การเตรียมวัสดุประกอบนาโนพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะและโลหะออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ด้านพลังงาน

PREPARATION OF NANOCOMPOSITE MATERIALS BY USING POLYMER WITH METAL AND METAL OXIDE NANOPARTICLES FOR NOVEL ENERGY DEVICE APPLICATIONS

ธัญญารัตน์ สุหัสโช
TANYARAT SUHATCHO

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF NANOCOMPOSITE MATERIALS BY USING POLYMER WITH METAL AND METAL OXIDE NANOPARTICLES FOR NOVEL ENERGY DEVICE APPLICATIONS

TANYARAT SUHATCHO

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2015
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเตรียมวัสดุประกอบนาโนพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะและโลหะออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ด้านพลังงาน
Special Project Title	PREPARATION OF NANOCOMPOSITE MATERIALS BY USING POLYMER WITH METAL AND METAL OXIDE NANOPARTICLES FOR NOVEL ENERGY DEVICE APPLICATIONS
นักศึกษา	นางสาวธัญญารัตน์ สุหัสโช
รหัสประจำตัว	55110024
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ทุติยภรณ์ ทิวาวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	-

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ทุติยภรณ์	ทิวาวงศ์	
ดร.กรกช	อ่อนละออ	
ดร.นงลักษณ์	หวงกำแหง	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชุติไพจิตร)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 23 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนจากพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะและโลหะออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ด้านพลังงาน
นักศึกษา	นางสาวธัญญารัตน์ สุหัสโช
รหัสประจำตัว	55110024
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ทุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ PVDF และ PDMS ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะและโลหะออกไซด์ ซึ่งวัสดุประกอบพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะ ได้แก่ อนุภาคนาโนเงินและอนุภาคนาโนทอง โดยใช้ปริมาณ 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 ml และในส่วนของวัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ ได้แก่อนุภาคซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ปริมาณ 0.025 0.050 0.075 และ 0.100 g ทำการเตรียมฟิล์มจากกระบวนการขึ้นรูป โดยมีการควบคุมปริมาณของพอลิเมอร์ อุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูป จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคและเครื่องมือวิเคราะห์สารอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy เพื่อศึกษาองค์ประกอบของวัสดุประกอบพอลิเมอร์ แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปสร้างขั้วไฟฟ้าบนชั้นฟิล์ม หลังจากนั้นทำการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโค้งงอของอุปกรณ์ ซึ่งพบว่าอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF ร่วมกับอนุภาคนาโนที่ให้กระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดในโหมด bending และ release mode คือ PVDF ผสมกับซิลเวอร์นาโน มีค่าอยู่ที่ ~4.02 และ ~ -3.81 nA ตามลำดับ และในส่วนของการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS ร่วมกับอนุภาคนาโน พบว่าอุปกรณ์ที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุดในโหมด bending และ release mode คือ PVDF ผสมกับซิลเวอร์นาโน ~ 1.97 และ ~-2.67 nA ในตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation of nanocomposite materials by using polymer with metal and metal oxide nanoparticles for novel energy device applications
Student	Miss Tanyarat Suhatcho
Student ID	55110024
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Assistant Professor Dr. Thutiyaporn Thiwawong

ABSTRACT

This special project studies in a preparation of nanocomposite materials by using polymer (PVDF and PDMS) with metal nanoparticles (gold and silver) and metal oxide nanoparticles (Zinc oxide and Titanium dioxide). The preparation of film is forming film by use amount of different nanoparticles. A part of composite polymer with gold and silver nanoparticles are using amount of nanoparticles at 0.25 0.50 0.75 and 1.00 ml. In another part, Composite polymer with Zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles are using amount of particles at 0.025, 0.050, 0.075 and 0.100 g Therefore, the forming processes were controlled volume of both polymers , temperature and time. Then, the films were characterized by atomic force microscope (AFM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). After that the film combined with the electrodes and encapsulated plastic for applying to energy devices. For instance, generators and sensors were also used for self-power energy. Finally, the devices were measured electrical capability from bending and release mode of moving films. It was found that, the maximum current in bending and release mode of the composite polymer (PVDF) with silver nanoparticle device was ~4.02 and ~ -3.81 nA respectively. For the composite polymer (PDMS) with silver nanoparticle device, it obtained the maximum current in bending and release mode of was~ 1.97 and ~-2.67 nA respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์ ผู้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎี และทางปฏิบัติ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. กรกช อ่อนละออ และดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างโครงงานพิเศษที่ให้คำชี้แนะและการตรวจแก้โครงงานพิเศษให้สำเร็จได้ด้วยความเรียบร้อย

ขอบคุณ สมาชิกห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์และควบคุมสำหรับอุปกรณ์ระดับนาโน (ECSN Lab) ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีที่สุดแก่ข้าพเจ้า ในการทำงานวิจัยและในทุกสถานการณ์ที่เกิดขึ้น

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว สุหัสโช สำหรับกำลังใจและความอบอุ่นที่มีให้เสมอมา คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทั้งในด้านวิชาการและศีลธรรมแก่ข้าพเจ้าตลอดในช่วงชีวิตของข้าพเจ้า

ธัญญารัตน์ สุหัสโช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II
กิตติกรรมประกาศ.....III
สารบัญ.....IV
สารบัญภาพ.....VIII
สารบัญตาราง.....XI

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....2
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....4
2.1 วัสดุประกอบนาโน.....4
2.1.1 วัสดุประกอบนาโน.....4
2.1.2 ประเภทของวัสดุประกอบ.....4
2.2 อนุภาคนาโน.....6
2.2.1 อนุภาคนาโนเงิน.....7
2.2.1.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนเงิน.....8
2.2.1.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม.....9
2.2.2 อนุภาคนาโนทอง.....9
2.2.2.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนทอง.....10
2.2.2.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม.....10
2.2.3. อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....11
2.2.3.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนทอง.....11
2.2.3.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม.....12
2.2.4 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์.....13
2.2.4.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....14
2.2.4.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม.....14
2.3 พอลิไวนิลลิดีลฟลูออไรด์.....15
2.4 อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าพลังงานระดับนาโน (nanogenerator).....16
2.4.1 พลังงานในธรรมชาติ.....16
2.4.1.1 ความสำคัญของพลังงาน.....16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.1.2. คุณสมบัติของพลังงานแต่ละชนิด....17
2.3.1.3 การใช้พลังงานและแหล่งสำรองของโลก....19
2.3.1.4 การใช้พลังงานและแหล่งสำรองของไทย....22
2.4.2 ทฤษฎีอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน (nanogenerator)....26
2.4.2.1 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบเพียโซอิเล็กตริก....26
2.4.2.2 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไทรโบอิเล็กตริก....33
2.4.2.3 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริก....38

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย....42
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง....43
3.2 การเตรียมชั้นฟิล์ม....43
3.2.1 การขึ้นรูปวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS ร่วมกับอนุภาคนาโน....43
3.2.1.1 การเตรียม PDMS....43
3.2.1.2 การเตรียม PDMS ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ (อนุภาคนาโนเงินและทอง) 43
3.2.1.3 การเตรียม PDMS ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ (อนุภาคนาซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์)....44
3.3.2 การขึ้นรูปวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF ร่วมกับอนุภาคนาโน....44
3.2.2.1 การเตรียม PVDF....44
3.2.2.2 การเตรียม PVDF ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ (อนุภาคนาโนเงินและทอง)....44
3.2.2.3 การเตรียม PVDF ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ (อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์)....44
3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม....45
3.3.1 การศึกษาองค์ประกอบของสารด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy)....45
3.3.2 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM)....45
3.4 การประดิษฐ์อุปกรณ์ด้านพลังงาน....45
3.4.1 การประกอบอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน....45
3.4.2 การประกอบอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโน....46
3.5 การตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์....47
3.5.1 การตรวจวัดอุปกรณ์จากวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF....47
3.5.2 การตรวจวัดอุปกรณ์จากวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS....48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.6 ผลทางไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์.....50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....51
4.1 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ในพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....51
4.1.1 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคทองนาโนใน PVDF.....51
4.1.2 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคเงินนาโนใน PVDF.....52
4.1.3 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ใน PVDF.....52
4.1.4 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ใน PVDF.....53
4.1.5 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคทองนาโนใน PDMS.....53
4.1.6 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคเงินนาโนใน PDMS.....54
4.1.7 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ใน PDMS.....54
4.1.8 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ใน PDMS.....55
4.2 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF และ PDMS ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารอินฟราเรด.....56
4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคทองนาโน.....56
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโน.....57
4.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....57
4.2.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....58
4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโน.....59
4.2.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโน.....59
4.2.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไอออกไซด์.....61
4.3 ผลของการโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน.....62
4.3.1 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน.....62
4.3.2 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโน.....62
4.4 ผลของค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน.....63
4.4.1 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคทองนาโน.....63
4.4.2 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโน.....64
4.4.3 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....65
4.4.4 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....66
4.4.5 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโน.....67
4.4.6 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโน.....68
4.4.7 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....69
4.4.8 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์กับ PDMS กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....70

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา.....71
5.1 สรุปผลการทดลอง.....71
5.2 แนวทางการพัฒนา.....71

บรรณานุกรม.....72

ประวัติผู้เขียน.....74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์....5
2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่ายังมอดูลัสกับปริมาณสาร SWNT และ C_{60} ที่ใส่ลงใน PVDF....5
2.3 ลักษณะโครงสร้างของผลึกของอนุภาคนาโนซิลเวอร์....8
2.4 การเปล่งแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีรูปร่างต่างๆ ตามความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน....10
2.5 โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์....12
2.6 สมการการเตรียมพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์....16
2.7 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กตริก....28
2.8 โครงสร้างของ VING ที่มีพื้นผิวสัมผัสต่างกัน(ด้านบน) เป็นโครงสร้างที่สัมผัสกับผิวขั้น....30
2.9 เป็นโครงสร้างของ LING....30
2.10 เป็นโครงสร้างของ NEG....31
2.11 แสดงการพัฒนา PENG โดยให้มีค่า output voltage มีค่าสูงขึ้น....31
2.12 แสดงกระบวนการในการทำ PENG (a) แผ่นซิลิกอน (b) การปลูก ITO ด้วยวิธีการ....32
2.13 แสดงโหมดการทำงานของ TEG ใน 4 โหมด....34
2.14 การทำงานของ TEG โหมดสัมผัสและการแยกออกในแนวตั้ง....35
2.15 การทำงานของ TEG โหมดสไดล์ด้านข้าง (Lateral sliding mode)....35
2.16 โหมดควบคุมด้วยขั้วไฟฟ้าขั้วเดียว (Single-electrode mode)....36
2.17 แสดงการทำงานของ TENG ในโหมดยืนแบบอิสระ (The free-standing mode)....36
2.18 การพัฒนาของ TEG ในด้านของพลังงานต่อพื้นที่ ในช่วงปี 2012-2013....37
2.19 การพัฒนาของ TENG (ด้านซ้าย) พลังงานต่อพื้นที่ในปี 2013-2014 (ด้านขวา)....37
2.20 Triboelectric series สำหรับวัสดุ ที่มีแนวโน้มที่จะสูญเสีย....37
2.21 โครงสร้างของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริก....38
2.22 การทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริกกับไดโพลอิเล็กตริก....39
2.23 ตัวอย่างโครงสร้างของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริก....40
2.24 กลไกการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน....40
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินวิจัย....42
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า....48
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์PVDF....48
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า....48
3.5 ลักษณะการกดอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS....49
3.6 การต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS....49
3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ในตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS....49
3.1 ตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์จะวัดเป็นค่าในโหมด bending และ release....50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PVDF 5wt% (b) PVDF 5wt% Au NPs 0.25 ml (c) PVDF 5wt% AuNPs 0.50 ml (d) PVDF 5wt% AuNPs 0.75 ml (e) PVDF 5wt% AuNPs 1 ml.....51

4.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PVDF 5wt% (b) PVDF 5wt% AgNPs 0.25 ml (c) PVDF 5wt% AgNPs 0.50 ml (d) PVDF 5wt% AgNPs 0.75 ml (e) PVDF 5wt% AgNPs 1.00 ml.....52

4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) 5wt% (b) PVDF 5wt% ZnO 0.025 g (c) PVDF 5wt% ZnO 0.050 g (d) PVDF 5wt% ZnO 0.750 g (e) PVDF 5wt% ZnO 0.1 g.....52

4.4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PVDF 5wt% (b) PVDF 5wt% TiO_2 0.025 g (c) PVDF 5wt% TiO_2 0.050 g (d) PVDF 5wt% TiO_2 0.750 g (e) PVDF 5wt% TiO_2 0.100 g.....53

4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS 10 g (b) PDMS AuNPs 0.25 ml (c) PDMS AuNPs 0.50 ml (d) PDMS AuNPs 0.75 ml (e) PDMS AuNPs 1 ml.....53

4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS (b) PDMS AgNPs 0.25 ml (c) PDMS AgNPs 0.50 ml (d) PDMS AgNPs 0.75 ml (e) PDMS AgNPs 1 ml.....54

4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS (b) PDMS ZnO 0.025 g (c) PDMS ZnO 0.050 g (d) PDMS ZnO 0.075 g (e) PDMS ZnO 0.100 g.....54

4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS (b) PDMS TiO_2 0.025 g (c) PDMS TiO_2 0.050 g (d) PDMS TiO_2 0.075 g (e) PDMS TiO_2 0.100 g.....55

4.9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคทองนาโนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด.....56

4.10 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์ PDVF กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด.....57

