฟสของเซรามิกแบเรียมไททานेटและเฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ผสมกันอยู่

โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

#### 4.4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

หลังจากนั้นนำวัสดุผสมแบเรียมไททานเต พอลิไคเมทิลไซลอคเซนและแท่งนาโนคาร์บอน ที่เตรียมได้มาทำการทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน เพื่อยืนยันโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดในช่วง  $100 - 3200 \text{ cm}^{-1}$  ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะสเปกตรัมของโครงสร้างของวัสดุผสม BT 50% PDMS 50% CNT 5%

จากรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของโครงสร้างของวัสดุผสมแบเรียมไททานเต พอลิไคเมทิลไซลอคเซนและแท่งนาโนคาร์บอน การแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบเรียมไททานเต พอลิไคเมทิลไซลอคเซนและแท่งนาโนคาร์บอน มีแนวโน้มเดียวกับของวัสดุ

ผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยพบพีคของแบเรียมไททานเนตเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720  $\text{cm}^{-1}$  สอดคล้องกับผลรามานของ  $\text{BaTiO}_3$  (P4mm) แบบเตตระโกนอล คือ  $4E(\text{TO} + \text{LO}) + 3A_1(\text{TO} + \text{LO}) + B_1(\text{TO} + \text{LO})$  [47] ซึ่งพีคที่เลขคลื่นประมาณ 190  $\text{cm}^{-1}$  สอดคล้องกับโหมด E(TO) เลขคลื่นประมาณ 140, 303 และ 640  $\text{cm}^{-1}$  คือโหมด E(LO) [47] เลขคลื่นประมาณ 280  $\text{cm}^{-1}$  คือโหมด  $A_1(\text{TO})$  และโหมด E(TO) [47] เลขคลื่นประมาณ 520  $\text{cm}^{-1}$  เป็นโหมด E(TO) และ  $A_1(\text{TO})$  เลขคลื่นประมาณ 720  $\text{cm}^{-1}$  คือโหมด  $A_1(\text{LO}) + E(\text{LO})$  [48] นอกจากนี้ยังมีพีคที่เลขคลื่นประมาณ 303  $\text{cm}^{-1}$  สอดคล้องกับ  $E(3\text{TO})+E(2\text{LO})+B_1$  [47] และพบพีคของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888  $\text{cm}^{-1}$  และ 2940  $\text{cm}^{-1}$  โดยแสดงถึงความเข้มของพีคอสมมาตร (Asymmetric) ถึงสมมาตร (Symmetric) ของการสั่นของพันธะไฮโดรเจนของหมู่เมทิล ( $\text{CH}_3$ ) [20] แต่จะพบพีคของแท่งนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1350, 1550, 2700  $\text{cm}^{-1}$  โดยที่บริเวณ 1350  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ  $\text{sp}^2$  ของคาร์บอน จะเรียกการสั่นแบบนี้ว่า D-Band และพบบริเวณการสั่นที่ 1550 ซึ่งจะพบใน Graphite ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างดี จะเรียกแถบนี้ว่า G-Band [49] โดยแสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่ได้เป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย 3 เฟส คือเฟสของเซรามิกแบเรียมไททานเนต เฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

#### 4.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม

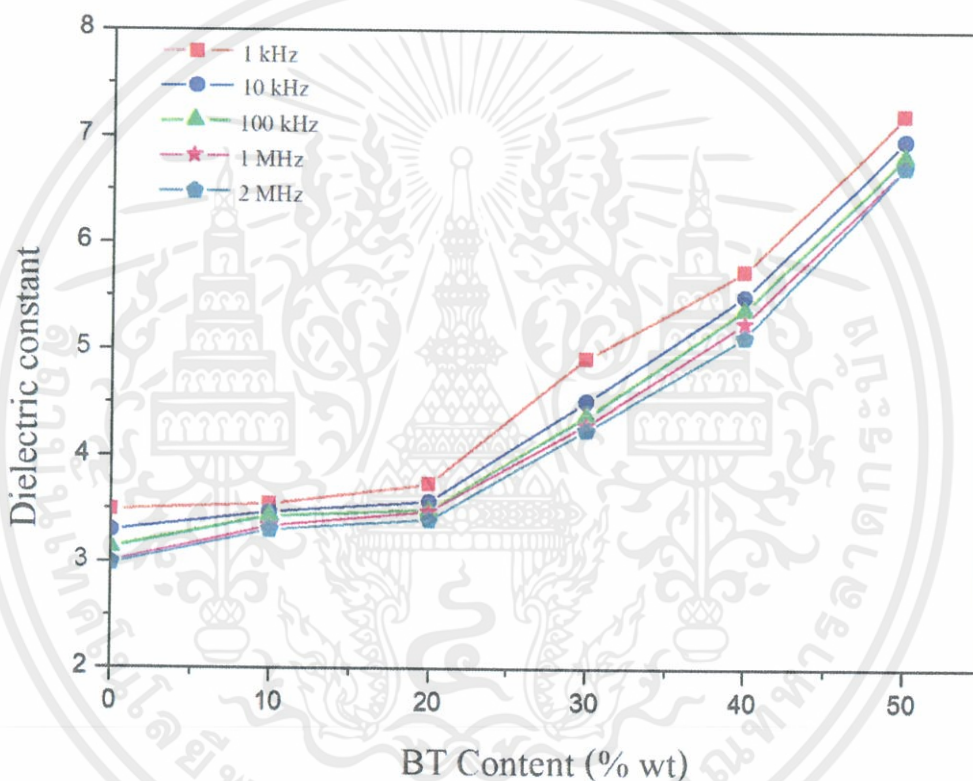
##### 4.5.1 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 kHz PDMS มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 3.49 ซึ่งเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุดของระบบนี้และเมื่อเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททานเนต จะส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 7.206 ในวัสดุผสมที่มีปริมาณของแบเรียมไททานเนต 50% ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ R.K.Goyal [35] ซึ่งได้รายงานไว้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททานเนต สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก จากรูปที่ 4.10 พบว่าที่ความถี่ 1 และ 10 kHz วัสดุผสมที่มีปริมาณของแบเรียมไททานเนต 50% จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 100 kHz และ 1, 2 MHz วัสดุผสมจะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมากที่สุดเมื่อมีแบเรียมไททานเนต 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่นอบนวดไปนโนไปให้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

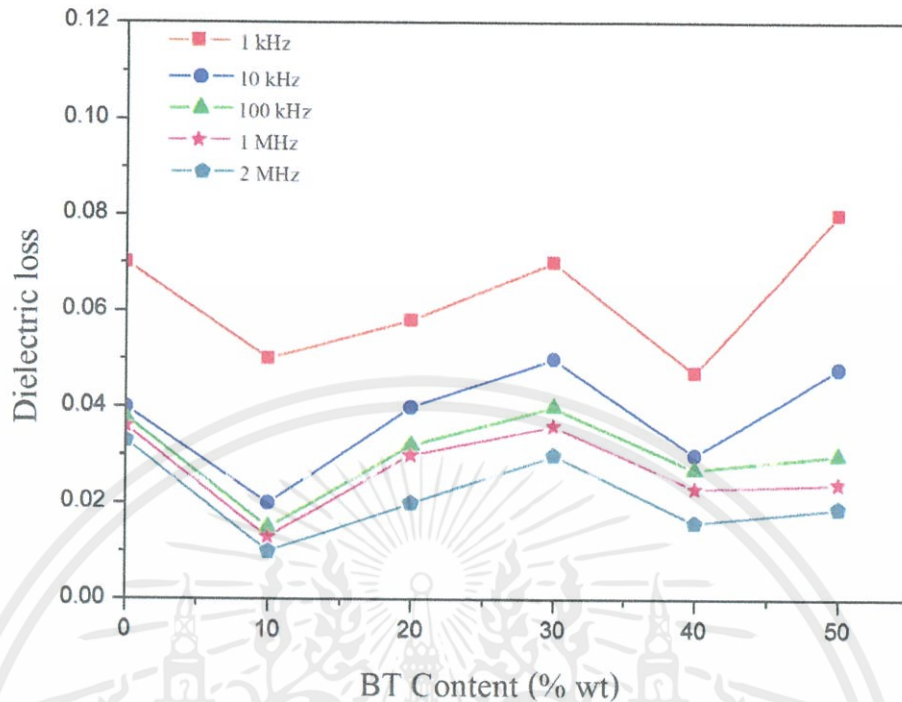
นอกจากนี้ยังพบว่าทุก ๆ ความถี่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเฟสของแบเรียมไททานเนต 10% - 30%

จากผลการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่เตรียมได้ พบว่าวัสดุผสมในทุกอัตราส่วนแสดงพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่คล้ายคลึงกัน โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกพบว่าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของปริมาณของ BT ที่ผสมในวัสดุผสมที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



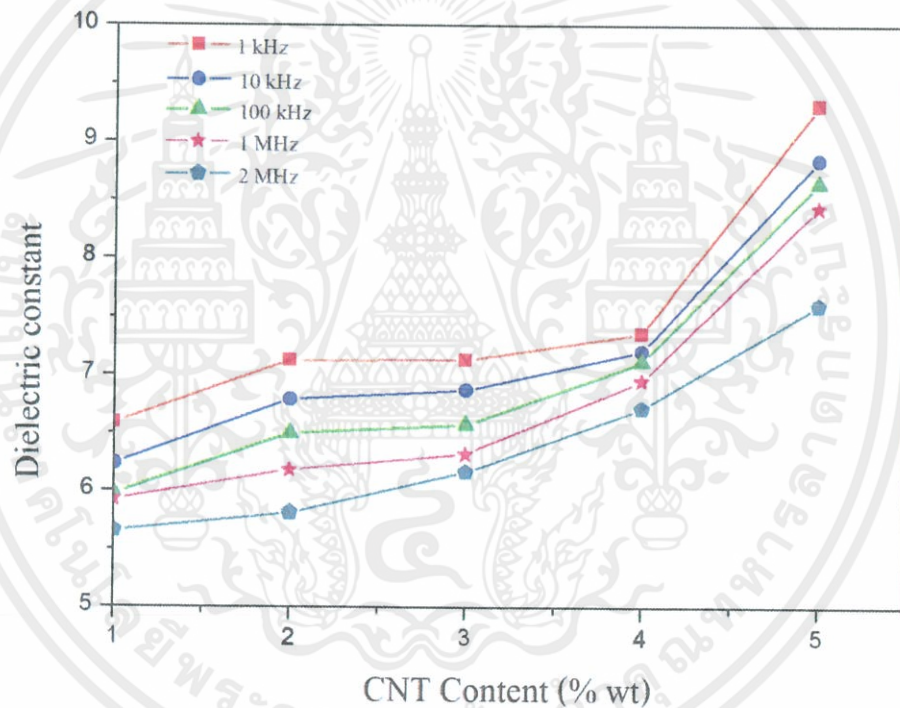
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของปริมาณของ BT ที่ผสมในวัสดุผสม ที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

#### 4.5.2 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดมethylไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

เนื่องจากการทดลองพบว่า วัสดุผสมแบเรียมไททาเนตที่ 50% กับพอลิไดมethylไซลอคเซน จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด จึงได้นำวัสดุผสมสูตรนี้ไปการทดลองต่อโดยการผสมแท่งนาโนคาร์บอน ลงไปด้วยอัตราปริมาณที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 kHz พบว่า วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแท่งนาโนคาร์บอน จะส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 9.134 ในวัสดุผสมที่มีปริมาณของแท่งนาโนคาร์บอน 5% ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang-Rong Yu [30] ซึ่งได้รายงานไว้ว่า วัสดุผสมจาก พอลิเอทิลีน แบเรียมไททาเนตและแท่งนาโนคาร์บอน จะมีค่าไดอิเล็กทริกที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของทั้งแบเรียมไททาเนตและแท่งนาโนคาร์บอนลงไป ในวัสดุผสม ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมแท่งนาโนคาร์บอน ทำให้วัสดุผสมมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มการเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาค (Percolation) ให้กับวัสดุผสมจึงทำให้เมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอนในวัสดุผสม ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมจึงมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก จากรูป 4.12 พบว่าที่ความถี่ 1 kHz วัสดุผสมที่มีปริมาณของแท่งนาโนคาร์บอน 3% จะ

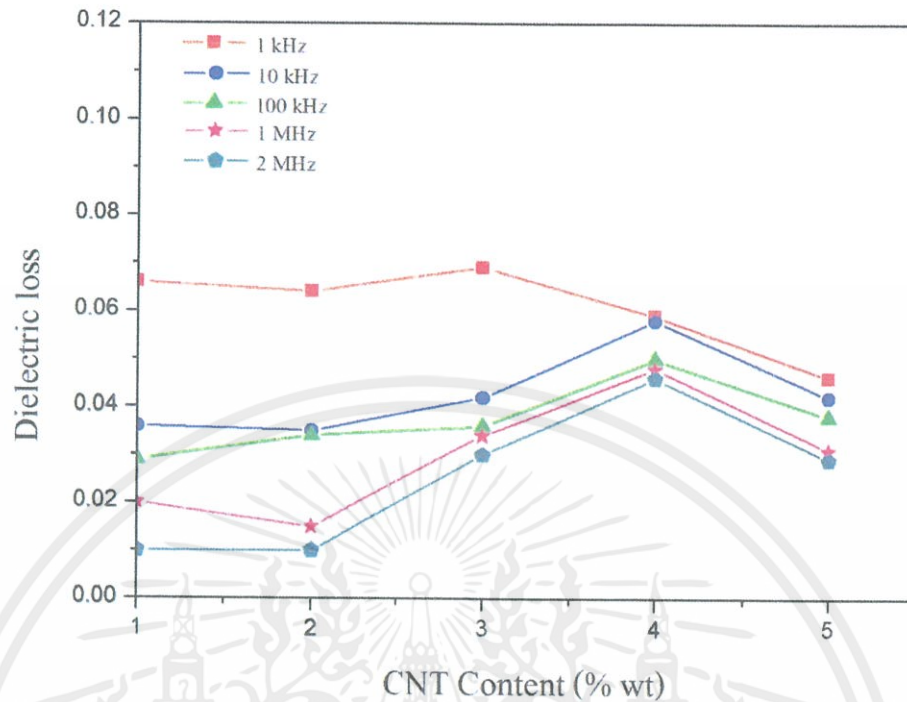
มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงที่สุด โดยมีค่าโดยประมาณ 0.059 แต่วัสดุผสมที่มีปริมาณของแท่ง นาโนคาร์บอน 5% จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกต่ำที่สุด มีค่าโดยประมาณ 0.046 นอกจากนี้ยังพบว่าที่ 10 kHz 100 kHz 1 MHz และ 2 MHz วัสดุผสมจะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมากที่สุดเมื่อมีแท่งนาโนคาร์บอน 4%

จากผลการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่เตรียมได้ พบว่าวัสดุผสมในทุกอัตราส่วนแสดงพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่คล้ายคลึงกัน โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกพบว่าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของปริมาณของ CNT ที่ผสมในวัสดุผสมที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



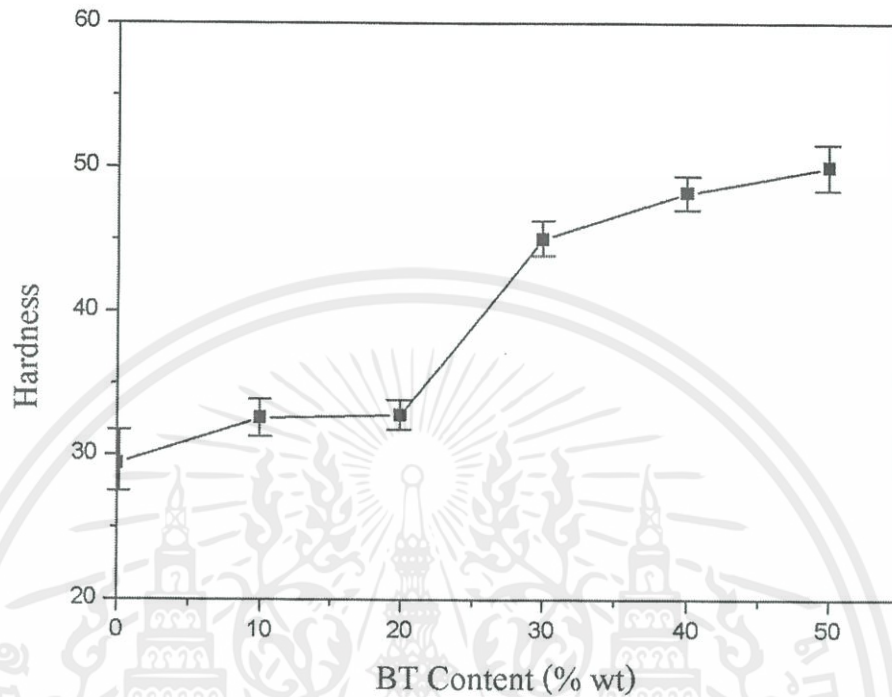
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงการสูญเสียไดอิเล็กทริกของปริมาณของ CNT ที่ผสมในวัสดุผสมที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

#### 4.6 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Test) ของวัสดุผสม

##### 4.6.1 การทดสอบค่าความแข็งของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน มาทำการทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งชนิด Shore A โดยใช้แรงกด 4000 กรัม พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อผสมปริมาณของแบเรียมไททาเนตลงในพอลิไคเมทิลไซลอคเซน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ชิ้นงานพอลิไคเมทิลไซลอคเซน บริสุทธิ์จะมีค่าความแข็งต่ำสุดที่ค่าประมาณ 29 แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแบเรียมไททาเนต จะทำให้ค่าความแข็งของวัสดุผสมสูงขึ้น วัสดุผสมที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนต 50 % จะมีค่าความแข็งสูงสุดที่ค่าประมาณ 50 จึงเป็นผลทำให้วัสดุผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมไททาเนตในวัสดุผสม ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากค่าความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นจากการเติม BT ดังจะเห็นได้จากภาพ SEM ที่ปริมาณ BT 50% จะมีการเกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อนของผลึก BT มากที่สุด ค่าความแข็งจึงสูงขึ้นตามปริมาณ BT ที่ผสมลงไปในวัสดุผสม และการเปลี่ยนแปลงพันธะระหว่างผลึกกับผลึก หรือผลึกกับบอตันฐานที่อยู่ใกล้กัน และรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับเฟสในเซรามิกในวัสดุผสม หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการแข็งขึ้นหรืออ่อนลงของวัสดุผสมนั้นเกิดจากเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโน (Agglomeration) เมื่อเติมเฟสนาโนของ

แบเรียมไททานเตเข้าไปในเมทริกซ์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน รวมถึงค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลนั้นเช่นกัน