4.11 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด.....57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.12 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด....58
4.13 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด....59
4.14 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด....59
4.15 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด....60
4.16 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด....61
4.17 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน....62
4.18 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน....62
4.19 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วม PVDF กับอนุภาคทองนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ....63
4.20 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ....64
4.21 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ....65
4.22 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ....66
4.23 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ....67
4.24 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ....68
4.25 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ....69
4.26 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ....70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การจำแนกคุณสมบัติของถ่านหิน ตามคุณสมบัติทางเคมี และค่าความร้อนอย่างหยาบๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด 17

2.2 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานปฐมภูมิของโลกในปี 2540 19

2.3 แสดงสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของโลก ปี 2538 (หน่วย : ร้อยละ)..... 20

2.4 เปรียบเทียบปริมาณสำรอง และการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ของประเทศต่างๆ หน่วย : พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ..... 21

2.5 แสดงแหล่งสำรองพลังงานของโลก ณ สิ้นปี 2540 สามารถจำแนกแหล่งตามภูมิภาคต่างๆ ของโลก..... 21

2.6 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานปฐมภูมิ (Primary Energy) ของไทยในปี 2540 22

2.7 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย(Final Energy)แยกตามสาขาการผลิตในปี 2540 22

2.8 แสดงประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กสถานภาพ ณ 30 เมษายน 2542..... 23

2.9 แหล่งก๊าซธรรมชาติ มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้วตามแหล่งต่างๆ..... 25

2.10 แหล่งน้ำมัน มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้วตามแหล่งต่างๆ..... 25

2.11 แหล่งถ่านหิน(ลิกไนต์)ที่พัฒนาขึ้นมาใช้แล้ว มีปริมาณสำรองคงเหลือตามแหล่งต่างๆ..... 25

2.12 เปรียบเทียบการใช้สารที่นำมาทำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน..... 29

4. 1 ค่ารากที่สองของค่าความขรุขระ (root mean square roughness (rms)) ของวัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนโลหะที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 55

4. 2 ค่ารากที่สองของค่าความขรุขระ (root mean square roughness (rms)) ของวัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 56

4. 3 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วม PVDF กับอนุภาคทองนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 63

4. 4 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 64

4. 5 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 65

4. 6 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 66

4. 7 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4. 8 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ 68
4. 9 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ 69
4. 10 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันสถานการณ์ในประเทศไทยและต่างประเทศนั้น มีการใช้พลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้ามีแนวโน้มการใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยพลังงานทดแทนต่างๆ ถือเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานทดแทนหมายถึงพลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งนับวันมีแต่จะลดปริมาณลงเรื่อยๆ และราคาที่มีความผันผวนไม่แน่นอนตามสภาพเศรษฐกิจโลก โดยในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้ากว่าร้อยละ 90 ใช้พลังงานต่างๆ เหล่านี้ และถือเป็นตัวการหนึ่งของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากซึ่งเป็นสาเหตุของทำให้โลกร้อน พลังงานทดแทนที่สำคัญ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำและพลังงานลม เป็นต้น เหล่านี้ล้วนเป็นพลังงานทางเลือกที่สะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นพลังงานเชิงกล ซึ่งปัจจุบันได้นำเอาพลังงานเหล่านี้มาใช้ประโยชน์เป็นสิ่งที่น่าสนใจและน่าศึกษาอย่างยิ่ง

ช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่างานวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจกับอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน (nanogenerator) ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยไม่ใช้แบตเตอรี่ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถแปลงพลังงานเชิงกลหรือความร้อนไปเป็นไฟฟ้าซึ่งมีด้วยกัน 3 วิธี piezoelectric, triboelectric และ pyroelectric nanogenerator ซึ่งนอกจากจะสามารถใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่แล้ว ยังสามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ที่ฝังอยู่ในร่างกายได้อีกด้วย พลังงานของ Nanogenerator นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติ เช่น พลังงานลม แล้วยังมีแหล่งพลังงานจากกลไกทางชีวภาพที่เกิดขึ้นกับร่างกาย เช่น การเต้นของหัวใจ การไหลเวียนของเลือด และการยืด/หดของกล้ามเนื้อ

อนุภาคนาโนของโลหะและโลหะออกไซด์เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาทาง วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นอย่างมากเนื่องจากมีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างจากโลหะก้อน โดยสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของอนุภาคนาโน อนุภาคนาโนที่เตรียมจากโลหะ เช่น เงินและทองคำ จะมีสมบัติทางแสงที่แตกต่างจากเงินและทองคำแบบก้อนโดยสิ้นเชิง เมื่อโลหะเหล่านี้ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงจนถึงขนาดในระดับจะพบว่าสีที่สังเกตได้จะเปลี่ยนไป เช่น สีที่สังเกตได้จากอนุภาคนาโนของเงินจะมีสีเหลือง ส่วนอนุภาคนาโนทองคำจะมีสีแดง และอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ที่และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นอนุภาคนาโนของโลหะและโลหะออกไซด์จึงมีการนำมาใช้งานที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น ประยุกต์ใช้กับงานที่มีความเกี่ยวข้องกับทางด้านแสง ด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำอนุภาคนาโนเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ ตัวอย่างเช่นจากงานวิจัยของ Jaehwan Lee และคณะได้นำเอาอนุภาคเงินนาโนไปปลูกลงบนพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านการนำไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในเซนเซอร์ตรวจสอบการการเคลื่อนไหวของมนุษย์ จากงานวิจัยจากงานวิจัย Byoung Sun Lee และคณะได้ทำการศึกษาผลของฐานรองรับโดยปลูกพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กตริกเพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้นนี้ จึงได้มีการศึกษาถึงวิธีการเตรียมฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนและศึกษาสมบัติต่างๆของวัสดุ เพื่อหาแนวทางในการนำฟิล์มพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ ด้านอุตสาหกรรม และด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการพัฒนาเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องทางด้านพลังงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนสำหรับการเตรียมฟิล์ม
1.2.2 ศึกษากระบวนเตรียมฟิล์มขึ้นรูปโดยศึกษาผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์
1.2.3 ตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มวัสดุประกอบพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM),เครื่องมือวิเคราะห์สารอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy)
1.2.4 ศึกษาแนวทางการนำฟิล์มจากวัสดุประกอบนาโนไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ด้านพลังงาน

1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาหาวัสดุและการเตรียมฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนในรูปแบบและเงื่อนไขต่างๆ
1.3.2 ศึกษาลักษณะของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน ได้แก่ ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในเนื้อสารพอลิเมอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ
1.3.3 ทดสอบความสามารถของอุปกรณ์ไฟฟ้าระดับนาโน ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับการสมบัติของพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนที่นำมาใช้ในการเตรียมฟิล์ม
1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจ ลักษณะฟิล์มจากวัสดุประกอบพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโน ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในเนื้อสารพอลิเมอร์
1.4.3 สามารถนำฟิล์มจากวัสดุประกอบพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนที่ได้ไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยขอบเขตของการดำเนินวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของวัสดุประกอบนาโน ทฤษฎีของอนุภาคนาโน และสุดท้าย คือการกล่าวถึงทฤษฎีของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าพลังงานระดับนาโน ซึ่งเป็นปลายทางของงานวิจัยนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทดลองต่างๆ ของงานวิจัย ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน โดยวิธีต่างๆ รวมถึงการตรวจสอบฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนด้วย

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบสมบัติของวัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนาที่สามารถนำอุปกรณ์ที่เกิดจากวัสดุประกอบพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย วัสดุประกอบนาโน พลังงานในธรรมชาติ ที่มาและความสำคัญ คุณสมบัติของพลังงานแต่ละชนิด การใช้พลังงานและแหล่งสำรองโลก รวมไปถึงการพัฒนาเป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน

2.1 วัสดุประกอบนาโน

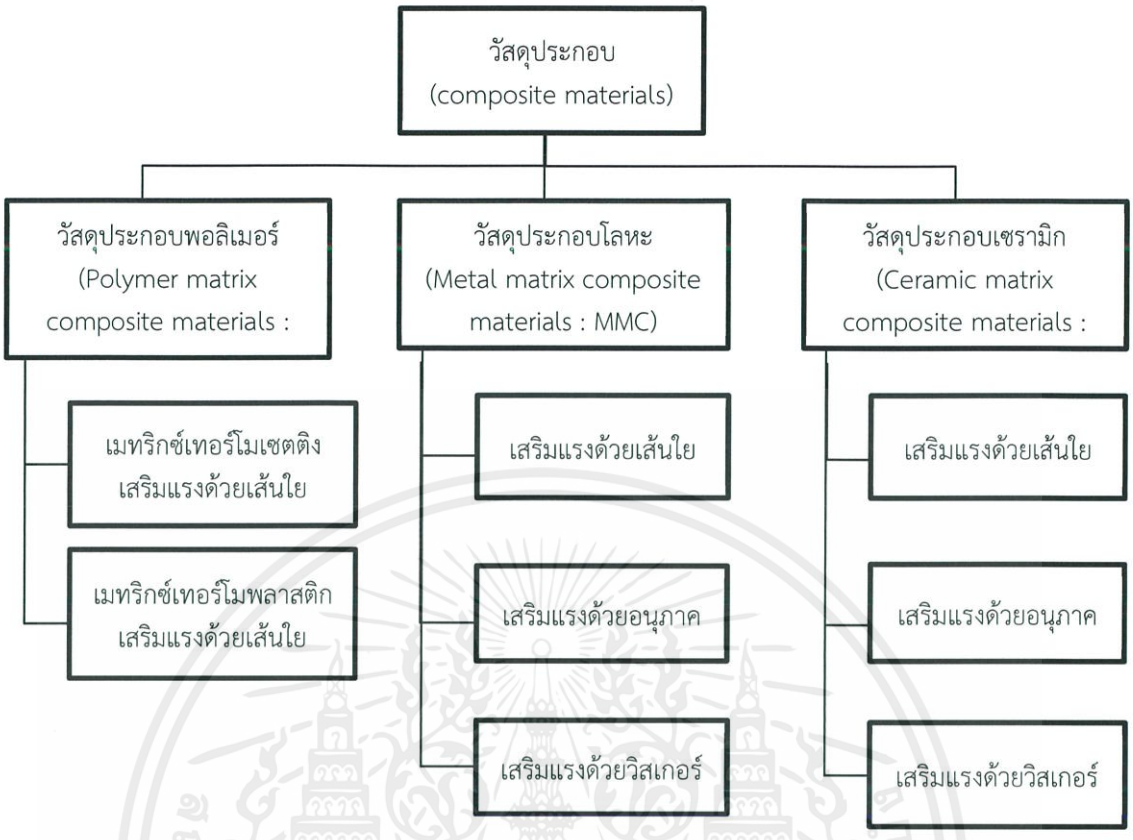
2.1.1 วัสดุประกอบนาโน

วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยมีวัสดุหนึ่งอยู่ในระดับนาโนซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1-100 นาโนเมตร ไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้สมบัติของวัสดุประกอบนาโนที่เกิดขึ้น มีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น การทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่าสารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุประกอบนาโนเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้วัสดุปรกอบนาโนมีสมบัติตามต้องการ[1]

2.1.2 ประเภทของวัสดุประกอบ

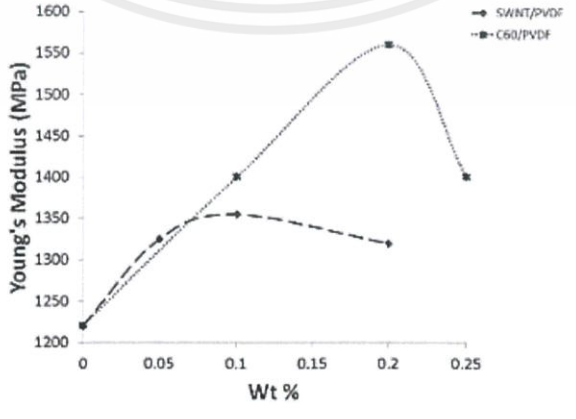
วัสดุประกอบ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเมทริกซ์และส่วนที่สามารถเสริมแรง ซึ่งเราสามารถจำแนกวัสดุประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) และวัสดุประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และวิสเกอร์(Whisker)[2]ดังภาพที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง

จากงานวิจัยของ Cary Baur และคณะ ได้พัฒนาวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กตริก ให้มีค่ายังมอดูลัส (young's modulus) ที่สูงขึ้น โดยการผสม single-walled carbon nanotube (SWNT) และ ฟลูเลอรีน (C_{60}) ลงใน PVDF แล้วเปรียบเทียบกับ ซึ่งค่ายังมอดูลัสของ PVDF มีค่าอยู่ที่ 1.2 GPa พบว่าเมื่อผสมสารทั้ง 2 ชนิดลงไป ทำให้ค่ายังมอดูลัสของ SWNT/PVDF และ C_{60}/PVDF มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.35 GPa และ 1.55 GPa ตามลำดับ



ภาพที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่ายังมอดูลัสกับปริมาณสาร SWNT และ C_{60} ที่ใส่ลงใน PVDF [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 อนุภาคนาโน

นาโน (nano) รากศัพท์มากจากภาษากรีก หมายถึง 1 ส่วนใน 1,000 ล้านส่วนนาโนเมตร หมายถึง 1 เมตรใน 1,000 ล้านเมตร หรือเล็กประมาณ 50,000 เท่าของขนาดเส้นผมมนุษย์ 1 เส้น นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) คือเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง การวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร ผลิตภัณฑ์ การออกแบบเครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุอุปกรณ์มีสมบัติพิเศษขึ้น และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

อนุภาคนาโนจัดเป็นอนุภาคระดับจุลทรรศน์ซึ่งเราไม่สามารถมองเห็นได้โดยตรงด้วยตาเปล่า มีหลายสิ่งหลายอย่างที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าสิ่งเหล่านั้นก็ไม่ได้ถูกนำมารวมเป็นอนุภาคนาโนทั้งหมด เพราะอนุภาคนาโนนั้นจะต้องมีขนาดในระดับนาโนเมตรเท่านั้น ดดยทั่วไปอนุภาคนาโนถูกสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำโดยอาจจะนำมาติดด้วยควอนตัมดอท (quantum dot) หรือที่รู้จักในอีกชื่อหนึ่งว่า ผลึกนาโนสารกึ่งตัวนำ (semiconductor nanocrystal) ซึ่งหมายถึงผลึกของแข็งของสารกึ่งตัวนำที่ประกอบไปด้วยขนาดของอะตอมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางราว 10-20 nm. หรือประมาณ 10-50 Å รวมทั้งมีอิเล็กตรอนเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ 100-1,000 อิเล็กตรอน

อนุภาคนาโนคือความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมกับพื้นที่ผิวของอนุภาคขนาดเล็กโดยปริมาณของอะตอมที่พื้นที่ผิวมีนัยสำคัญกับขนาดของอนุภาคในระดับนาโน นอกจากนี้แล้วอนุภาคนาโนสามารถอยู่ในรูปของสารแขวนลอยได้เช่นกัน เนื่องจากแรงระหว่างพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนในตัวทำละลายมีมากเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคนาโนนี้ลอยตัวอยู่ได้

อนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่สำคัญอย่างยิ่งในวงการวิทยาศาสตร์เนื่องจากเป็นสะพานเชื่อมของอะตอม โครงสร้างระดับโมเลกุล และวัสดุได้เป็นอย่างดี วัสดุที่มีขนาดใหญ่จะมีสมบัติทางฟิสิกส์คงตัวตามขนาดของวัสดุนั้น แต่ในวัสดุระดับนาโนไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากมีสมบัติอื่นๆ ด้วยได้แก่ การกักกันควอนตัม (quantum confinement) การสั่นพ้องผิวพลาสมอน (surface plasmon resonance) และแม่เหล็กพาราพิเศษ (superparamagnetism)

สมบัติของวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีขนาดเล็กลงในระดับนาโน เช่น การโค้งงอของขดลวดทองแดงมีขนาดเล็กกว่า 50 nm. ทองแดงอันนี้จะกลายเป็นทองแดงที่แข็งมากจนไม่สามารถจะโค้งงอได้ อนุภาคนาโนบางชนิดมีขนาดเล็กมากทำให้เกิดการสะท้อนของแสงที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น อนุภาคนาโนของทอง ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็นสีแดงที่เรียกกันว่า ทับทิม (ruby) หรือ ม่วงแดง (burgundy) อนุภาคนาโนยังคงเกี่ยวโยงไปถึงกลุ่ม (clusters) เล็กๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลนั่นเอง สมบัติเกี่ยวกับ วัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) (สสารที่มีแรงต้านอย่างสูงต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า เช่น ฉนวนไฟฟ้า) และความสามารถของการเป็นสารกึ่งตัวนำของอนุภาคนาโนนั้น เป็นโครงสร้างผสมที่สร้างขึ้นมาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นในหลายด้าน เช่น นำไฟสร้างเป็นแกนหรือแขนของแขนอนุภาคนาโน (core-shell nanoparticles) ยิ่งไปกว่านั้นเราสามารถออกแบบให้อนุภาคนาโนให้มีรูปร่างแตกต่างกันไป เช่น อนุภาคนาโนรูปร่างทรงกลม (nanospheres) ที่มีขนาด 500 nm.

ควอนตัมดอท และผลึกนาโน (nanocrystal) ถูกจัดเป็นอนุภาคนาโนเช่นกัน การนำอนุภาคนาโนมาประยุกต์ใช้งานนั้นสามารถนำมาใช้ได้ในหลายๆ ด้าน เช่น หุ่นยนต์ วงจรไฟฟ้า เครื่องกล รวมไปถึงทางด้านชีววิทยา และวงการแพทย์ ต่างก็สนใจที่จะนำเอาอนุภาคนาโนนี้มาประยุกต์ใช้เพื่อผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่มีคุณค่านำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นการศึกษาสมบัติ ลักษณะรูปร่างของอนุภาคนาโนเป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องเรียนรู้ก่อนที่จะนำไปใช้งานซึ่งเทคนิคอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ SEM, atomic force microscopy (AFM), x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), XRD และ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ต้องดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมาก

ในปัจจุบันอนุภาคนาโนของโลหะ เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาทาง วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นอย่างมากเนื่องจากมีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างจากโลหะแบบก้อน โดยสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของอนุภาคนาโน ดังนั้นอนุภาคนา โนของโลหะ จึงมีการนำมาใช้งานที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประยุกต์ใช้กับงานที่มีความเกี่ยวข้องกับสมบัติทางแสงด้านสิ่งแวดล้อม อนุภาคนาโนที่เตรียมจาก โลหะ เช่น เงิน และทองคำ จะมีสมบัติทางแสงที่แตกต่างจากเงินและทองคำแบบก้อนโดยสิ้นเชิง เมื่อโลหะเหล่านี้ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงจนถึงขนาดในระดับจะพบว่าสีที่สังเกตได้จะเปลี่ยนไป เช่น สีที่สังเกตได้จากอนุภาคนาโนของเงินจะมีสีเหลือง ส่วนอนุภาคนาโนทองคำจะมีสีแดง

อนุภาคนาโนทอง เป็นวัสดุนาโนโลหะที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทองทำได้โดยการเรโซแนนซ์เชิงแสงให้เห็นชัดเจน ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ขนาดและรูปร่างของอนุภาค รวมถึงการทำปฏิกิริยาเชิงแสงในระบบเรโซแนนซ์ โดยสมบัติเฉพาะพิเศษของอนุภาคนาโนทองนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้ทำเครื่องหมายเชิงแสงและการรักษามะเร็งด้วยความร้อนเฉพาะที่ในวงการแพทย์

อนุภาคนาโนเงิน เป็นวัสดุนาโนโลหะที่มีปริมาณการผลิตสูงสุด และมีการใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย ได้แก่ ใช้เป็นองค์ประกอบในผ้าปิดแผล ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในเครื่องล้างอุปกรณ์ เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรีย อนุภาคนาโนโลหะที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการสามารถสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชั่นในวัฏภาคสารละลาย

2.2.1 อนุภาคนาโนเงิน

อนุภาคนาโนเงินมีลักษณะสมบัติเหมือนกันกับเงินทั่วไป อนุภาคนาโนเงินเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นไอออนเงินที่แตกตัวอยู่ในน้ำได้ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ต่อไป โดยนาโนเงินซึ่งเป็นของแข็งที่เป็นโลหะมักจะไม่ละลายน้ำ แต่จะอยู่ลักษณะรวมเป็นกลุ่มก้อนหรือในรูปของอนุภาคนาโนที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อนาโนเงินปรากฏในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนของเงินและเกิดการ ออกซิเดชันที่ผิว ซึ่งจะทำให้ได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปของ Ag^{+} ที่ล้อมรอบด้วยนาโนเงินที่ยังอยู่ในรูปโลหะหรืออนุภาคนาโนอยู่ในน้ำ อนุภาคนาโนเงินเมื่อปรากฏในน้ำจึงจะให้ไอออนของเงินด้วย ซึ่งในการพิจาณาถึงเคมีของอนุภาคนาโนเงิน จึงต้องครอบคลุมถึงไอออนของเงินร่วมด้วย[4]

จากการที่อนุภาคนาโนเงินมีขนาดเล็กกว่าเงินทั่วไปมากจึง ทำให้มีลักษณะสมบัติในส่วนของพื้นผิวที่แตกต่างกันไป เช่น มีแนวโน้มที่จะระเบิดได้ซึ่งมาจากการที่สารนาโนเงินมักมีอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และเล็กกว่าเงินทั่วไปอย่างมาก การสะสมหรือรวมตัวเป็นฝุ่นของสารนาโนเงินจึงจะทำให้เกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้นาโนเงินสามารถรวมเป็นก้อนกรานูลได้ ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่สารนาโนเงินมีขนาดเล็กมารวมกัน แต่ยังคงมีขนาดในระดับเล็กมาก เช่น สารนาโนเงินที่รวมกลุ่มมีขนาดเล็ก 15

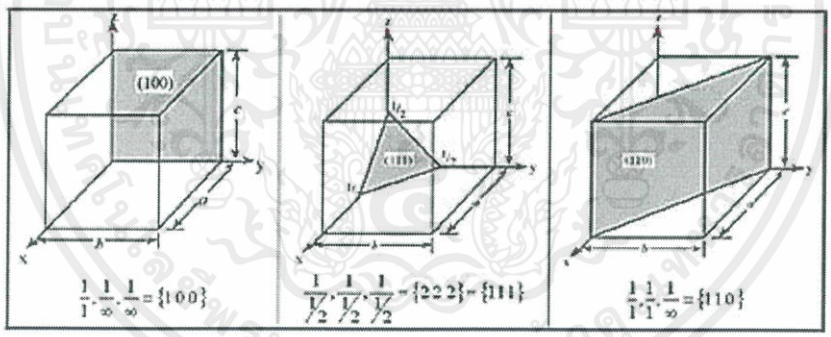
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 20 นาโนเมตร เป็นต้น ส่งผลให้ลักษณะสมบัติอื่นๆ เช่น พื้นที่ผิว ชนิดประจุบนพื้นผิว รวมทั้งลักษณะควอนตัมแตกต่างจากเงินทั่วไป ซึ่งส่งผลให้เกิดการนำอนุภาคนาโนเงินไปเป็นวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น พลาสติก ผ้า กระดาษ สี และสารเคลือบได้

2.2.1.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนเงิน

คุณสมบัติการฆ่าเชื้อโรค

นาโนเงินเป็นสารที่ฆ่าเชื้อโรคได้ในวงกว้างทั้งในส่วนจุลินทรีย์ที่เป็นแกรมบวกและแกรมลบ[5] โดยตัวอย่างของจุลินทรีย์แกรมลบได้แก่ Acinetobacter, Escherichia, Pseudomonas, Salmonella และ Vibrio acinetobacter และ ตัวอย่างของจุลินทรีย์แกรมบวกได้แก่ Bacillus, Clostridium, Enterococcus, Listeria, Staphylococcus และ Streptococcus ขนาดของนาโนเงินที่มีขนาดเล็กมาก ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้สามารถฆ่าจุลินทรีย์ได้ดีแม้ว่าจุลินทรีย์จะมีในปริมาณน้อยมากๆ นอกจากนี้รูปร่างของเงินที่แตกต่างกัน เช่น ทรงกลม แท่ง หรือแผ่นสามเหลี่ยม ทำให้เกิดการกำจัดจุลินทรีย์แกรมลบได้แตกต่างกันอีกด้วย โดยนาโนเงินที่มีรูปร่างแผ่นสามเหลี่ยมสามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากระนาบด้านบนเป็นบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวที่ทำให้พื้นที่ผิวมีความหนาแน่นของอะตอมเงินสูงสุด เช่น การเรียงตัว {111} เป็นต้น ในขณะที่นาโนเงินทรงกลมจะมีลักษณะเป็น {100} โดยมีส่วนน้อยที่เป็น {111} ส่วนนาโนเงินแบบแท่งจะมีด้านของเป็น {100} และมีส่วนด้านปลายเท่านั้นที่เป็น {111} [6,7] ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของผลึกของอนุภาคนาโนซิลเวอร์

คุณสมบัติ surface plasmon resonance

เป็นคุณสมบัติของนาโนเงินที่มีขนาดเล็กมากที่ส่งผลให้อนุภาคของนาโนเงิน มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงเรียกว่า surface plasmon resonance ส่ง ผลให้อนุภาคนาโนเงินดูดกลืนแสงสเปคตรัม โดยช่วงความยาวคลื่นของแถบคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ สั้นลงกว่าเดิมคุณสมบัตินี้ของนาโนเงินได้ถูกนำไปใช้ในการผลิตเซนเซอร์ สำหรับการแพทย์ และเซนเซอร์ในรูปแบบ lap-on-a-chip (Moores and Goettmann, 2006) โดยพบว่าขนาดของอนุภาคนาโนเงินจะส่งผลต่อคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืน โดยยิ่งมีขนาดเล็กจะทำให้ช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมของแสงที่ถูกดูดกลืนจะสั้นลง โดยอนุภาคนาโนเงินที่เล็กลง (ขนาดน้อยกว่า 10 นาโนเมตร) จะสอดคล้องกับการดูดกลืนคลื่นในแถบแสงสีแดงและช่วยขยายความกว้างของตำแหน่ง คลื่นการดูดซับด้วย นอกจากนี้คุณสมบัตินี้ได้ยังนำไปใช้ในการทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์และระบบการนำพายา (drug delivery) ซึ่ง อนุภาคนาโนเงินไม่เพียงแต่ดูดซับโฟตอนแม้ว่าจะอยู่ห่างจากต้นกำเนิดแสง เท่านั้น แต่ช่วยส่งผ่านความร้อนไปยังโพลีเมอร์โดยรอบ ทำให้ยาที่ถูกห่อหุ้ม (encapsulated) สามารถกระจาย ตัวออกมาจากแคปซูลโพลีเมอร์ได้ คุณสมบัตินี้ของอนุภาคนาโนเงินได้ถูกนำไปใช้ในการรักษาด้วยเลเซอร์โดย ช่วงระยะเวลาในการรักษาโรคด้วยเลเซอร์ร่วมกับ polyelectrolyte multilayer capsule จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโนเงินอีกด้วย