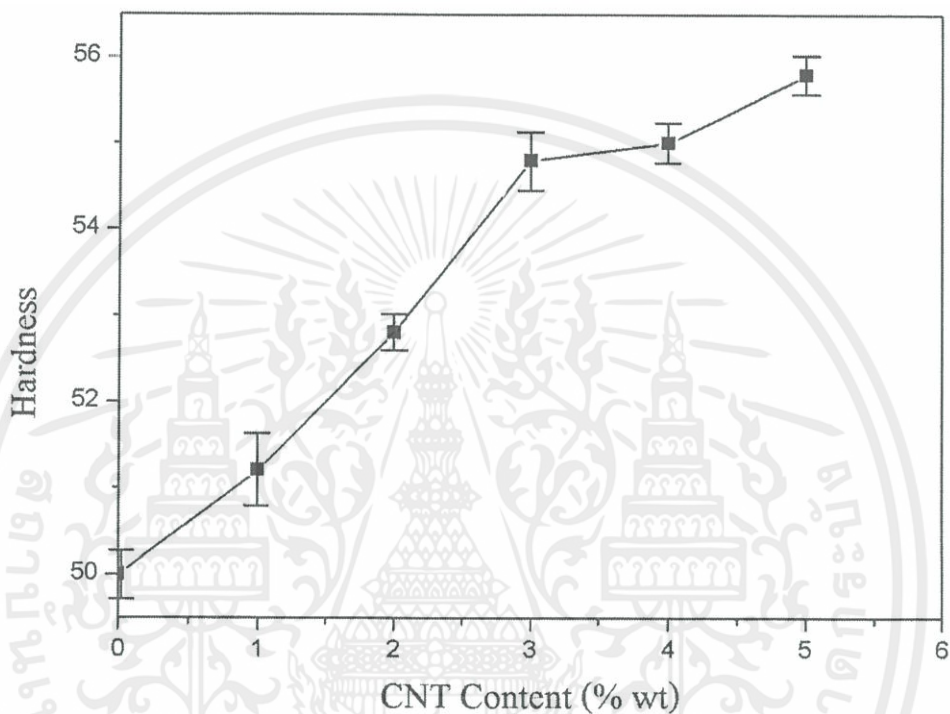


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของปริมาณ BT ที่ผสมในวัสดุผสม

#### 4.6.2 การทดสอบค่าความแข็งของวัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมของแบเรียมไททานเต 50% กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน 50% จะเห็นว่าค่าความแข็งของวัสดุสูงสุดโดยมีค่า 50 และเมื่อได้นำวัสดุผสมสูตรนี้มาผสมกับแท่งนาโนคาร์บอน ในปริมาณที่ต่างกันมาทำการทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งชนิด Shore A โดยใช้แรงกด 4000 กรัมพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอนลงในวัสดุผสมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับแบเรียมไททานเต 50% ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าวัสดุผสมที่เติมแท่งนาโนคาร์บอน 1 % จะมีค่าความแข็งที่ต่ำสุด โดยมีค่าประมาณ 51 แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนลงในวัสดุผสม จะทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้น วัสดุผสมที่เติมแท่งนาโนคาร์บอน 5 % ลงไปจะมีค่าความแข็งสูงขึ้นอย่างมาก โดยมีค่าประมาณ 56 จึงเป็นผลทำให้วัสดุผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากความเป็นผลึกของแท่งนาโนคาร์บอน ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน จึงมีความแข็งแรง ความทนทานต่อการแตกหักและแรงกดอัดสูงมาก เมื่อรวมลงไปวัสดุผสมจึงทำวัสดุผสมมีค่าความแข็งมากขึ้น และการผสมแท่งนาโนคาร์บอนลงในวัสดุผสมจะช่วยในการกระจายตัวของแบเรียมไททานเต ในเมทริกซ์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน

ให้ดีขึ้น ดังจะเห็นจากภาพ SEM ที่ CNT 5% จะมีการกระจายตัวของ BT ในวัสดุผสม มากกว่าที่ CNT 0% ส่งผลทำให้วัสดุผสมสามารถกระจายแรงได้มากขึ้น วัสดุผสมจึงมีค่าความแข็งสูงขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมเฟสเท่งนาโนคาร์บอน และแบเรียมไททานเนตเข้าไปในเมทริกซ์พอลิโคมเทิลไซลอกเซน รวมถึงค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมจึงส่งผลต่อค่าความแข็งเช่นกัน



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของปริมาณ CNT ที่ผสมในวัสดุผสม

#### 4.7 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของวัสดุผสม

หลังจากการทำเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมเทิลไซลอกเซน และวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมเทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยเท่งนาโนคาร์บอนให้เป็นชิ้นงานรูปคัมเบลแล้ว จากนั้นจะนำมาทดสอบแรงดึง ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

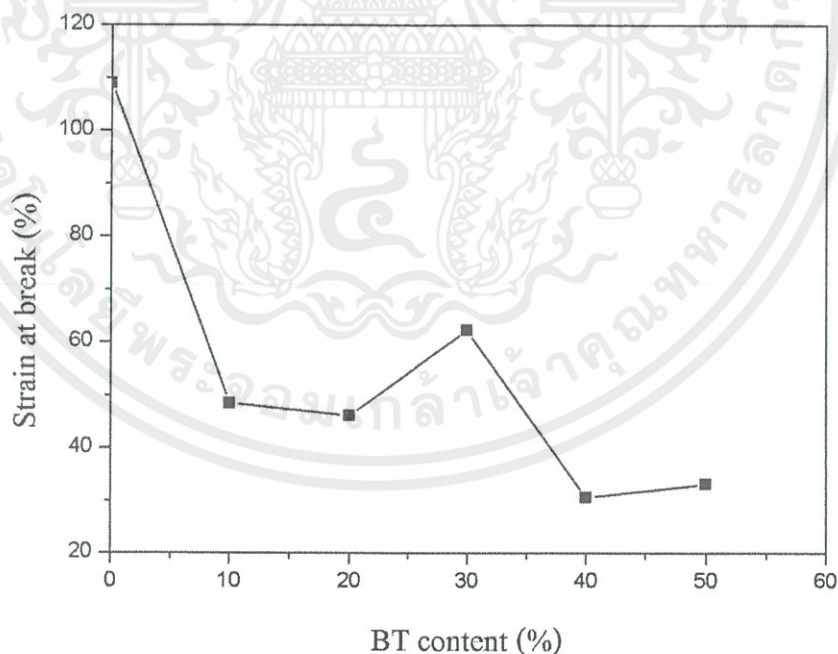
##### 4.7.1 ความเครียด (Strain) ของวัสดุผสม

###### 4.7.1.1 ค่าความเครียดของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมเทิลไซลอกเซน

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมเทิลไซลอกเซนซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยพบว่าวัสดุผสมแบเรียม

ไททานเนตที่ 0 % มีค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุมากที่สุด คือ 108 และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแบเรียมไททานเนตค่าความเครียด ณ จุดขาดจะลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าน้อยที่สุดในวัสดุผสมพอลิไคเมทิลไซลอกเซน กับแบเรียมไททานเนตที่ 40% ซึ่งมีค่าประมาณ 30 คาดว่าอาจจะเป็นผลมาจากค่าความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นจากการเติมแบเรียมไททานเนตลงไป และการเปลี่ยนแปลงพันธะระหว่างผลึกกับผลึก หรือผลึกกับอสัณฐานที่อยู่ใกล้กัน และรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับเฟสในเซรามิกในวัสดุผสมที่เพิ่มมากขึ้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการแข็งขึ้นของวัสดุผสมนั้นสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมเฟสแบเรียมไททานเนตเข้าไปในเมทริกซ์พอลิไคเมทิลไซลอกเซน จึงส่งผลทำให้ค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมจะลดลง

นอกจากนี้ที่วัสดุผสมพอลิไคเมทิลไซลอกเซนกับแบเรียมไททานเนตที่ 30% กับที่ 50% มีค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมประมาณ 62 กับ 33 ซึ่งมีค่าไม่เป็นไปตามเฟสที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมไททานเนต คาดว่าอาจจะเป็นผลจากการกระจายตัวที่ไม่เสมอของแบเรียมไททานเนตในตัวของชิ้นงานวัสดุผสม เพราะเมื่อผสมแบเรียมไททานเนตเข้าไปมากจะทำให้เกิดการเกาะรวมกันเป็นกลุ่มของแบเรียมไททานเนตในเมทริกซ์พอลิไคเมทิลไซลอกเซน ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง จึงทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซนที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนได้



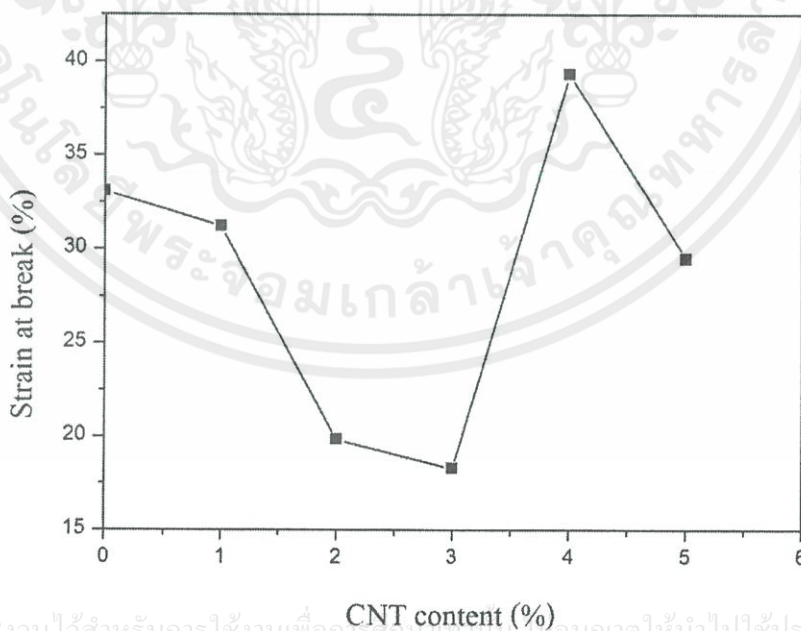
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ณ จุดขาดกับปริมาณของ BT ที่ผสมในวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้งาน หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2.2 ค่าความเครียดของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

เมื่อนำแท่งนาโนคาร์บอนในอัตราที่ต่าง ๆ กัน ไปผสมในวัสดุผสมที่มีพอลิไคเมทิลไซลอกเซน กับแบเรียมไททานเนต 50% ได้ผลของค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุดังรูปที่ 4.16 โดยพบว่าเมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอนลงในวัสดุผสมตั้งแต่ 0, 1, 2 และ 3 % ลงไปจะส่งผลทำให้ค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมมีค่าลดลง 36, 32, 20 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากที่ แท่งนาโนคาร์บอนเป็นผลึกเมื่อนำไปผสมในวัสดุผสมจะทำให้วัสดุผสมมีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุผสมก็จะน้อยลง การเปลี่ยนแปลงพันธะระหว่างผลึกของ แท่งนาโนคาร์บอนและแบเรียมไททานเนตกับขั้วของพอลิเมอร์ จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวของพันธะแย่ง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุผสมนั้นจะแปลผลผันกับโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมเฟสแท่งนาโนคาร์บอนเข้าไปในวัสดุผสม

นอกจากนี้จะพบว่าเมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอนลงในวัสดุผสมตั้งแต่ 4% และ 5 % ที่ผสมลงไปวัสดุผสมได้ผลค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากแท่งนาโนคาร์บอนที่ผสมลงไปจะไปช่วยให้แบเรียมไททานเนตกระจายตัวที่ดียิ่งขึ้น การเกาะกลุ่มกัน ณ บริเวณโคบริเวณหนึ่งของแบเรียมไททานเนตจึงลดลง ดังที่สังเกตได้จากภาพ SEM จึงส่งผลทำให้วัสดุผสมสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำได้มากขึ้น ค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมจึงมีค่าสูงขึ้นด้วย

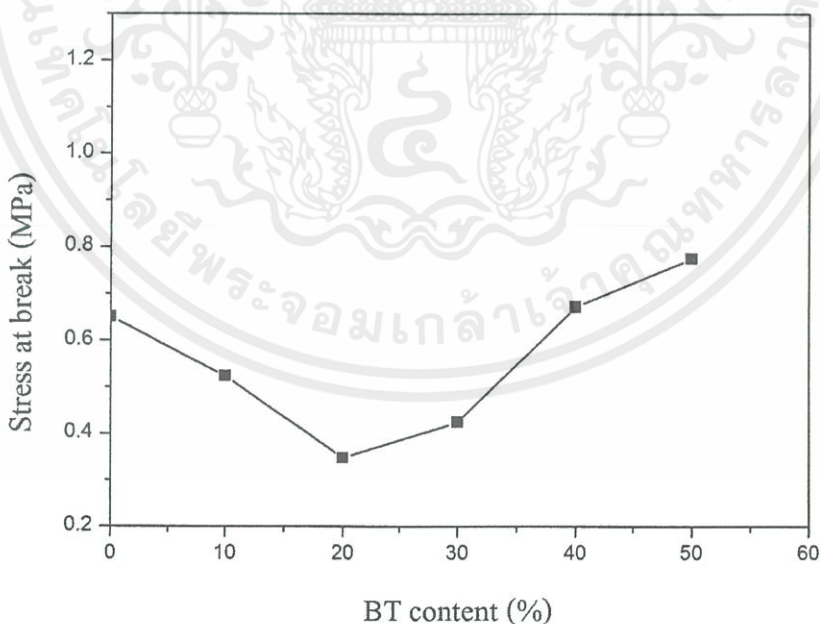


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.16** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ณ จุดขาดกับปริมาณของ CNT ที่ผสมในวัสดุผสม

## 4.7.2 ความเค้น (Stress) ของวัสดุผสม

### 4.7.2.1 ค่าความเค้นของวัสดุผสมเบเรียมไททานเนตกับพอลิโพรพิลีนไฮดรอกซี

ความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสม เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถด้านทานแรงภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของวัสดุผสมเบเรียมไททานเนตกับพอลิโพรพิลีนไฮดรอกซี จากรูปที่ 4.17 จะแสดงให้เห็นว่าที่เบเรียมไททานเนต 0% จะมีค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมประมาณ 0.65 MPa แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเบเรียมไททานเนตลงในวัสดุผสมจะทำให้ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมลดน้อยลงโดยที่เบเรียมไททานเนต 10% และ 20% จะมีค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุประมาณ 0.5 MPa และ 0.35 MPa ตามลำดับ คาดว่าเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเฟสเบเรียมไททานเนตในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนไฮดรอกซี ที่จะรวมตัวกันในบริเวณใด ณ บริเวณหนึ่งมากเกินไป จึงส่งผลให้การทดลองคาดเคลื่อนได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเบเรียมไททานเนตให้สูงกว่า 20% ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมจะมีค่าสูงขึ้น โดยที่เบเรียมไททานเนตที่ 30%, 40% และ 50% จะมีค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมสูงขึ้นเรื่อย ๆ 0.4, 0.65 และ 0.8 MPa ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีขึ้นของเฟสเบเรียมไททานเนตที่เป็นเฟสเสริมแรงให้กับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนไฮดรอกซี ทำให้วัสดุผสมเบเรียมไททานเนตกับพอลิโพรพิลีนไฮดรอกซี มีความสามารถด้านทานแรงภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มากขึ้น ทำให้ความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้น

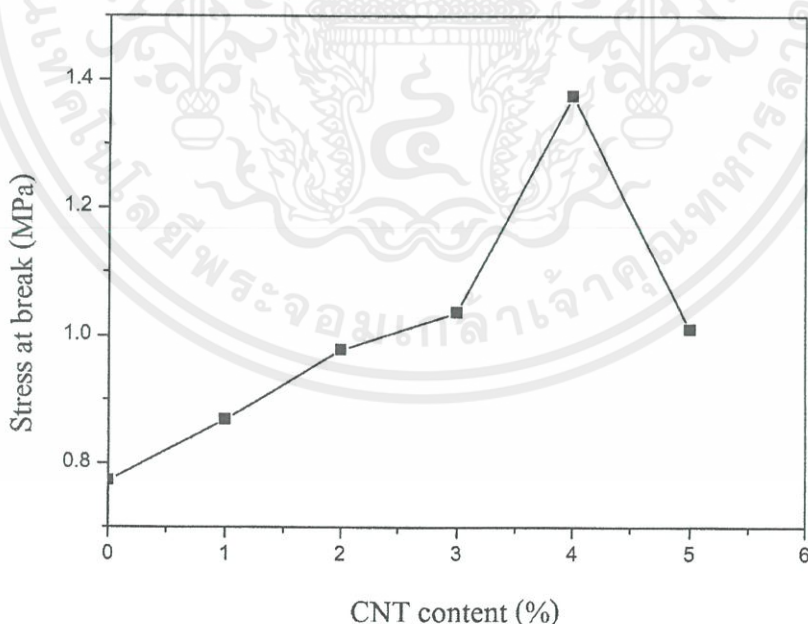


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ณ จุดขาดกับปริมาณของ BT ที่ผสมในวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2.2 ค่าความเค้นของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซน และปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

เมื่อวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนมาทำการทดสอบหาค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมได้ผลดังรูปที่ 4.19 จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนมากขึ้น ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มแท่งนาโนคาร์บอนมากขึ้น ความแข็งของวัสดุก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย แรงที่มากกระทำกับวัสดุให้ขาดออกจากกันจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมเมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอน 4 % ลงไปในวัสดุผสม ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.3 MPa เป็นผลมาจากแท่งนาโนคาร์บอนจะทำให้การกระจายตัวของแบเรียมไททานเนตซึ่งเป็นผลึกมีการกระจายตัวในพอลิไคเมทิลไซลอกเซนมากขึ้นการเกาะกลุ่มกัน ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งของแบเรียมไททานเนตจึงลดลง เมื่อแรงภายนอกมากระทำวัสดุผสมจะทำให้กระจายแรงได้ดีขึ้น ความสามารถต้านทานแรงภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอน แต่เมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอน 5 % ลงไปในวัสดุผสมกลับทำให้ ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมลดลงเนื่องจากปริมาณของแท่งนาโนคาร์บอนที่ผสมลงไปมากเกินไปจนส่งผลทำให้วัสดุผสมเกิดการเปราะ ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมจึงลดลง



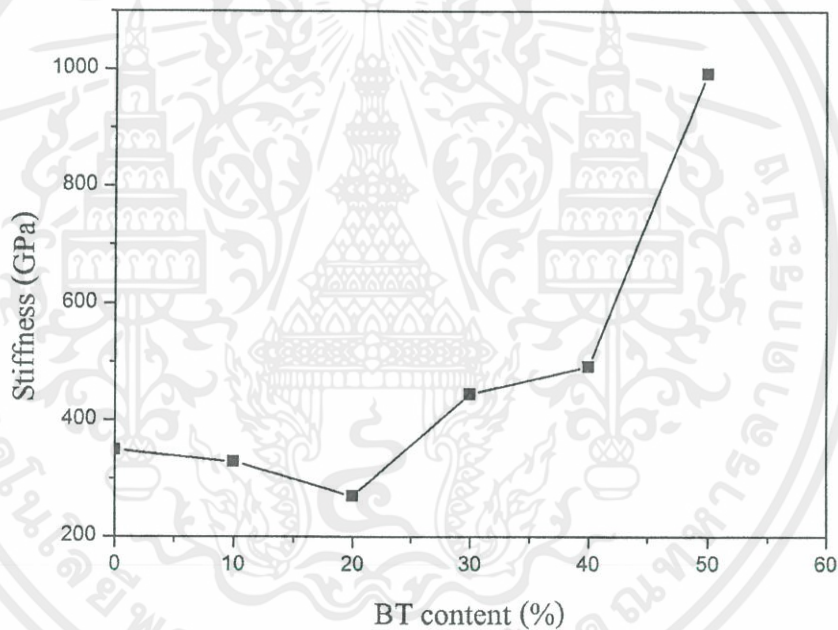
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ณ จุดขาดกับปริมาณของ CNT ที่ผสมในวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.3 ความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุผสม

##### 4.7.3.1 ค่าความแข็งแกร่งของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมทิลไซลอคเซน

เมื่อนำวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมทิลไซลอคเซนมาทำการทดสอบหาค่าความแข็งแกร่งโดยอัตราปริมาณของแบเรียมไททานเนตที่ผสมในวัสดุผสมแตกต่างกัน จะได้ผลดังรูปที่ 4.20 จากภาพจะแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแบเรียมไททานเนตมากยิ่งขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งแกร่งของวัสดุเพิ่มมากยิ่งขึ้น เนื่องมาจากแบเรียมไททานเนตเป็นเฟสของเซรามิกซึ่งจะเป็นเฟสช่วยเสริมแรงในพอลิโคมทิลไซลอคเซนมีผลทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแกร่งมากยิ่งขึ้น จึงส่งผลต่อค่าความแข็งแกร่งที่มีค่าสูงขึ้น โดยจุดที่มีค่าความแข็งแกร่งมากที่สุดคือจุดที่มีการเติมแบเรียมไททานเนต 50% มีค่าที่ 992.49 GPa

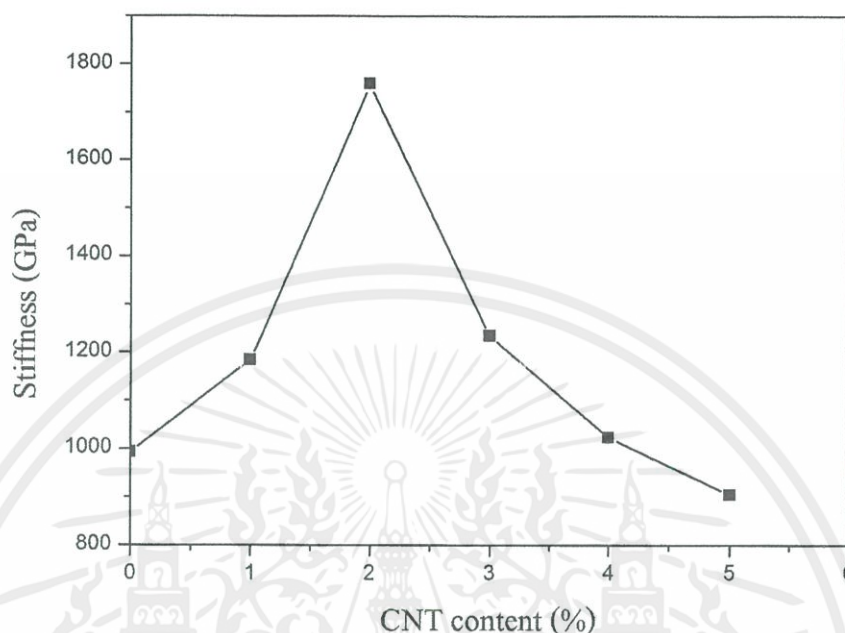


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแกร่งของปริมาณ BT ที่ผสมในวัสดุผสม

##### 4.7.3.2 ความแข็งแกร่งของวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

จากรูปที่ 4.21 วัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโคมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน แท่งนาโนคาร์บอนจะช่วยให้การกระจายตัวของเซรามิกแบเรียมไททานเนตในพอลิโคมทิลไซลอคเซน ทำให้มีการกระจายตัวดีขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนมากขึ้น ความสามารถในการรับแรงก็จะมากขึ้น เนื่องจากวัสดุมีความแข็งแกร่งมากยิ่งขึ้น

ซึ่งค่าที่รับแรงได้มากที่สุดคือ การเติมแท่งนาโนคาร์บอนที่ 2% แต่เมื่อเติมแท่งนาโนคาร์บอนมากกว่า 2% จะทำให้วัสดุมีความแข็งมากยิ่งขึ้น และเกิดการเปราะค่าความแข็งแรงจึงลดลง



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของปริมาณ CNT ที่ผสมในวัสดุผสม

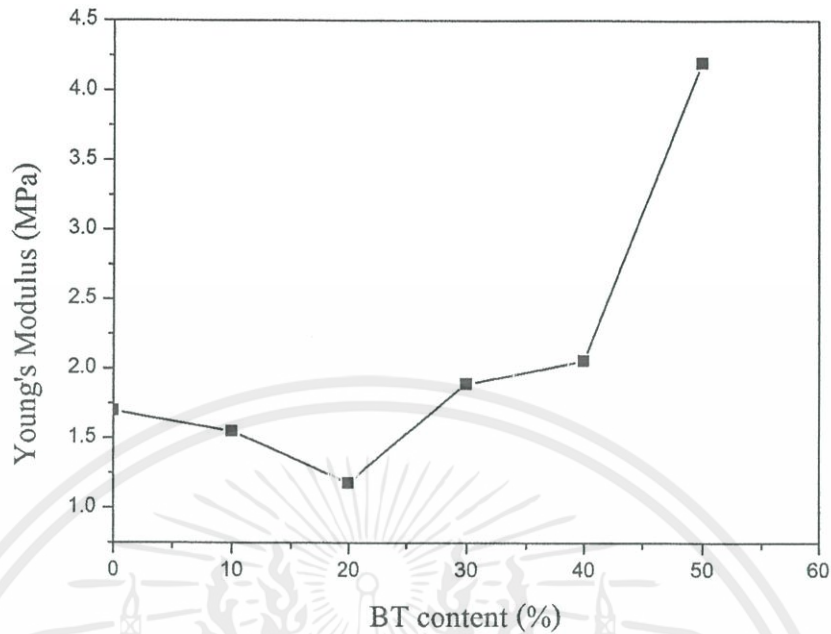
#### 4.7.4 ค่ามอดูลัส (Young's Modulus) ของวัสดุผสม

##### 4.7.3.1 ค่ามอดูลัสของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนตกับพอลิโอดีเมทิลไซลอกเซน

มอดูลัสยัง หรือมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity หรือ elastic modulus) เป็นค่าบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุ ค่ามอดูลัสของยังหาจากค่าลิมิตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นต่อความเครียดที่ค่าความเค้นน้อยสามารถหาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดลองดึง

จากรูปที่ 4.22 ค่าความเป็นมอดูลัสของยังของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนตกับพอลิโอดีเมทิลไซลอกเซน มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าความแข็งแรง เมื่อเพิ่มปริมาณของแบบเรียมไททานเนตแล้วนั้นแบบเรียมไททานเนตจะเป็นเฟสเสริมแรง ทำให้สามารถรับแรงหรือทนแรงของแรงที่มากกระทำได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้วัสดุแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุผสมจึงเพิ่มมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

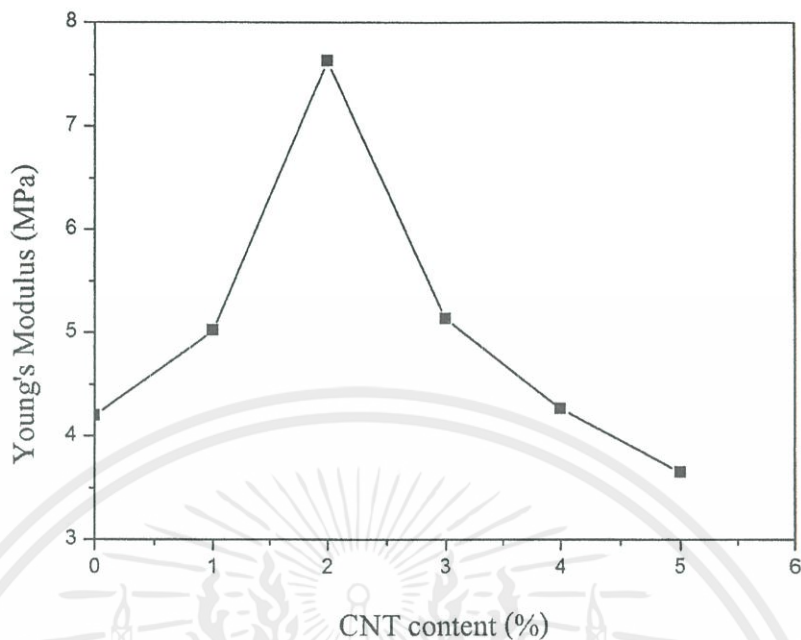


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสของปริมาณ BT ที่ผสมในวัสดุผสม