คุณสมบัติการเรืองแสง

เป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุนาโนที่เป็นของแข็งเมื่อมีขนาด 30-80 นาโนเมตร คือการเปลี่ยนช่วงคลื่นแสง เช่น การปลดปล่อยความเข้มและ photostablilty เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อการเรืองแสงของวัสดุ โดยขนาดของอนุภาคนาโนเงินจะเพิ่มความ เข้มแสงในช่วงคลื่นที่เกิดการเรืองแสงที่มีควอนตัมต่ำออกมา โดยได้นำไปใช้งานใน immunoassay และการตรวจ DNA/RNA

2.2.1.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

จากการที่นาโนเงินสามารถส่งผ่านไฟฟ้าและความร้อนได้ดีควบคู่ไปกับคุณสมบัติ เชิงแสง จึงทำให้ถูกนำมาใช้มากในอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ โดยนำมาใช้ทั้งในส่วนการเป็น nanoconnector และ nanoelectrode ในการออกแบบเครื่องมือขนาดเล็กและนำมาใช้ในการเป็น active waveguide ในเครื่องมือเชิงแสง หมึกพิมพ์ในแผงวงจร นำมาใช้ใน optoelectronicsรวมไปถึง nanoelectronics เช่น single-electron transistors และ electrical connectors เป็นต้น นาโนเงินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการจัดทำ data storage device รวมไปถึง recording devices โดยอุปกรณ์เหล่านี้ได้ทำให้อนุภาคนาโนเงินปรากฏในเครื่องมืออิเล็กโทรนิกส์อื่นๆ หลากหลายชนิด

อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค

โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้มุ่งเน้นในส่วนของการป้องกันเชื้อโรค หรือฆ่าเชื้อโรค โดยอนุภาคนาโนเงินได้ถูกนำมาใช้ในการเป็นสารฆ่าเชื้อโรคสำหรับผลิตภัณฑ์ ต่างๆ หลากหลายชนิด เช่น เครื่องกรองอากาศ สเปรย์ในอากาศ ถุงเท้า หมอน รองเท้าแตะ หน้ากาก ผ้าอ้อม สบู่ ผงซักฟอก แชมพู ยาสีฟัน เครื่องซักผ้า เป็นต้น โดยวัตถุประสงค์หลักในการมีอนุภาคนาโนเงินในผลิตภัณฑ์เพื่อใช้คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์หลากหลายชนิดเป็นหลัก

อุตสาหกรรมทางการแพทย์

อนุภาคนาโนเงินได้ถูกนำมาใช้งานทางการแพทย์ในหลายด้าน ได้แก่ การตรวจโรค การรักษาระบบนำส่งยา และการเคลือบเครื่องมืออุปกรณ์ทางการแพทย์ อนุภาคนาโนเงินได้นำมาใช้ในการเคลือบผิวอุปกรณ์ทางการแพทย์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์ในการผ่าตัด การฉีดยาชาและการระงับความรู้สึก การรักษาเกี่ยวกับหัวใจ เป็นต้น[8] จากนี้ยังได้มีการนำอนุภาคนาโนเงินไปใช้ในผลิตภัณฑ์ทั่วไปทางการแพทย์ เช่น ผ้าปิดแผล ถุงเท้า ผ้าหรือสิ่งทอทางการแพทย์ สายสวนปัสสาวะ และวัสดุปลอดเชื้อต่างๆ

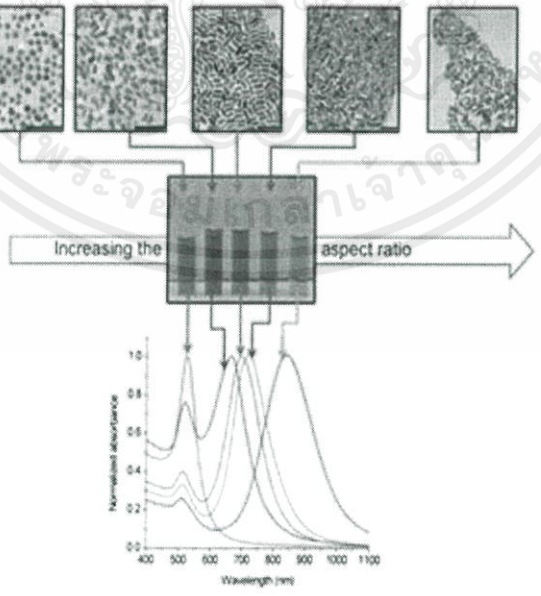
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อนุภาคนาโนทอง

อนุภาคนาโนทอง เป็นวัสดุนาโนโลหะที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทองทำได้โดยการเรโซแนนซ์เชิงแสงให้เห็นชัดเจน ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ขนาด และรูปร่างของอนุภาค รวมถึงการทำปฏิกิริยาเชิงแสงในระบบเรโซแนนซ์ โดยสมบัติเฉพาะพิเศษของอนุภาคนาโนทองนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์เชิงแสงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.2.2.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนทอง

ทองคำ หรือ ทองคำเป็นธาตุที่รู้จักกันโดยทั่วไป โดยมีลักษณะสมบัติที่เป็นธาตุเฉื่อย มักไม่ทำปฏิกิริยา และได้นำมาใช้กันมาทางการแพทย์ในการเป็นสารป้องกันการอักเสบของเนื้อเยื่อ เมื่อทองคำมีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับนาโนที่มีขนาดตั้งแต่ 5 นาโนเมตรขึ้นไป จะยังคงมีลักษณะสมบัติเหมือนกันกับทองคำทั่วไป แต่เมื่อมีขนาดต่ำกว่า 5 นาโนเมตร จะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างจากทองคำ ได้แก่ สีของอนุภาคนาโนของทองคำจะมีสีหลากหลาย เช่น แดง ฟ้า เขียว หรือน้ำตาล ซึ่งไม่ได้ปรากฏเป็นสีทองเหมือนกับทองคำทั่วไป สีที่แตกต่างนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนในแถบของ conduction ในอนุภาคนาโนโลหะกับสนามไฟฟ้าที่มาจากแสงที่ตกกระทบ ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดของอิเล็กตรอนใน conduction band เกิดขึ้น ซึ่งการแทรกสอดนี้เรียกว่า localized surface plasmon resonance (LSPR) ซึ่ง เกิดภายใต้สเปคตรัมของแสงวิซิเบิล และแสงใกล้รังสีเหนือม่วง โดยการเปล่งแสงสีต่างๆ นี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาคนาโนของทองคำ เช่น ทองคำในรูปของแท่งนาโนจะสามารถดูดซับแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 800-1200 นาโนเมตร เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 การเปล่งแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีรูปร่างต่างๆ ตามความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

อตสาหกรรมทางการแพทย์

การนำอนุภาคนาโนทองคำมาใช้งานทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ การตรวจวัดและกำจัดเซลล์ก้อนเนื้อ โดยมีการนำอนุภาคนาโนทองคำที่มีรูปร่างแท่ง และทรงกลมมาใช้ในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย และการกำจัดก้อนเนื้อที่เป็นส่วนของเซลล์มะเร็งได้ อนุภาคนาโนทองคำยังได้นำไปใช้ในระบบนำส่งยา (drug delivery) โดยอนุภาคนาโนทองคำได้ถูกนำไปใช้ในการนำส่งยาที่มุ่งเป้าในการรักษาเซลล์ มะเร็งร่วมกับการฉายแสง ซึ่งจะทำให้อนุภาคนาโนร้อนและสามารถกำจัดเซลล์มะเร็งไปพร้อมกัน โดยจากงานวิจัยของ Patra และคณะ อนุภาคนาโนทองคำได้ทำให้เกิดการตายของเซลล์ชนิด carcinoma lung cell line A549 ได้

นอกจากนี้ยังได้มีการนำอนุภาคนาโนทองคำไปใช้ในการผลิตเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดเนื้อร้ายที่เกิดขึ้น และนำไปใช้ในการตรวจวัดสารพันธุกรรมและ DNA โดย Park และคณะได้พัฒนาเครื่องตรวจวัด DNA โดยใช้อนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งสามารถวัด DNA ได้อย่างแม่นยำและวัดความเข้มข้นของ DNA ได้ถึง 500femtomolar โดยมี point mutation selectivity factor เป็น 100,000 : 1 ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการวัด DNA แทนเทคนิคที่เคยใช้มา และนำมาใช้ในการตรวจวัดเชื้อโรคหลากหลายชนิดอีกด้วย[9]

การสร้างภาพทางชีวภาพหรือภาพอวัยวะ เนื้อเยื่อต่างๆ ที่อยู่ในร่างกายที่เรียกว่า bioimaging เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่มีการนำอนุภาคนาโนทองคำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยลักษณะสมบัติในการแทรกสอดแสง (plasmon resonance) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง โครงสร้าง และดัชนีการหักเหของตัวกลางไปใช้งานในการสร้างภาพอวัยวะต่างๆ

อุตสาหกรรมเคมี

อนุภาคนาโนทองคำได้ถูกนำมาใช้ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้ลักษณะสมบัติของอนุภาคนาโนที่เป็นโลหะ จากการแทรกสอดของอิเล็กตรอนจาก conduction band ของทองคำเมื่อได้รับแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทำให้อนุภาคนาโนทองคำมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี

2.2.3. อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

2.2.3.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนทอง

ซิงก์ออกไซด์ เป็นสารประกอบที่สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ และสามารถเตรียมขึ้นมาให้บริสุทธิ์ได้ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) นอกจากนี้ซิงก์ออกไซด์มีช่องว่างแถบพลังงาน (band-gap energy) ที่อุณหภูมิห้องกว้างประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นสารที่มีสมบัติพิเศษทางแสง โดยเรืองแสงได้และมีค่าความต่างศักย์ต่ำ มีความยาวคลื่นสั้นในช่วงแสงสีเขียวถึงฟ้าจึงนำไปใช้เป็นไดโอดที่เปล่งแสงได้

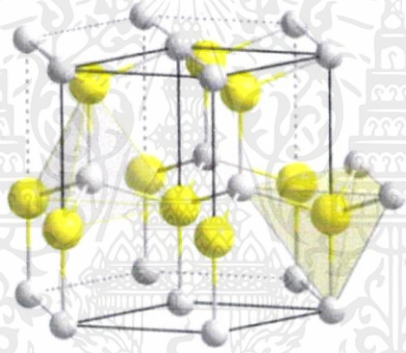
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรโมเลกุล	ZnO
ลักษณะและสี	ผงสีขาว หรือขาวเหลือง
ความหนาแน่น	5.600 g/cm3
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิห้อง	5.642 g/cm3
จุดหลอมเหลว (melting point)	1800°c
จุดเดือด (boiling point)	2248°c
ความร้อนจำเพาะ (specific heat)	0.125 cal/g
สภาพนำความร้อน (thermal conductivity)	0.006 cal/cm/K

นอกจากนี้ซิงก์ออกไซด์ มีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก (amphoteric) ละลายน้ำได้น้อยมาก และละลายได้ดีทั้งในกรดและเบส

โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์

โครงผลึกโดยทั่วไปของซิงก์ออกไซด์เป็นแบบ wurtzite หรือ hexagonal โดยมี โครงสร้างผลึกดังรูป



ภาพที่ 2. 5 โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์

ลักษณะที่สำคัญของโครงสร้าง wurtzite คือเป็นโครงสร้างสมมาตรที่ไม่มีอะตอมกลางและลักษณะผิวมีขั้ว โดยมีแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameters) a =0.3296 และ c=0.52065 nm

โครงสร้างออกไซด์เกิดจากการยึดเกาะกันของอะตอมโลหะ (ประจุบวก) กับอะตอออกซิเจน (ประจุลบ) ด้วยพันธะไอออนิก โดยอะตอมออกซิเจนเรียงตัวยึดกันแน่นชิดมากที่สุดแบบ hexagonal close packing เกิดช่องว่างเตตระฮีดรอล (tetrahedral hole) โดยมีอะตอมของโลหะแทรกอยู่ในช่องว่างเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องที่มีอยู่ทั้งหมดหรือแบบ hole เว้น hole ซึ่งในโครงสร้าง wuritzite ของ ZnO ประกอบไปด้วย ไอออนบวก (Zn2+) จะเกิดการโคออร์ดิเนตกับไอออนลบ (O2-) และไอออนชนิดหนึ่งจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนตรงข้ามเป็นแบบเตตระฮีดรอล มีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 4:47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

ด้านเภสัชกรรม

นาโนซิงก์ออกไซด์เป็นสารที่สามารถเติมในอาหารได้โดยมีความปลอดภัยสูง สามารถใช้ได้ทั้งในอาหารคนและอาหารสัตว์ เนื่องจากธาตุสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยปกติร่างกายผู้ใหญ่ต้องการสังกะสีวันละ 15 มิลลิกรัม และเพิ่มขึ้นเป็น 25 มิลลิกรัม ในสตรีที่ให้นมบุตร ซิงก์ออกไซด์เป็นยาสมานแผล ลดการอักเสบ และยับยั้งแบคทีเรียได้ดี โดยนำมาใช้เป็นยาสมานผิว และรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิด เช่น โรคเรื้อนกวาง โรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพองจากเชื้อแบคทีเรีย โรคกลากเกลื้อน ฝี อาการคันตามผิวหนังและผิวระคายเคือง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ใช้จะอยู่ประมาณ 10 ถึง 20 นาโนเมตร จากการสังเกตภายใต้กล้องกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาวและไม่เปลี่ยนสี