#### 4.7.4.2 ค่ามอดูลัสของวัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน เมื่อผสมแท่งนาโนแล้วแล้ว ค่ายังมอดูลัสจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 2 % มีค่าโดยประมาณ 7.0307 MPa เนื่องจากแท่งนาโนคาร์บอน จะช่วยให้แบเรียมไททานเตเกิดการกระจายตัวได้มากยิ่งขึ้นในเฟสของพอลิไคเมทิลไซลอคเซนซึ่งเมื่อการกระจายตัวดีขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแท่งนาโนคาร์บอนมากกว่า 2 % จะทำให้วัสดุเปราะค่ายังมอดูลัสลดต่ำลง จะสังเกตได้ ณ จุดที่มีการเติมแท่งนาโนคาร์บอน 3% ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของปริมาณ CNT ที่ผสมในวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองของวัสดุผสม BT/PDMS กับวัสดุผสม BT/PDMS/CNT

	BT/PDMS	BT/PDMS/CNT
<b>XRD</b>	พบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BT ซึ่งมีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ PDMS เนื่องจากมีความเป็นผลึกที่ต่ำ	พบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์คล้ายกับวัสดุผสม BT/PDMS นอกจากนี้ยังพบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CNT แต่สารตัวอย่างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม
<b>FT-IR</b>	พบว่าสเปกตรัมแสดงพีคของหมู่ไฮดรอกซิล, Ti-O stretching, CH <sub>3</sub> stretching, Si-OH bending, Si-CH <sub>3</sub> stretching, Si-O stretching ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมประกอบด้วย 2 เฟสคือ เฟสของเซรามิก BT และเฟสของพอลิเมอร์ PDMS	พบว่าสเปกตรัมแสดงพีคคล้ายกับวัสดุผสม BT/PDMS นอกจากนี้ยังพบว่าพบพีคการสั่นของพันธะ (C=C stretching) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดังกล่าวมีเฟสของ CNT เพิ่มขึ้นผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม
<b>Raman</b>	จะพบพีคของ BT เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720 cm <sup>-1</sup> นอกจากนี้ยังพบพีคของ PDMS เกิดเลขคลื่นประมาณ 2880 และ 2940 cm <sup>-1</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมประกอบด้วย 2 เฟส คือ เฟสของเซรามิก BT และเฟสของพอลิเมอร์ PDMS	จะพบพีคคล้ายกับวัสดุผสม BT/PDMS นอกจากนี้ยังพบพีคของ CNT เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1350, 1550, 2700 cm <sup>-1</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมมีเฟสของ CNT เพิ่มขึ้นผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม
<b>SEM</b>	เมื่อเพิ่มปริมาณ BT จะทำให้เกิดการตกตะกอนและจับตัวกันมากยิ่งขึ้นของ BT	เมื่อเพิ่มปริมาณ CNT จะทำให้ BT เกิดการกระจายตัวมากยิ่งขึ้น และเกิดการตกตะกอนน้อยลง

	BT/PDMS	BT/PDMS/CNT
<b>Dielectric constant</b>	เมื่อเติม BT จะทำให้ค่าสูงขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ BT 50% ณ ความถี่ 1 KHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.21	มีค่าสูงยิ่งขึ้นเมื่อเติม CNT ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ CNT 5% ณ ความถี่ 1 KHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.31
<b>Dielectric loss</b>	มีค่าสูงสุดที่ BT 50% ณ ความถี่ 1 KHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.08	มีค่าสูงสุดที่ CNT 2% ณ ความถี่ 1 KHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.07
<b>Hardness</b>	เมื่อเติม BT จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ BT 50% มีค่าเท่ากับ 5	เมื่อเติม CNT จะมีค่าสูงยิ่งขึ้นไปอีก โดยมีค่ามากที่สุดที่ CNT 5% มีค่าเท่ากับ 55.8
<b>Strain at break</b>	เมื่อเติม BT จะมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าน้อยสุดที่ BT 40% มีค่าเท่ากับ 30.585	มีค่าลดลงยิ่งกว่าเดิมเมื่อเติม CNT ซึ่งมีค่าน้อยสุดที่ CNT 3% มีค่าเท่ากับ 18.272
<b>Stress at break</b>	เมื่อเติม BT จะทำให้ค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ BT 50% มีค่าเท่ากับ 0.77 MPa	เมื่อเติม CNT จะมีค่าสูงยิ่งขึ้นไปอีก โดยมีค่ามากที่สุดที่ CNT 4% มีค่าเท่ากับ 1.38 MPa
<b>stiffness</b>	เมื่อเติม BT จะทำให้ค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ BT 50% มีค่าเท่ากับ 992.49 GPa	เมื่อเติม CNT จะมีค่าสูงยิ่งขึ้น ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ CNT 2% มีค่าเท่ากับ 1758.1 GPa แต่เมื่อเพิ่มมากกว่า CNT2% จะทำให้ค่าลดน้อยลง
<b>Young's modulus</b>	เมื่อเติม BT จะทำให้ค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ BT 50% มีค่าเท่ากับ 7.63 MPa	เมื่อเติม CNT จะมีค่าสูงยิ่งขึ้น ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ CNT 2% มีค่าเท่ากับ 7.63 MPa แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่า CNT2% จะทำให้ค่าลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซน และแบเรียมไททานเนต พอลิโดเมทิลไซลอกเซนและการปรับปรุงด้วยแท่งนาโนคาร์บอน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากผลการตรวจสอบวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่า
  - 1.1 แบเรียมไททานเนตมีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ  $\text{BaTiO}_3$  ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 ซึ่งมีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล
  - 1.2 พอลิโดเมทิลไซลอกเซนจะไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสัณฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้
  - 1.3 แท่งนาโนคาร์บอนมีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคาร์บอน ตามไฟล์มาตรฐาน หมายเลข JCPDS 75-1621
2. จากการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า
  - 2.1 วัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซนเมื่อมีการปรับปริมาณแบเรียมไททานเนตเพิ่มขึ้นพบว่า จะทำให้เกิดการตกตะกอนมากขึ้น
  - 2.2 วัสดุผสมแบเรียมไททานเนตกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน เมื่อเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น พบว่า จะทำให้เกิดการกระจายตัวของแบเรียมไททานเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมด้วยโดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่า

3.1 วัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน มีพีคเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 539, 1384, 1630 และ 3400  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบเรียมไททานเต และพบพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1091, 1251, 1412 และ 2963  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไคเมทิลไซลอคเซน

3.2 วัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน มีพีคเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 539, 1384, 1630 และ 3400  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบเรียมไททานเต พบพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1091, 1251, 1412 และ 2963  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไคเมทิลไซลอคเซน และยังพบพีคเลขคลื่นประมาณ 1680  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในแท่งนาโนคาร์บอน

4. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมโดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปีพบว่า

4.1 วัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน จะพบพีคของแบเรียมไททานเตเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720  $\text{cm}^{-1}$  และพบพีคของพอลิไคเมทิลไซลอคเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888 และ 2940  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

4.2 วัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จะพบพีคของแบเรียมไททานเตเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720  $\text{cm}^{-1}$  พบพีคของพอลิไคเมทิลไซลอคเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888  $\text{cm}^{-1}$  และ 2940  $\text{cm}^{-1}$  และยังพบพีคของแท่งนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1350, 1550 และ 2700  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

5. จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมพบว่า

5.1 วัสดุผสมแบเรียมไททานเตกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซน จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททานเต แม้จะวัดความถี่ที่แตกต่างกัน สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าที่ความถี่ 1 และ 10 kHz วัสดุผสมที่มีปริมาณของแบเรียมไททานเต 50% จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 100 kHz 1 MHz และ 2 MHz

วัสดุผสมจะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมากที่สุดเมื่อมีแบเรียมไททานेट 30%

5.2 วัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติ ด้วยแท่งนาโนคาร์บอน พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ แท่งนาโนคาร์บอนแม้จะวัดความถี่ที่แตกต่างกัน สำหรับค่าการสูญเสียทาง ไดอิเล็กทริก พบว่าที่ความถี่ 1 kHz วัสดุผสมที่มีปริมาณของแท่งนาโน คาร์บอน 3% จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงที่ แต่วัสดุผสมที่มีปริมาณ ของแท่งนาโนคาร์บอน 3% จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกต่ำ นอกจากนี้ ยังพบว่าที่ 10 kHz 100 kHz 1 MHz และ 2 MHz วัสดุผสมจะมีค่าการสูญเสีย ทางไดอิเล็กทริกมากที่สุดเมื่อมีแท่งนาโนคาร์บอน 4%

6. จากการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุผสม พบว่า

6.1 วัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนมาทำการทดสอบค่า ความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็ง พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อผสมปริมาณของแบเรียมไททานेटลงในพอลิไคเมทิลไซลอคเซน

6.2 วัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติ ด้วยแท่งนาโนคาร์บอนมาทำการทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็ง พบว่าค่าความแข็ง มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อผสมปริมาณของแท่งนาโน คาร์บอนลงในวัสดุผสม

7. จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุผสม พบว่า

7.1 ความเครียด ณ จุดขาด (Strain at break) ของวัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับ พอลิไคเมทิลไซลอคเซน เมื่อทำการเติมปริมาณแบเรียมไททานेटค่า ความเครียด ณ จุดขาดจะลดลง

7.2 ความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอค เซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน เมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอน ลงจะส่งผลทำให้ค่าความเครียด ณ จุดขาดของวัสดุผสมมีค่าลดลง นอกจากนี้ จะพบว่าเมื่อผสมแท่งคาร์บอนนาโนลงในวัสดุผสมตั้งแต่ 4% ได้ผลค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปตีพิมพ์หรือเผยแพร่ในที่สาธารณะได้

7.3 ความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break) ของวัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิ ไคเมทิลไซลอคเซนเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมไททานेटลงในวัสดุผสมจะทำให้

- ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมลดน้อยลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมไททาเนตให้สูงกว่า 20 % ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมจะมีค่าสูงขึ้น
- 7.4 วัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิโพรพิลีน ไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนมากขึ้น ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมจะมีแนวโน้มค่าสูงขึ้น แต่เมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอน 5 % ลงไปในวัสดุผสมกลับทำให้ค่าความเค้น ณ จุดขาดของวัสดุผสมลดลง
- 7.5 มอดูลัสยัง (Young's modulus) ของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิโพรพิลีน ไซลอคเซน เมื่อเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททาเนตแล้วนั้นแบเรียมไททาเนตจะเป็นเฟสเสริมแรง ทำให้สามารถรับแรงหรือทนแรงของแรงที่มากระทำได้มากขึ้น
- 7.6 มอดูลัสยังของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิโพรพิลีน ไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน เมื่อผสมแท่งนาโนแล้วแล้วค่ายังมอดูลัสจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 2% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแท่งนาโนคาร์บอนมากกว่า 2 % จะทำให้วัสดุประเภทยังมอดูลัสลดต่ำลง
- 7.7 ความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิโพรพิลีน ไซลอคเซนเมื่อมีการเพิ่มปริมาณแบเรียมไททาเนตมากยิ่งขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มมากยิ่งขึ้น
- 7.8 ความแข็งแรงของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิโพรพิลีน ไซลอคเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน เมื่อเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนมากขึ้น ความสามารถในการรับแรงก็จะมากขึ้น แต่เมื่อเติมแท่งนาโนคาร์บอนมากกว่า 2% จะทำให้วัสดุค่าความแข็งแรงจึงลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การปั่นกวนวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตที่ 50 % กับพอลิโพรพิลีน ไซลอคเซนมีความหนืดมาก ทำให้ส่งผลต่อการกระจายตัวของวัสดุผสม
2. การขึ้นรูปวัสดุผสมการกระจายตัวของวัสดุผสมไม่ค่อยดี จึงทำให้เกิดการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ของแบเรียมไททาเนตงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบแรงดึงยึดของวัสดุผสมควรจะทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้งเพราะอาจเกิดการผิดพลาดของการผสม ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ได้ของแบเรียมไททาเนต ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าผิดพลาดได้
4. การทดสอบ FT-IR ผงแบเรียมไททาเนตและผงแท่งนาโนคาร์บอนเกิดความชื้นได้ง่าย ทำให้การวัดเกิดความคลาดเคลื่อน
5. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง มีราคาค่อนข้างแพง ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้สารเคมี
6. การหักวัสดุผสมในไนโตรเจนเหลว เพื่อนำไปส่องภาพ SEM ทำได้ยาก ทำให้พื้นผิวของวัสดุผสมไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลกระทบต่อความชัดของภาพ SEM ที่ส่องได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

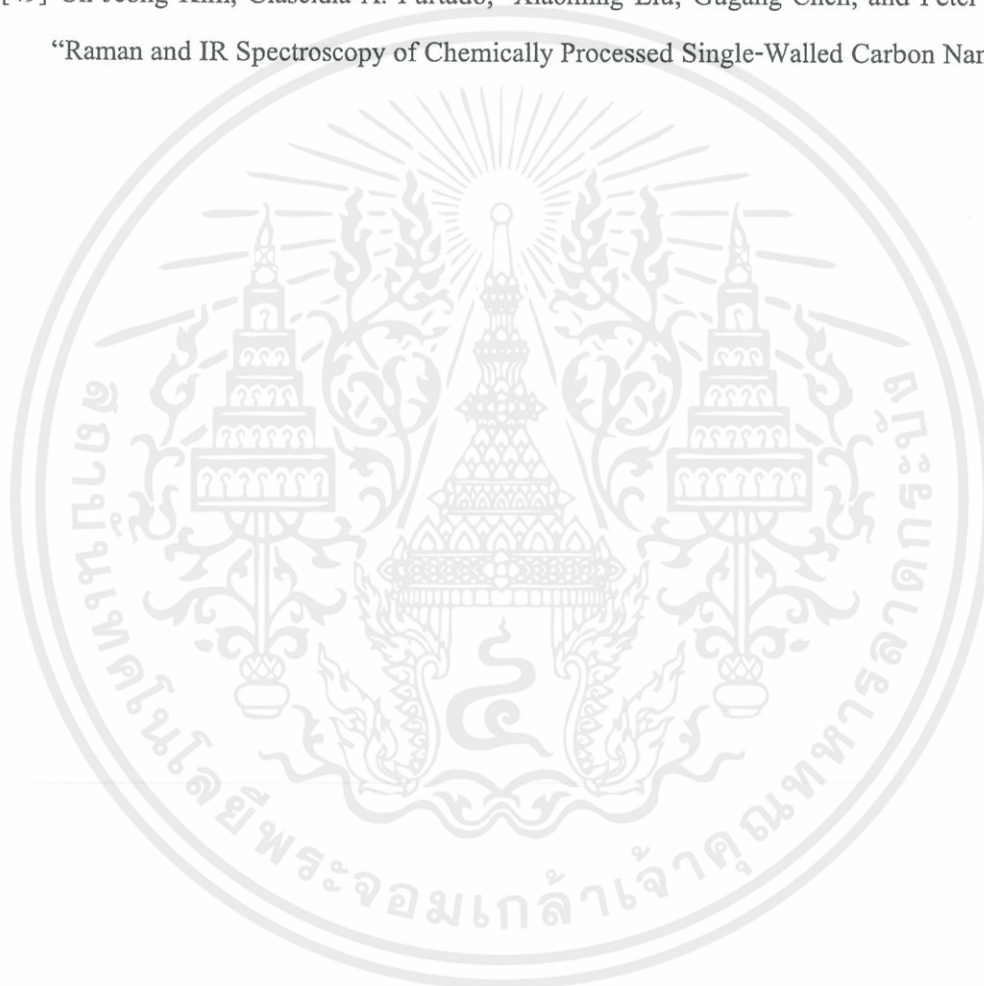
- [1] ผศ.ดร.สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ชีท, “เอกสารประกอบการสอน วิชา 315205 วัสดุศาสตร์ขั้น  
แนะนำ” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตุลาคม 2554
- [2] J.F. Tressler, S. Alkoy and R.E. Newhame, *Journal of Electroceramics* 2:4, (1998) 257-272.
- [3] Ahmad S, Development of piezoelectric composites for transducers, *J. Phys.III France*.4  
(1994) 1129- 1149.
- [4] H. Thurnaurer and J. Deaderick, U.S. Patent No. 2,429,588, Oct. 21, 1947; filed (1941).
- [5] E. Wainer and A.N. Solomon, Titanium Alloy Manufacturing Co. Report No.8  
(September1942) and No. 9 (January 1943).
- [6] A. Von Hippel, R.G. Breckenridge, F.G. Chesley, and L. Tisza, *Ind. Eng. Chem.* 38  
1097(1946).
- [7] V.M. Goldschmidt. *Shrifter Nofke Videnskaps-Akad. Oslo I: mat-Naturv. Kl. No. 2, 8(1926).*
- [8] S. Miyake and R. Ueda, *J. Phys. Soc. Jap.* 1 32 (1946).
- [9] <http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/struk/perovskite.html>.
- [10] S. Roberts, *Phys. Rev.*, 890–5 (1947).
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Barium\\_titanate](http://en.wikipedia.org/wiki/Barium_titanate)
- [12] W. Chaisan, R. Yimnirun, S. Ananta, *Ceram. Inter.* 35:173-176 (2009).
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane>
- [14] S. Iijima, “helical microtubules of graphitic carbon”, *Natures*, 354:56-58,(1991).
- [15] <http://atom.ecn.purdue.edu/~agoyal/nano/prperties.htm>
- [16] พิธิษฐ สึงห์ใจ. “ท่อนาโนคาร์บอนเทคโนโลยีแห่งศตวรรษที่ 21”. *Industrial Technology  
review (เมษายน 2543):*98-100.
- [17] M.Dresselhusm, G. Dresselhusm, P. Eklund, R. Sarito, “Carbon Nanotubes”, *Physics  
world:*33-38, (1999).
- [18] <http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>

เอกสารนี้เก็บ [19] J.-M. Bonard, H. Kind, T. Stockly, L.-O. Nilsson, “Field emission from carbon nanotubes: the  
first five years”, *Solid-state Electronics*, 45:893-914, (2001). เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