ด้านเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์กันแดด

1. นาโนซิงก์ออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันรังสี UVA แล UVB นอกจากนั้นยังมีอนุภาคเล็กละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง และปลอดภัย เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดดสำหรับผิวเพื่อปกป้องรังสี UV ซิงก์ออกไซด์มีความปลอดภัยและอ่อนโยนต่อร่างกายโดยได้รับการยืนยันจาก Food and Drug Administration (FDA) USA. ว่าเป็น 1 ใน 2 ชนิดของสารกันแดดที่เป็นส่วนผสมในประเภทผลิตภัณฑ์ดูแลผิวซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้ง UVA และUVB

2. อนุภาคปกติของซิงก์ออกไซด์จะมีสีขาวเมื่อนำมาทาลงบนผิว ดังนั้นจึงไม่นิยมนำซิงก์ออกไซด์มาใช้ในการเป็นครีมหรือผลิตภัณฑ์กันแดดสำหรับผิว อย่างไรก็ตามนาโนซิงก์ออกไซด์ได้รับการทดสอบโดย Australian commonwealth scientific & industrial research organization (CSIRO) พบว่านาโนซิงก์ออกไซด์เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของครีมหรือโลชั่นกันแดดจะให้สัมผัสนุ่มลื่น โปร่งใส และไม่มีสีหลังจากที่ทาลงบนผิว นาโนซิงก์ออกไซด์จึงเหมาะที่จะนำมาผสมเป็นสารกันแดดในเครื่องสำอาง

ด้านอุตสาหกรรมอาหารสัตว์และยา

อาหารสัตว์ที่มีนาโนซิงก์ออกไซด์จะให้ผลดีกว่าการเติมไมโครซิงก์ออกไซด์ โดยจะทำให้อัตราการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้สูงกว่า ทำให้ลดปริมาณการเติมซิงก์ออกไซด์ในอาหารได้

ด้านอุตสาหกรรมการผลิตยาง

นาโนซิงก์ออกไซด์ถูกใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว ช่วยในการยืดอายุการใช้งานของยางและใช้ในการผลิตยางที่สามารถป้องกันรอยขูดขีด

ด้านอุตสาหกรรมเซรามิก

ปกติในอุตสาหกรรมเซรามิกจะใช้ซิงก์ออกไซด์ในการให้สีขาวจากการใช้นาโนซิงก์ออกไซด์ พบว่าสามารถช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกให้เหลือเพียง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยหลังการเผาพบว่าผิวของเซรามิกที่ได้มีความมันวาวราวกับกระจก

ด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ

ผลิตสิ่งทอป้องกันแบคทีเรียและเชื้อราการกำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า เสื้อผ้าทำความสะอาดตัวเอง ผลิตเส้นใยและสิ่งทอที่สามารถป้องกันรังสี UV ได้

ด้านอุตสาหกรรมสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนซิงก์ออกไซด์เป็นสารป้องกันไฟฟ้าสถิตชนิดใหม่ ซึ่งมีความสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำ การเติมนาโนซิงก์ออกไซด์ในเรซินจะสามารถนำมาใช้ป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ ทั้งยังสามารถผลิตสีป้องกันรังสี UV สีที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้

2.2.4 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide) ไททานิกแอนไฮไดร (Titanic anhydride) และไททาเนีย (Titania)

ไททาเนียมเป็นแร่ที่ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1791 ในเหมืองแร่เหมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ โดยนักธรณีวิทยาชื่อ William Gregor ใช้สัญลักษณ์แทนคือ Ti มีเลขอะตอม 22 มีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรด-ด่าง ได้ดี ไททาเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่อิลเมไนต์ (ilmenite) หรือ ลิวโซซีน (leuxocene) โดยทำให้บริสุทธิ์ได้โดยวิธี rutile beach sand

2.2.4.1 สมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติทางกายภาพ

- ลักษณะ ของแข็ง สีขาว
- น้ำหนักโมเลกุล 79.87 g mol^{-1}
- ความหนาแน่น 4.23 g cm^{-3}
- จุดหลอมเหลว 1870 C
- จุดเดือด 2972 C
- การละลาย ไม่ละลายน้ำ
- ความเป็นพิษ ไม่เป็นพิษ

2.2.4.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมสี

อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้อง มักใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาว สามารถดูดกลืน และหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

อุตสากรรมสารเคลือบผลิตภัณฑ์

มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว กระจก อุตสาหกรรมผลิตกระเบื้อง การผลิตสุขภัณฑ์ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะ และเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน รวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนั้น การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ามักใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

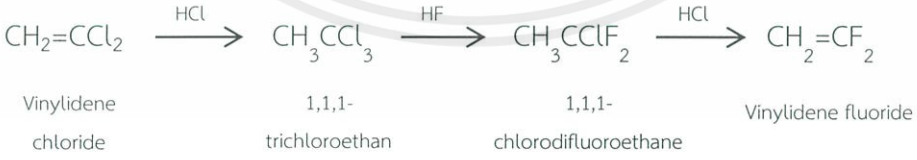
เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผงละเอียดสีขาว มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และทาทับ เป็นต้น

อุตสาหรรมด้านการบำบัดมลพิษ

ใช้เป็นสารดูดซับ โดยใช้งานในด้านการบำบัดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวดูดซับมลพิษ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสง และความร้อน จะแตกตัวให้สาร และรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำ และอากาศ รวมถึงการกำจัด และต้านเชื้อจุลินทรีย์

2.3 พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์

พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF หรือ PVF_2) เริ่มวางตลาดเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1961 โดยบริษัทเพนวอลท์เคมีคอล (Pennwalt Chemical Corporation) ภายใต้เครื่องหมายการค้า Kynar ไวนิลลิดีนฟลูออไรด์สามารถเตรียมได้จากไวนิลลิดีนคลอไรด์ ดังสมการ..... ในขั้นตอนแรกใช้อุณหภูมิประมาณ 30 °C และความดัน 30 บรรยากาศ โดยมีแอนทิโมนีเพนตะคลอไรด์ ($SbCl_5$) เป็นตัวเร่ง ส่วนขั้นตอนสุดท้ายคือการดึงเอาอะตอมของไฮโดรเจนและคลอรีนออกโดยกระบวนการไพโรลิซีส (pyrolysis)



ภาพที่ 2. 6 สมการการเตรียมพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์

PVDF เป็นวัสดุพลาสติกที่อยู่ในกลุ่มฟลูออโรพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ชนิดนี้นิยมนำไปใช้งานที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง มีความแข็งแรงและทนทานต่อตัวทำละลาย ความเป็นกรด-เบส ทนความร้อนได้ดีจึงสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 150°C และทนทานต่อการใช้งานกลางแจ้งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้กระบวนการหลอม PVDF ยังทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับฟลูออโรพอลิเมอร์ชนิดอื่น เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PVDF มีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 177 ˚C ตัวอย่างการใช้งานของพอลิเมอร์นี้ ได้แก่ การใช้งานในโรงงานเคมีภัณฑ์และโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูป ใช้เป็นฟิล์มห่อของปลอกหุ้มเส้นลวดไฟฟ้า เป็นต้น

PVDF มีอยู่ด้วยกันหลายเฟส ได้แก่ แอลฟา (TGTG$^{'}$) บีตา (TTTT) และแกมมา (TTTGTTTG$^{'}$) ซึ่งมีความแตกต่างกันในลักษณะการเชื่อมต่อของสายโซ่แบบ trans (T) หรือ gauche (G) ดังแสดงในรูป .... เนื่องจาก PVDF เป็นพอลิเมอร์เฟอร์โรอิเล็กตริก จึ่งสามารถแสดงสมบัติเพียโวอิเล้กตริกและไพดรอิเล็กตริกได้เมื่อผ่านการทำขั้วไฟฟ้า จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้สามารถนพมาประยุกต์ในอุปกรณ์ตรวจจับ (sensor) และแบตเตอรี่ (battery) [10,11]

2.4 อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าพลังงานระดับนาโน (nanogenerator)

2.4.1 พลังงานในธรรมชาติ

2.4.1.1 ความสำคัญของพลังงาน

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ ในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐาน ของประชาชน และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิต ในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ดังนั้น จึงต้องมีการจัดหาพลังงาน ให้มีปริมาณที่เพียงพอ มีราคาที่เหมาะสม และมีคุณภาพที่ดี สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ เพื่อให้สามารถตอบสนอง ความต้องการขั้นพื้นฐาน ของประชาชน และสามารถตอบสนอง ความต้องการใช้ในกิจกรรมการผลิตต่างๆ ได้อย่างเพียงพอ

พลังงานที่เราใช้อยู่ในปัจจุบัน อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ พลังงานสิ้นเปลือง และพลังงานหมุนเวียน โดยพลังงานสิ้นเปลือง คือ พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ซึ่งรวมถึงถ่านหิน หินน้ำมัน ทรายน้ำมัน น้ำมันดิบ น้ำมันเชื้อเพลิง และก๊าซธรรมชาติ ส่วนพลังงานหมุนเวียน หมายความรวมถึง พลังงานที่ได้จากไม้ ฟืน แกลบ กากอ้อย ชีวมวล น้ำ แสงอาทิตย์ ลม และคลื่น

2.3.1.2. คุณสมบัติของพลังงานแต่ละชนิด[10,12]

น้ำมันดิบ

มีสถานะตามธรรมชาติ เป็นของเหลวประกอบด้วย สารไฮโดรคาร์บอน ชนิดระเหยง่าย เป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่เหลือประกอบด้วย สารกำมะถัน ไนโตรเจน และสารประกอบออกไซด์อื่นๆ ซึ่งมักเรียกว่าเป็นสิ่งปฏิกูล ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพ ของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นได้ ราคาของน้ำมันดิบ จะถูกหรือแพง ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำมันดิบว่า มีสิ่งปฏิกูลเจือปนมากน้อยเพียงใด ผลิตภัณฑ์ที่กลั่นได้จากน้ำมันดิบ ได้แก่ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันเครื่องบิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และยางมะตอย โดยก๊าซปิโตรเลียมเหลว จะใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการหุงต้ม ในยานพาหนะ และในภาคอุตสาหกรรม น้ำมันเบนซิน ดีเซล และน้ำมันเครื่องบิน จะใช้เป็นเชื้อเพลิง ในภาคคมนาคมขนส่ง ส่วนน้ำมันเตา จะใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตไฟฟ้า ในภาคอุตสาหกรรม และในการขนส่งทางน้ำ เมื่อมีการนำน้ำมันเชื้อเพลิง ไปเผาไหม้ ก็จะมีฝุ่นละออง เขม่า และก๊าซที่ถูกปล่อยออกมา ระหว่างขบวนการเผาไหม้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุม ในเรื่องของคุณภาพน้ำมัน และการใช้เทคโนโลยีต่างๆ มาช่วยในการควบคุมเพื่อลดปริมาณ ฝุ่นละออง และก๊าซดังกล่าวไม่ให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน และสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซธรรมชาติ

ประกอบด้วย สารไฮโดรคาร์บอนประเภทต่างๆ เป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือ ประกอบด้วยก๊าซประเภทอื่นๆ โดยเฉพาะไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปนอยู่ด้วยในระดับหนึ่ง การซื้อขายก๊าซธรรมชาติ จะคิดราคาตามค่าความร้อน ของเชื้อเพลิง ส่วนข้อกำหนดอื่นๆ จะเป็นส่วนประกอบ ที่ช่วยให้ความมั่นใจ ในความสะอาดว่า จะไม่มีปัญหาในการใช้ ซึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อม

จากการใช้ก๊าซธรรมชาติมีค่อนข้างน้อย เนื่องจากในขบวนการ เผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ จะถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เพื่อให้มีการใช้ประโยชน์ ได้อย่างสูงสุด ก๊าซธรรมชาติจะถูกนำไปแยกก่อนการใช้ โดยส่วนที่เป็น ก๊าซมีเทน มักจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตไฟฟ้า และในอุตสาหกรรม รวมทั้ง ใช้เป็น เชื้อเพลิงในยานพาหนะ ส่วนที่เป็นอีเทน และโพรเพน จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบ ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และส่วนที่เป็นโพรเพนและบิวเทน จะนำไปใช้เป็นก๊าซหุงต้ม ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม และยานพาหนะ

ถ่านหิน

หินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งสามารถติดไฟได้ และมีส่วนประกอบ ที่เป็นสารประกอบ ของคาร์บอนไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก หรือ ร้อยละ 70 โดยปริมาตร และยังมีสารประกอบ อื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน เป็นต้น

ตารางที่ 2. 1 การจำแนกคุณสมบัติของถ่านหิน ตามคุณสมบัติทางเคมี และค่าความร้อนอย่างหยาบๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด

ถ่านหิน	ค่าความร้อน	ค่าความชื้น	ปริมาณขี้เถ้า	ปริมาณกำมะถัน
แอนทราไซท์	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
บิทูมินัส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
ซับบิทูมินัส	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ลิกไนต์	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ-สูง

ส่วนใหญ่มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำ เช่น โรงงานกระดาษ และโรงงานชูรส เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการ เผาไหม้ถ่านหินจะมีการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ฝุ่นละออง และควัน ดังนั้น ก่อนนำเชื้อเพลิงไปใช้จะต้องหาวิธีการจัดการ กับมลพิษ โดยอาจเลือกใช้ถ่านหินคุณภาพดี หรืออาจลดปริมาณสารมลพิษในเชื้อเพลิง ก่อนนำไปใช้ หรือใช้เทคโนโลยี ในการกำจัดมลพิษที่เกิดขึ้น ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