- [20] Sung Chul Bae, Hyunjung Lee, Zhiqun Lin, Steve Granick, “Chemical Imaging in a Surface Forces Apparatus: Confocal Raman Spectroscopy of Confined Poly(dimethylsiloxane)” *Langmuir*, 2005, 21 (13), pp 5685–5688
- [21] เชิดศักดิ์ แซ่ลี. (2534) “สมบัติไดอิเล็กตริกและเพียโซอิเล็กตริกในของผสมแบบ 0-3 พีแชนด์ทีกับเทอร์มัลพลาสติก” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [22] Chan, Y., Chan, H.L.W. and Choy, C.L., (1998), “Pyroelectric Properties of PbTiO<sub>3</sub>/P(VDF-TrFE) 0-3 Nanocomposite Films”, *Thin Solid Films*, 323, 270-274.
- [23] Ploss, B., Ng, W., Chan, H.L., Ploss, B. and Choy, C., (2001), “Poling study of PZT/P(VDF-TrFE) composites”, *Composites Science and Technology*, 61, 957-962.
- [24] B. Hilczer, J. Kulek, E. Markiewicz, M. Kosec and B. Malic, “Dielectric Relaxation in Ferroelectric PZT-PVDF Nanocomposite”, *J. Non-Crys. Solid.*, 305 (2002) 167-173
- [25] Tony McNally, Petra Pötschke, Peter Halley, Michael Murphy, Darren Martin, Steven E.J. Bell, Gerard P. Brennan, Daniel Bein, Patrick Lemoine, John Paul Quinn, “Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites”, *Polymer* 46 (2005) 8222–8232
- [26] Hajeesah, S., Muensit, S. “Theory and measurements for 0-3 BaTiO<sub>3</sub>/PVDF composites”, *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, May 2007, Supply 2 : 413-418
- [27] Chen, H., Dong, X., Zeng, T., Zhou, Z. and Yang, H. (2007), “The Mechanical and Electric Properties of Infiltrated PZT/Polymer Composites”, *Ceramics International*, 33, 1369-1374.
- [28] F. Fang, W. Yang, M.Z. Zhang, Z. Wang “Mechanical response of barium-titanate/polymer 0–3 ferroelectric nano-composite film under uniaxial tension”, *Composites Science and Technology* 69 (2009) 602–605
- [29] X. Chen, S. Xu, N. Yao, Y. Shi, Nanogenerator for mechanical energy harvesting using PZT nanofibers, *Nano Lett.* 2010, 10, 2133–2137.
- [30] Chang-Rong Yu, Da-Ming Wu, Ying Liu, Hui Qiao, Zhong-Zhen Yu, Aravind Dasari, Xu-Sheng Du, Yiu-Wing Mai “Electrical and dielectric properties of polypropylene nanocomposites based on carbon nanotubes and barium titanate nanoparticles”, *Composites Science and Technology* 71 (2011) 1706–1712
- [31] X. Chen, R. Galos, Y. Shi, “A self powered PZT nanofiber composite sensor for structural health monitoring”, *The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology ANCRiSST2011*, July 25-26, 2011, Dalian, China.

- [32] J. H. Jung, M. Lee, J. Hong, Y. Ding, C.-Y. Chen, L.-J. Chou, Z. L. Wang, "Lead-free  $\text{NaNbO}_3$  nanowires for a high output piezoelectric nanogenerator", *Am. Chem. Soc.* (2011) 5[12], 10041–10046.
- [33] K. Park , M. Lee , Y. Liu , S. Moon , G.-T. Hwang , G. Zhu , J. E. Kim , S. O. Kim , D. K. Kim , Z. L. Wang , K. J. Lee, "Flexible nanocomposite generator made of  $\text{BaTiO}_3$  nanoparticles and graphitic carbons, *Adv. Mater.* (2012) 201200105.
- [34] Jeffrey Salzbrenner, Christopher Apblett, Tariq Khraishi "Mechanical and electrical properties of carbon nanotubes surface-stamped on polydimethylsiloxane for microvalve actuation" *Polym Int* 2013; 62: 608–615
- [35] R.K. Goyal , S.S. Katkade, D.M. Mule "Dielectric, mechanical and thermal properties of polymer/ $\text{BaTiO}_3$  composites for embedded capacitor ", *Composites: Part B* 44 (2013) 128–132
- [36] Subhan Salaeh, Gisele Boiteux, Philippe Cassagnau, Charoen Nakason, "Flexible 0–3 Ceramic-Polymer Composites of Barium Titanate and Epoxidized Natural Rubber", *Int. J. Appl. Ceram. Technol*(2013)., 1–10
- [37] J. M. Martínez-Tarifa, M.E. Sepúlveda-García, R. Portillo-Romaní, J. González-Benito, G. González-Gaitano, "Uniformly Dispersed Submicrometric  $\text{BaTiO}_3$  Particles in HDPE Based Composites"
- [38] A. J. Moulson and J. M. Herbert. *Electroceramics* : 2nd ed. West Sussex : John Willey & Sons Ltd, 2003.
- [39] W. Chaisan, R. Yimnirun, S. Ananta, *Ceram. Inter.* 35:173-176 (2009).
- [40] <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu>
- [41] <http://orgchem.colorado.edu/Spectroscopy/irtutor/images/aniline.gif>
- [42] <http://www.mfu.ac.th/center/stic/images/articles/FTIR/FT-IR02.jpg>
- [43] <http://www.mfu.ac.th/center/stic/images/articles/SEM/sem001.jpg>
- [44] บัณฑิต อุ่นสุข. สมบัติกายภาพและเชิงกลของวัสดุผสมอะครีโลไนต์-บิวตะไดอิน-สไตรีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดสั้น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2545.
- [45] อุทัย มีคำ. การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. นครราชสีมา: สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2544.

- [46] [http://www.ptli.com/testlopedia/images/Zwick\\_Hardness\\_Close.JPG](http://www.ptli.com/testlopedia/images/Zwick_Hardness_Close.JPG)
- [47] Z. Lazarevic, N. Rom-cevic, M. Vijatovic, N. Paunovic, M. Rom-cevic, B. Stojanovic, Z. Doh-cevic-Mitrovic. "Characterization of Barium Titanate Ceramic Powders by Raman Spectroscopy" *Acta Physica Polonica A* 115[4] (2009).
- [48] T.C. Huang, M.T. Wang, H.S. Sheu, W.F. Hsieh. "Size-Dependent Lattice Dynamics of Barium Titanate Nanoparticles". *J. Phys.: Condens. Matter* 19, 476212 (2007) 12.
- [49] Un Jeong Kim, Clascidia A. Furtado, Xiaoming Liu, Gugang Chen, and Peter C. Eklund "Raman and IR Spectroscopy of Chemically Processed Single-Walled Carbon Nanotubes"

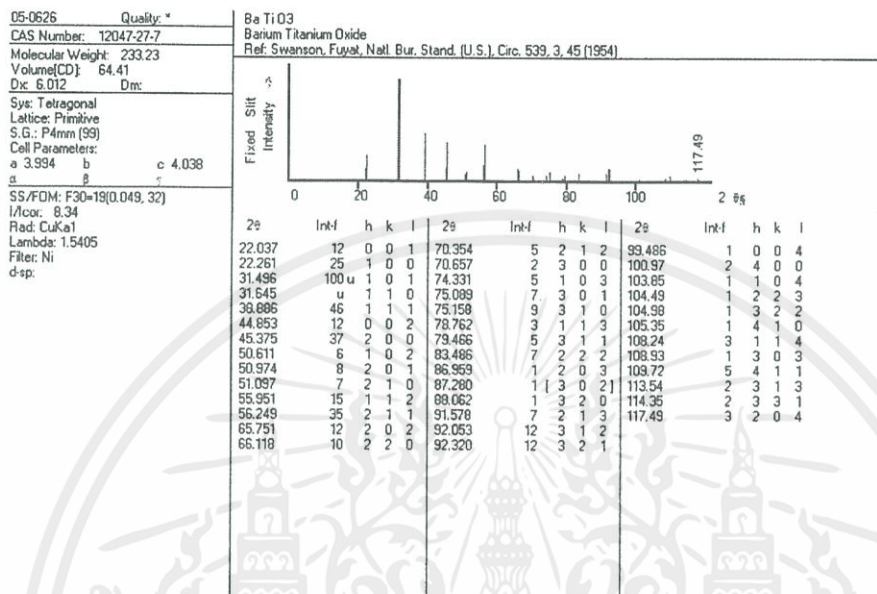


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

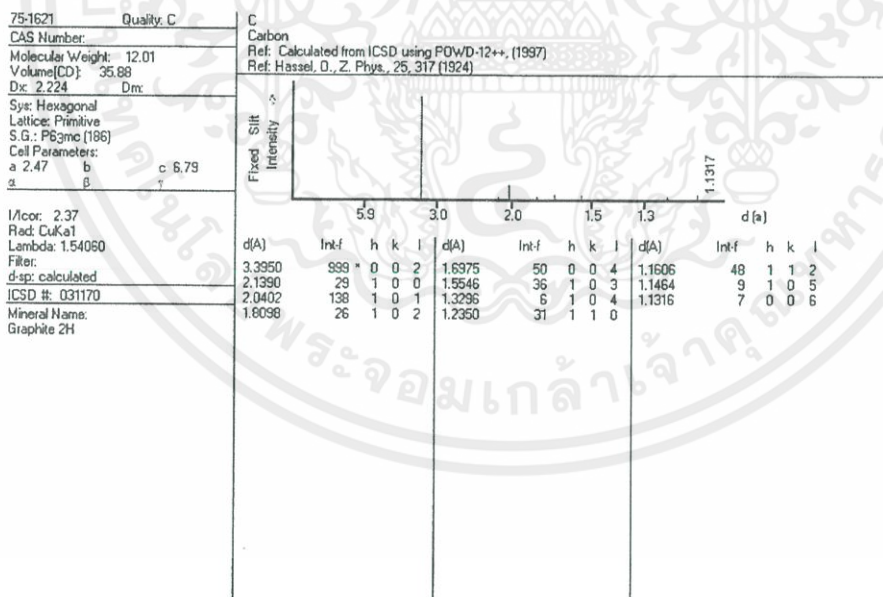


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลมาตรฐานของ BaTiO<sub>3</sub>



ข้อมูลมาตรฐานของ C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้