เชื้อเพลิงชีวมวล

สารทุกรูปแบบที่ได้จากสิ่งมีชีวิต รวมทั้ง การผลิตจากการเกษตรและป่าไม้เช่น ไม้ฟืน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ รวมถึง ของเสียจากสัตว์ เช่นมูลสัตว์และของเสีย จากโรงงานแปรรูปทางเกษตร และขยะมาผลิตก๊าซชีวภาพ ในการผลิตพลังงาน จำนวนเท่าๆ กันต้องใช้ไม้ฟืน ในปริมาตรที่มากกว่าน้ำมันและถ่าน ดังนั้น จึงเหมาะที่จะใช้ใน ครัวเรือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังน้ำ

เป็นพลังงานที่ได้มาจากแรงอัดดันของน้ำ ที่ปล่อยจากอ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อน น้ำที่ปล่อยไปนี้จะได้รับการทดแทนทุกปี โดยฝนหรือการละลายของหิมะ แต่ในการก่อสร้างอ่างเก็บน้ำจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยต้องสูญเสียพื้นที่ป่าไม้ ต้องมีการอพยพสัตว์ป่า และชาวบ้านที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ทำให้ชีวิตความเป็นอยู่ และสภาพแวดล้อม บริเวณดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป

พลังงานแสงอาทิตย์

ได้มาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ซึ่งนำมาใช้เป็นพลังงานความร้อน และการสังเคราะห์แสง หรือโดยผ่านอุปกรณ์รับแสง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเปลี่ยนเป็น พลังงานไฟฟ้าและความร้อนเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

พลังงานลม

เกิดจากการเคลื่อนตัวของอากาศ ถ้าอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะทำให้มีพลังงานมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้หมุนกังหันลม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

พลังงานความร้อนใต้พิภพ

เป็นการนำน้ำร้อนที่มีอยู่ใต้พื้นดิน มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กลุ่มประเทศที่มีการพัฒนาพลังงาน ความร้อนใต้พิภพ มาใช้ประโยชน์ อย่างเด่นชัดมักเป็นกลุ่มประเทศ ที่มีสภาพทางธรณีวิทยา เอื้ออำนวยต่อศักยภาพ ทางพลังงานความร้อนใต้พิภพ ซึ่งได้แก่ บริเวณที่เปลือกโลกมีการเคลื่อนไหว และมีแนวของภูเขาไฟอย่างต่อเนื่อง เช่น ประเทศอิตาลี ไอซ์แลนด์ สหรัฐอเมริกา (แถบตะวันตก) เม็กซิโก ญี่ปุ่น ฟิลิปปินส์อินโดนีเซีย นิวซีแลนด์ เป็นต้น

พลังงานนิวเคลียร์

เป็นพลังงานที่ได้มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของ นิวเคลียสของธาตุเชื้อเพลิง เช่น ยูเรเนียม และให้พลังงานความร้อนมหาศาล จึงใช้ในการผลิตไฟฟ้า ปฏิกิริยานิวเคลียร์สามารถขจัดปัญหา การปล่อยมลพิษทางอากาศ รวมทั้ง การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ที่เป็นปัญหาหลักของเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ แต่ก็มีปัญหาสิ่งแวดล้อมอื่นที่อาจเกิดจาก การใช้สารรังสี ซึ่งหากมีเทคโนโลยีควบคุมที่ดี ก็จะป้องกันการรั่วไหลของสารรังสีได้ นอกจากนี้ ยังมีปัญหาเรื่องการกำจัดกากนิวเคลียร์ ซึ่งจะต้องมีมาตรการควบคุมดูแล ไม่ให้การกำจัดกาก ของเสียส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เนื่องจากสารเหล่านี้มีค่าทางรังสีสูงมาก และจะคงสภาพอยู่เป็นเวลานับพันๆ ล้านปี

2.3.1.3 การใช้พลังงานและแหล่งสำรองของโลก

ปัจจุบันการใช้พลังงานของโลก ประกอบด้วย เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินมีปริมาณรวมกันถึงร้อยละ 95 และอีกร้อยละ 2 มาจากพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนที่เหลือร้อยละ 3 นำมาจากพลังงานประเภทอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานจากคลื่นในมหาสมุทร และพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น โดยปริมาณการใช้พลังงานของโลกในปี 2540 มีปริมาณเมื่อเทียบเท่า น้ำมันดิบรวมทั้งสิ้น 9,371 พันล้านลิตร แบ่งเป็น พลังงานชนิดต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. 2 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานปฐมภูมิของโลกในปี 2540

พลังงาน	พันล้านลิตร เทียบเท่าน้ำมันดิบ	ร้อยละ
น้ำมัน	3,949	42
ถ่านหิน	2,666	28
ก๊าซธรรมชาติ	2,299	25
พลังงานนิวเคลียร์	194	2
พลังงานหมุนเวียน และอื่นๆ	263	3
รวม	9,371	100

หมายเหตุ พลังงานปฐมภูมิ (Primary Energy) หมายถึง พลังงานที่ยังไม่ผ่านการแปรรูปไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง

เชื้อเพลิงที่ใช้แพร่หลาย ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ พลังน้ำ ความร้อนใต้พิภพ พลังลม และอื่นๆ โดยในปี 2538 ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในโลก คือ มีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 43.1 รองลงมาได้แก่นิวเคลียร์ ร้อยละ 20.0 ก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 18.6 น้ำมัน ร้อยละ 10.2 และอื่นๆ อีกร้อยละ 8.2 ในเอเชีย-แปซิฟิก และทวีปอเมริกาเหนือ ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน ไฟฟ้ามากกว่าครึ่งหนึ่งของเชื้อเพลิง ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งมากกว่าการใช้ในทวีป อื่นๆ ส่วนประเทศในตะวันออกกลาง ซึ่งมีน้ำมันของตนเอง และก๊าซธรรมชาติ จะใช้น้ำมันและ ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงหลัก ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 แสดงสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของโลก ปี 2538 (หน่วย : ร้อยละ)

การใช้พลังงาน	ถ่านหิน	ก๊าซธรรมชาติ	น้ำมัน	นิวเคลียร์	พลังน้ำและอื่นๆ	รวม
อเมริกาเหนือ	15.3	4.9	0.7	7.1	3.0	31.0
เอเชีย และออสเตรเลีย	14.3	2.7	3.5	3.6	2.1	26.2
ยุโรป	6.0	2.0	1.7	7.2	1.9	18.8
โซเวียตและอื่นๆ	5.9	7.2	2.4	2.0	1.0	18.5
ตะวันออกกลาง และอาฟริกา	1.6	1.8	1.8	0.1	0.2	5.5
รวมการใช้ของโลก	43.1	18.6	10.1	20.0	8.2	100.0

การเลือกใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของประเทศต่างๆ มีปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก มีปริมาณที่เพียงพอและแน่นอน นอกจากนี้จะต้องมีการกระจาย แหล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงหลายชนิด เพื่อกระจายความเสี่ยง และต้องเป็นเชื้อเพลิง ที่มีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อย ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่หลายประเทศ เลือกใช้ เพราะว่ามีราคาถูก ราคามีเสถียรภาพ และมีความมั่นคงในการจัดหา แม้ประเทศเหล่านั้นจะมีทรัพยากรพลังงาน ทั้งก๊าซธรรมชาติและ น้ำมันอยู่ในประเทศมากก็ตาม เช่น

- **สหรัฐอเมริกา** มีปริมาณสำรองก๊าซธรรมชาติมากถึง 4,757 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ และมีถ่านหิน 279,719 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ แต่สหรัฐอเมริกาเอง ก็ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตไฟฟ้าถึงร้อยละ 54.6 ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด
- **อังกฤษ** มีปริมาณสำรองก๊าซธรรมชาติมากถึง 766 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ และมีน้ำมัน 795 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ แต่อังกฤษมีพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงถึงร้อยละ 47.8 ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด
- **ฮ่องกง** ซึ่งไม่มีทรัพยากรพลังงานเลย และเป็นประเทศเล็กๆ ประชากรอยู่หนาแน่น พลังงานไฟฟ้าเกือบทั้งหมด คือ ร้อยละ 96.6 ที่ผลิตได้ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง
- **ญี่ปุ่น ไต้หวัน และเกาหลีใต้** มีแหล่งพลังงานของตนเองน้อยมาก และพยายามกระจายเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินและนิวเคลียร์ โดย ประเทศเหล่านี้ใช้ถ่านหินในการผลิตพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 17.4, 34.3 และ 23.8 ตามลำดับ
- **ประเทศไทย** ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 44.1 น้ำมันร้อยละ 31.8 และลิกไนต์ร้อยละ 20.6 ในปี 2540

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบปริมาณสำรอง และการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ของประเทศต่างๆ
หน่วย : พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ

การใช้พลังงาน	ถ่านหิน		ก๊าซธรรมชาติ		น้ำมัน	
	สำรอง	ใช้ผลิตไฟฟ้า (%)	สำรอง	ใช้ผลิตไฟฟ้า (%)	สำรอง	ใช้ผลิตไฟฟ้า (%)
อเมริกา	279,719	54	4,757	16	4,738	2
อังกฤษ	2,907	48	766	15	795	5
ญี่ปุ่น	954	17	-	18	-	21
ฮ่องกง	-	97	-	0	-	3
ไต้หวัน	115	34	-	5	-	24
เกาหลีใต้	213	24	-	11	-	22
ไทย	1,676	21	354	44	17	32

หมายเหตุ

1. ปริมาณสำรองเป็นข้อมูล ณ สิ้นปี 2540
2. สัดส่วนของการผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด ในการผลิตไฟฟ้าใช้ข้อมูลปี 2538

แนวโน้มการใช้พลังงานของโลก จากการคาดการณ์ ของกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา คาดว่าน้ำมันยังคงมีสัดส่วนการใช้สูง เป็นอันดับหนึ่ง อันดับสอง คือ ก๊าซธรรมชาติ และรองลงมาคือ ถ่านหิน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาดว่าในอีก 20 ปีข้างหน้า หรือประมาณปี 2563 จะมีสัดส่วนการใช้น้ำมันร้อยละ 37 ก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 27 ถ่านหินร้อยละ 25 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 8 และพลังงาน นิวเคลียร์ร้อยละ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติ และพลังงานหมุนเวียนจะเพิ่ม สูงขึ้นจากปี 2540 หากโลกมีการใช้พลังงาน ในระดับที่เป็นอยู่ และไม่มีการค้นพบเพิ่มเติมแล้ว คาดว่าโลก จะมีแหล่งสำรองน้ำมันใช้ไปได้ อีกประมาณ 42 ปี ก๊าซธรรมชาติอีกประมาณ 64 ปี และถ่านหินอีกประมาณ 220 ปี นับตั้งแต่ปี 2540 เป็นต้นไป โดยแหล่งสำรองพลังงานดังกล่าว จะกระจายอยู่ ในภูมิภาคต่างๆ ของโลก และ ณ สิ้นปี 2540 มีปริมาณสำรองของพลังงานชนิดต่างๆ คงเหลือดังนี้

- **น้ำมัน** มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้ว คงเหลือ 164,966 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
- **ก๊าซธรรมชาติ** มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้ว คงเหลือ 146,050 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
- **ถ่านหิน** มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้ว คงเหลือ 584,018 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ

ตารางที่ 2. 5 แสดงแหล่งสำรองพลังงานของโลก ณ สิ้นปี 2540 สามารถจำแนกแหล่งตามภูมิภาคต่างๆ ของโลก

การใช้พลังงาน	น้ำมัน		ก๊าซธรรมชาติ		ถ่านหิน	
	พันล้านลิตร	ร้อยละ	พันล้านลิตร	ร้อยละ	พันล้านลิตร	ร้อยละ
ตะวันออกกลาง	107,620	65.2	49,314	33.8	113	0.02
อเมริกาเหนือ	12,179	7.4	8,439	5.8	141,702	24.26
อเมริกาใต้ และอเมริกากลาง	13,704	8.3	6,351	4.3	5,774	0.99
ยุโรป	3,211	2.0	5,614	3.8	88,656	15.18
สหภาพโซเวียต (เดิม)	10,398	6.3	57,214	39.2	136,437	23.36
อาฟริกา	11,129	6.7	9,959	6.8	34,987	5.99
เอเชีย-แปซิฟิก	6,725	4.1	9,159	6.3	176,349	30.20
รวม	164,966	100.0	146,050	100.0	584,018	100.0

2.3.1.4 การใช้พลังงานและแหล่งสำรองของไทย

ในปี 2540 ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานปฐมภูมิโดยรวม 93 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยมีสัดส่วนการใช้น้ำมันสูงเป็นอันดับหนึ่ง ถึงร้อยละ 42 อันดับสองคือ พลังงานหมุนเวียน ร้อยละ 26 รองลงมาคือ ก๊าซธรรมชาติร้อยละ 17 ลิกไนต์ร้อยละ 9 และถ่านหิน นำเข้าและซื้อไฟฟ้า สัดส่วนเท่ากันคือร้อยละ 3 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียน ของไทยค่อนข้างสูง พลังงานหมุนเวียนที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ไม้ฟืน ถ่าน กากอ้อย และแกลบ โดยส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มของครัวเรือนในชนบทและในอุตสาหกรรมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานปฐมภูมิ (Primary Energy) ของไทยในปี 2540

พลังงาน	พันล้านลิตร เทียบเท่าน้ำมันดิบ	ร้อยละ
น้ำมัน	39.5	42
พลังงานหมุนเวียน	24.4	26
ก๊าซธรรมชาติ	16.3	17
ลิกไนต์	8.1	9
ถ่านหินนำเข้า	2.4	3
ซื้อ (ไฟฟ้า)	2.3	3
รวม	93.0	100

สัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (Final Energy) ในสาขาการผลิตต่างๆ ของไทย แบ่งเป็น 4 สาขา ใหญ่ๆ คือ สาขาเกษตรกรรม สาขาอุตสาหกรรม สาขาที่อยู่อาศัยและธุรกิจ และสาขาคมนาคมขนส่ง โดยมีสัดส่วนการใช้พลังงานในสาขาต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.7 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย(Final Energy)แยกตามสาขาการผลิตในปี 2540
หมายเหตุ พลังงานขั้นสุดท้าย (Final Energy) หมายถึงพลังงานขั้นสุดท้ายที่ผู้บริโภคใช้ โดยไม่รวมเชื้อเพลิง ที่นำไปใช้ในการผลิตพลังงานทุติยภูมิ (Secondary Energy) ซึ่งหมายถึงการนำพลังงานปฐมภูมิมาผ่านการแปรรูป เช่น น้ำมันสำเร็จรูป และไฟฟ้า

สาขาการผลิต	**พันล้านลิตร เทียบเท่าน้ำมันดิบ**	**ร้อยละ**
คมนาคมขนส่ง	24.4	40
อุตสาหกรรม	19.8	32
ที่อยู่อาศัยและธุรกิจ	15.1	25
เกษตรกรรม	2.3	3
รวม	**61.6**	**100**

ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า รัฐได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังลมพลังงานแสงอาทิตย์ พลังน้ำขนาดเล็ก และพลังงานจากกาก หรือเศษวัสดุเหลือใช้ในการเกษตร หรือ กากจากการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือการเกษตร ขยะมูลฝอย ไม้จากการปลูกป่า เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า โดย กฟผ. ได้มีการประกาศรับซื้อไฟฟ้า จากผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producers) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2535 เป็นต้นมา ซึ่ง ณ ปัจจุบัน มีผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ที่ได้รับการตอบรับซื้อไฟฟ้าแล้ว จำนวน 56 ราย คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่เสนอขาย 2,366 เมกะวัตต์ ในจำนวนนี้เป็นผู้ผลิตรายเล็ก ที่ขายไฟฟ้าเข้าระบบแล้ว จำนวน 37 ราย เป็นปริมาณ ไฟฟ้าที่เสนอขาย 1,220 เมกะวัตต์ โดยแยกประเภทการใช้เชื้อเพลิงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 แสดงประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กสถานภาพ ณ 30 เมษายน 2542

การใช้พลังงาน	จำนวนที่ได้รับการตอบรับแล้ว		จำนวนที่ขายไฟเข้าระบบแล้ว	
	ราย	เมกะวัตต์	ราย	เมกะวัตต์
- ก๊าซธรรมชาติ	22	1,587.9	14	978.0
- กากอ้อย	14	67.5	13	64.5
- ถ่านหิน	10	618.0	4	118.0
- แกลบ , เศษไม้	6	57.0	4	49.8
- ขยะ	1	1.0	1	1.0
- น้ำมัน	1	9.0	1	9.0
- ก๊าซชีวภาพ	1	0.1	-	-
- น้ำยางดำ (Black liquor)	1	25.0	-	-
รวม	56	2,365.6	37	1,220.3

นอกจากพลังน้ำ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแล้ว ยังมีการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนอื่นๆ ในการผลิตไฟฟ้าด้วย แต่ทั้งนี้ส่วนใหญ่เป็นโครงการทดลอง เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงาน แสงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม การผลิตไฟฟ้า จากพลังงานความร้อนใต้พิภพ และ โครงการสาธิตเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบัน กฟผ. ได้ดำเนินโครงการทดลองที่ผลิต ไฟฟ้าและจ่ายไฟฟ้าขนานเข้าระบบจำหน่ายของ กฟภ. แล้ว ดังนี้

1. โครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ รวมกำลังผลิตประมาณ 70 กิโลวัตต์ โดยจ่ายไฟฟ้าร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กที่คลองช่องกล่ำ จังหวัดสระแก้ว ที่สถานีพลังงานทดแทน แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต และที่สถานีพลังงานแสงอาทิตย์ อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่
2. โครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม รวมกำลังผลิตประมาณ 192 กิโลวัตต์ ที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต
3. โครงการไฟฟ้าสาธิตจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ ขนาดกำลังผลิต 300 กิโลวัตต์ ที่อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่
4. โครงการโรงไฟฟ้าสาธิตเซลล์เชื้อเพลิง ขนาดกำลังผลิต 50 กิโลวัตต์ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ที่โรงไฟฟ้าบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา
5. โครงการติดตั้งระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ อุณหภูมิปานกลาง ด้วยระบบท่อรับความร้อนแสงอาทิตย์ ขนาด 50 กิโลวัตต์ เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้าระบบ 2 วงจร ที่บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะกง
6. โครงการสาธิตระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน ในเขตกรุงเทพฯ รวม 10 หลังโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ขนาด 2.25 กิโลวัตต์สำหรับบ้านจำนวน 8 หลัง และใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน ขนาด 2.88 กิโลวัตต์ สำหรับบ้าน จำนวน 2 หลัง เพื่อพัฒนาสาธิตเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เองภายในบ้าน และขายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเกินให้กับ กฟผ. ซึ่งโครงการสาธิตดังกล่าว จะช่วยสนับสนุนให้เกิดอุตสาหกรรม การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

พลังงานหมุนเวียน ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้น เป็นพลังงานที่สะอาด อย่างไรก็ตาม การผลิตพลังงานไฟฟ้า จากพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ ยังไม่สามารถเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ได้ รวมทั้ง ราคายังสูงมากอีกด้วย การพัฒนาเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้า จากพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงที่ผ่านมา มีความก้าวหน้าไปมาก ต้นทุนลดลงมากเช่นกัน แต่ก็คงยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับการผลิต ไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นคงต้องใช้ระยะเวลากว่า 10 ปีขึ้นไป ในการพัฒนา มาใช้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนจึงจะต่ำลง จนสามารถแข่งขันกับพลังงานฟอสซิลได้

แหล่งสำรองพลังงานที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งมีการสำรวจและพิสูจน์แล้ว มีปริมาณสำรอง ไม่มากนักเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้ของประเทศ จึงต้องมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศในอัตราร้อยละ 60 ของปริมาณความต้องการรวม โดย ณ สิ้นปี 2540 ประเทศมีแหล่งสำรองพลังงานที่พิสูจน์แล้วคงเหลือ ดังนี้

- **น้ำมันดิบ** มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้ว 17 พันล้านลิตร ซึ่งปริมาณสำรองที่มีอยู่ไม่ เพียงพอกับปริมาณความต้องการใช้ในแต่ละปี
- **ก๊าซธรรมชาติ** มีปริมาณสำรองพิสูจน์แล้ว 356 พันล้านลิตร ซึ่งหากปริมาณการใช้ไม่เปลี่ยนแปลงและไม่มีการค้นพบเพิ่มเติมแล้ว คาดว่าจะใช้ไปได้อีกประมาณ 22 ปี
- **ถ่านหิน (ลิกไนต์)** ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ประโยชน์แล้ว มีปริมาณสำรองที่ประเมินแล้วคงเหลือ 1,676 พันล้านลิตร แบ่งเป็นเหมืองของ กฟผ. 1,495 พันล้านลิตร และเหมืองเอกชน 181 พันล้านลิตร ซึ่งหากปริมาณการใช้ไม่เปลี่ยนแปลงและไม่มีการค้นพบเพิ่มเติมแล้ว คาดว่าจะใช้ไปได้อีกประมาณ 62 ปี

แหล่งสำรองพลังงานของประเทศ กระจายอยู่ตามภาคต่างๆ ของประเทศและในอ่าวไทย โดยมีปริมาณสำรอง ณ สิ้นปี 2540 จำแนกตามชนิด และแหล่งต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.9 แหล่งก๊าซธรรมชาติ มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้วตามแหล่งต่างๆ

อ่าวไทย	222.8	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
โคราช	17.2	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
ภาคกลาง	5.8	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
พื้นที่พัฒนาร่วมไทย-มาเลเซีย	110.8	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
รวม	**356.6**	**พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ**

ตารางที่ 2. 10 แหล่งน้ำมัน มีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้วตามแหล่งต่างๆ

อ่าวไทย	7.6	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
ภาคกลาง	9.1	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
ภาคเหนือ	0.3	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
รวม	**17.0**	**พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 แหล่งถ่านหิน(ลิกไนต์)ที่พัฒนาขึ้นมาใช้แล้ว มีปริมาณสำรองคงเหลือตามแหล่งต่างๆ

ภาคเหนือ	1,544.9	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
ภาคกลาง	1.0	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
ภาคใต้	130.3	พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ
รวม	**1,676.2**	**พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ**

2.3.2 ทฤษฎีอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน (nanogenerator)[13]

อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน (nanogenerator) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยไม่ใช้แบตเตอรี่ ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานความร้อนจากภายนอกเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยปกติเราสามารถแบ่งประเภทของ nanogenerator ได้เป็น 3 ประเภท คือ piezoelectric ,triboelectric และ pyroelectric nanogenerators

2.3.2.1 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบเพียโซอิเล็กตริก

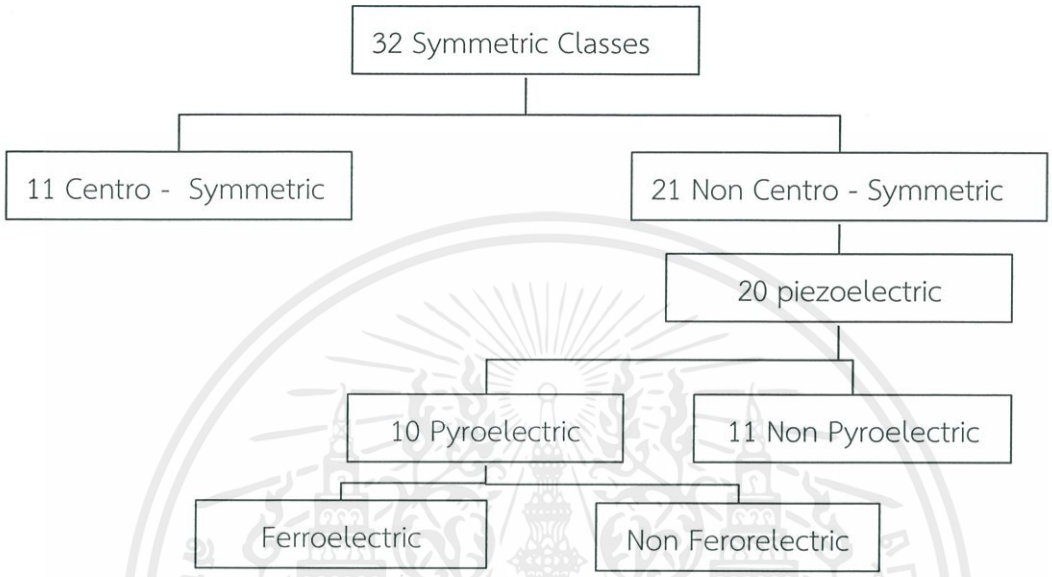
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก

คำว่า “piezo” ในภาษาอังกฤษ มาจากภาษากรีกซึ่งหมายถึง “to press” การนำคำว่า “piezo” มาใช้กับคำว่า “electric” เป็น “piezoelectric” หรือ “เพียโซอิเล็กตริก” จึงเกี่ยวข้องกับสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้า มีการค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric effect) เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1880 โดยสองพี่น้องชื่อ ปิแอร์ คูรี (Pierre Curie) และแจ็ค คูรี (Jacques Curie) ทั้งสองพบว่าเมื่อให้แรงกดแก่ผลึกบางชนิด เช่น ทัวร์มาลีน (Tourmaline) ควอทซ์ (Quartz) โทปาซ (Topaz) และเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) จะมีประจุบวกที่ผิวหน้า (surface) ด้านหนึ่งและมีประจุลบด้านหนึ่งทั้งสองจะหายไป ปรากฏการณ์ที่พบในลักษณะนี้ถูกนิยามเป็นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกแบบตรง (direct piezoelectric effect) ต่อมาในปี ค.ศ.1881 ลิปแมนส์ (Lippmann) คือผู้ที่ทำนายโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกมีปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกแบบกลับ (converse piezoelectric effect) ด้วย และพี่น้องตระกูลคูรีก็ได้ทำการทดลองพิสูจน์คำทำนายดังกล่าวนี้ได้สำเร็จในปี ค.ศ. 1881 เช่นกัน

นับตั้งแต่การค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกในปี ค.ศ.1880 ใน 20 ปีต่อมาเป็นช่วงของการศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านเพียโซอิเล็กตริก มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่มีส่วนในการศึกษาค้นคว้า นักวิจัยที่มีชื่อเสียง เช่น ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) โวล์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันวางกฎเกณฑ์และทฤษฎีเพื่ออธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกอย่างเป็นระบบ มีการจัดกลุ่มผลึกโดยละเอียดตามความสมมาตร (symmetry) ของผลึกเป็น 32 กลุ่มผลึก (crystal class หรือ point group) จากกลุ่มผลึกทั้งหมด มี 21 กลุ่มผลึกที่ขาดจุดศูนย์กลางความสมมาตร (centre of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

symmetry) และในจำนวนนี้มี 20 กลุ่ม ที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กตริก การประยุกต์ใช้งานผลึกที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กตริกเริ่มเป็นรูปเป็นร่างใน ปี 1917 โดยพอล แลงจีวิน (Paul Langevin) ชาวฝรั่งเศส ซึ่งประสบความสำเร็จจากการใช้ผลึกควอทซ์เป็นตัวส่ง (transmitter) และตัวรับ (receiver) คลื่นเสียง (acoustic wave) ที่เดินทางในน้ำ ซึ่งเป็นหลักการของเครื่องโซนาร์ (sonar) ในเวลาต่อมา



แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึก (ที่มา : Lang and Grupta,2000)

สมการทางเพียโซอิเล็กตริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกเกี่ยวข้องกับสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุกล่าวคือเมื่อให้ความเค้นกล (mechanical stress,T) แก่วัสดุเพียโซอิเล็กตริก จะเกิดการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement,D) ขึ้น ในทางกลับกันเมื่อให้สนามไฟฟ้า (electric field,E) แก่วัสดุเพียโซอิเล็กตริก จะเหนี่ยวนำให้เกิดตวามเครียด (mechanical strain,S) ขึ้น ความสัมพันธ์เหล่านี้แสดงในสมการ ดังนี้

$$D = dt + \varepsilon^{T}E$$

$$S = s^{E}T + dE$$

เมื่อ D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement)

T คือ ความเค้นกล (mechanical stress)

S คือ ความเครียดกล (mechanical strain)

E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

D คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric coefficient)

S^{E} คือ ค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic constant หรือ elastic compliance) มีหน่วยเป็น m^2/N ภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่

ε^{T} คือ สภาพยอมรับได้ (permittivity) มีหน่วยเป็น F/m ภายใต้ความดันคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นทั้งสองสมการ เมื่อเพียโซอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้าคงที่ ในที่นี้ให้ E=0 สมการที่ 1 ลดรูปเป็น

$$D = dT$$

ทำนองเดียวกันกับสมการที่3 กรณีที่ความเค้นกลที่กะทำจ่อวัสดุเพียโซอิเล็กตริกมีค่าคงที่หรือมีค่าเป็นศูนย์ สมการที่ 2 ลดรูปเป็น

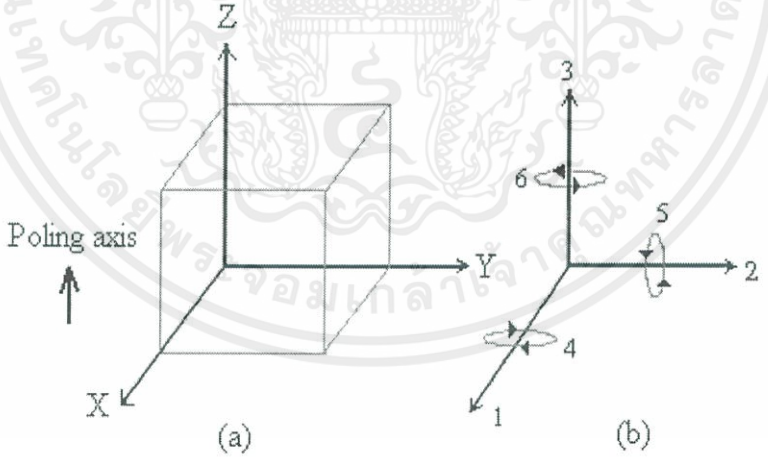
$$S = dE$$

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริก d ในสมการที่ 3 และ 4 เป็นค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริกที่ได้จากปรากฏการณ์เพียโวอิเล็กตริกแบบตรงและแบบผันกลับ ตามลำดับ และถ้าหากสารตัวอย่างไม่มีสมบัติเพียโซอิเล็กตริก (d=0) สมการที่ 1 และ 2 หมายถึงสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของสารทั่วไปดังสมการ

$$D = \varepsilon^{T}E$$

$$S = s^{E}T$$

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริกบางชนิด มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดและการกระจัดทางไฟฟ้าใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน จึงมักระบุตัวเลห้อยท้าย 2 ตัว เช่น d_{33} d_{15} เป็นต้น โดยตัวเลขเหล่านี้หมายถึงทิศทางต่างๆ ดังประกอบ



ภาพที่ 2. 7 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กตริก

ในรูป (a) แสดงถึงลักษณะแกนหลัก 3 ทิศทาง ส่วนรูป (b) ใช้สำหรับวัสดุเพียโซเซรามิกโดยใช้ตัวเลขเป็นตัวกำกับแกนคือใช้เลข 1,2 และ 3 ใช้แทนแนวแกน X แนวแกน Y และทิศทางในแนวแกน Z ตามลำดับ ส่วนเลข 4,5 และ 6 แสดงถึงแกนเฉือย (shear axis) รอบแกน 1,2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อตัวเลขแรกหมายถึง ทิศทางโพลาไรเซชัน ตัวเลขที่สองจะหมายถึงทิศทางของความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ไพอิโซ-อิเล็กตริก	นิยาม	หน่วย SI
d	$\frac{\partial D}{\partial T}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ E คงที่	$C.N^{-1}$
	$\frac{\partial S}{\partial E}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ T คงที่	$m.V^{-1}$
g	$\frac{\partial E}{\partial T}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ D คงที่	$Vm.N^{-1}$
	$\frac{\partial S}{\partial D}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ T คงที่	$m^2.C^{-1}$
e	$\frac{\partial D}{\partial S}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ E คงที่	$C.m^{-2}$
	$\frac{\partial T}{\partial E}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ S คงที่	$N.mV^{-1}$
h	$\frac{\partial E}{\partial S}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ D คงที่	$V.m^{-1}$
	$\frac{\partial T}{\partial D}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ S คงที่	$N.C^{-1}$

ตารางที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเพียโซอิเล็กตริกกับตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริกในตารางที่ 2.1 นั้นมีความสัมพันธ์กับสมการด้านล่างดังนี้

$$e = cd$$

$$e = \varepsilon h$$

เมื่อ c คือ ค่าคงที่ความแข็งของวัสดุ (stiffness constant)

ε คือ ค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของวัสดุ

h คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริกความเค้น (piezoelectric stress coefficient)

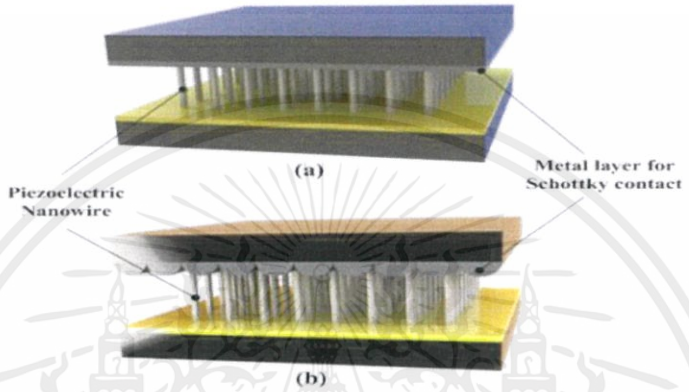
อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบเพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric nanogenerator : PENG) เป็นอุปกรณ์ที่มีที่แปลงพลังงานกลจากภายนอกเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กตริก เป็นการเกิดขึ้นของสภาพทางไฟฟ้าจากแรงกดที่ให้เข้าไปกับผลึกซึ่งเป็นแรงทางกล ทำให้เกิด ความเครียด (strain) ภายในผลึกเกิดการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่า การโพลาไรเซชัน (polarization) และให้กระแสไฟฟ้าออกมา ปริมาณและเครื่องหมายของการโพลาไรเซชันจะแปร ผันตามความเครียดที่ได้รับ[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบเพียโซอิเล็กตริก มี 3 ประเภทคือ

1.Vertical nanowire integrated nanogenerator (VING)

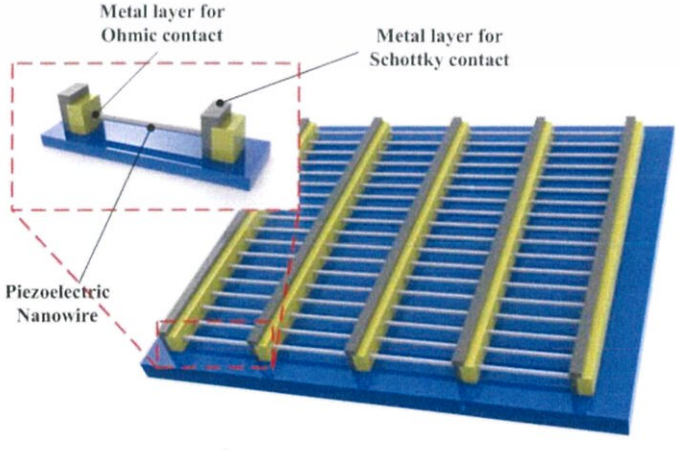
ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วน คือ ขั้วเบส (base electrode) , ขั้วเคาน์เตอร์ (counter electrode) และโครงสร้างของวัสดุนาโนเพียโซอิเล็กตริกแบบแนวตั้ง (vertical piezoelectric nanostructure) โดยโครงสร้างของนาโนวายด์ (nanowire) จะจัดเรียงตัวจากขั้วเบสไปยังขั้วเคาน์เตอร์ ซึ่งเมื่อขั้วเคาน์เตอร์มีการเคลื่อนตัวหรือได้รับแรงจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างนาโนวายด์[15]



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของ VING ที่มีพื้นผิวสัมผัสต่างกัน(ด้านบน) เป็นโครงสร้างที่สัมผัสกับผิวขั้นโดยตรง , (ด้านล่าง) เป็นโครงสร้างที่สัมผัสกับผิวขั้วแค่บางส่วน

2.Lateral nanowire integrated nanogenerator (LING)

ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วนคือขั้วเบส (base electrode) , ขั้วเคาน์เตอร์ (counter electrode) และโครงสร้างของวัสดุนาโนเพียโซอิเล็กตริกแบบสัมผัสเฉพาะด้านข้าง (lateral piezoelectric nanostructure) โดยที่อุปกรณ์จะประกอบเข้ากับฐานที่มีความยืดหยุ่น ลักษณะรูปแบบแบบนี้โครงสร้างของนาโนวายด์จะมีค่าความเค้นแรงดึง (tensile stress)ที่สูง และสามารถขยายสัญญาณที่เกิดขึ้นได้จากการเรียงตัวของโครงสร้างนาโนวายด์ในชั้นเดียวกัน

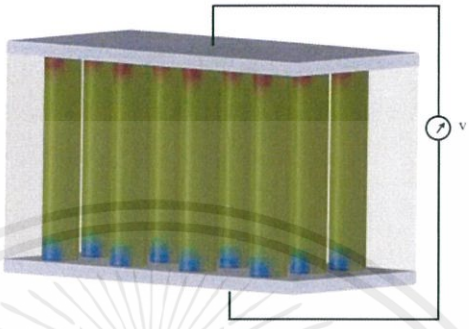


ภาพที่ 2.9 เป็นโครงสร้างของ LING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

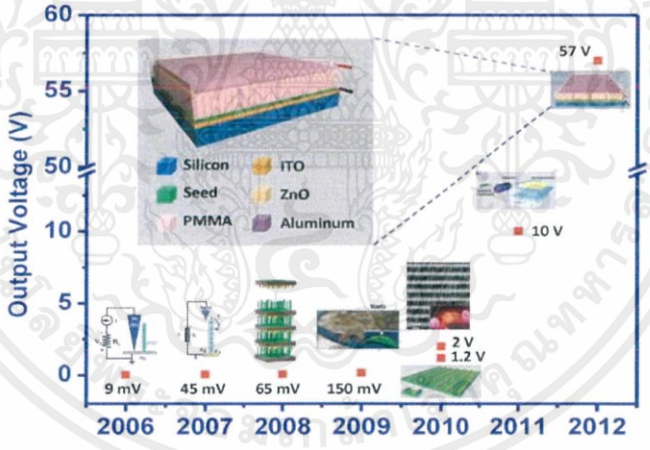
3.Nanocomposite Electrical Generators (NEG)

ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ 3 ส่วน คือ แผ่นขั้วโลหะ , โครงสร้างของวัสดุนาโนแบบเพียโซอิเล็กตริกที่ผสมเข้ากับสารพอลิเมอร์ โดย NEG ถูกนำเสนอโดย Momeni และคณะ ซึ่ง NEG มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบอื่นๆ โดยใช้สารซิงค์ออกไซด์นาโนวายด์ (ZnO nanowire) ผสมกับพอลิเมอร์



ภาพที่ 2.10 เป็นโครงสร้างของ NEG

การพัฒนาอุปกรณ์ PENG



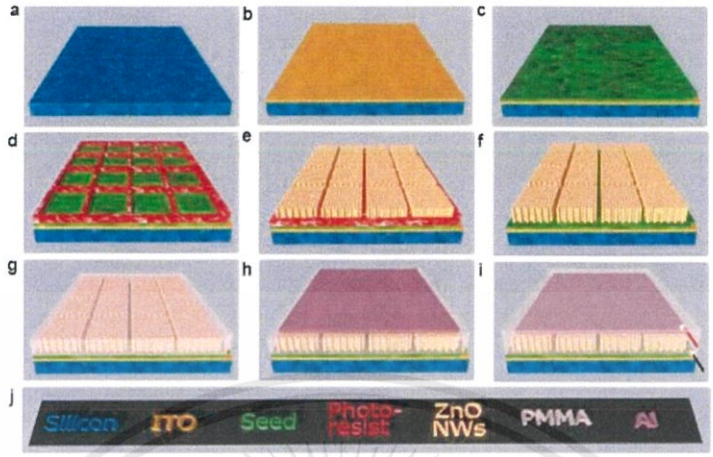
ภาพที่ 2.11 แสดงการพัฒนา PENG โดยให้มีค่าoutput voltage มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเริ่มพัฒนามาตั้งแต่ปี 2006 จนปัจจุบันได้มีการศึกษาโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์แบบอาร์เรย์ในแนวตั้ง[14]

ในปี 2006 เป็นจุดเริ่มต้นในการคิดค้นและประดิษฐ์ PENG ขึ้น โดยมีนักวิจัย Zhong Lin Wang และคณะ ศึกษาการเปลี่ยนพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของโครงสร้างซิงค์ออกไซด์นาโนวายด์แบบอาร์เรย์ซึ่งปลูกบนผิวของ α-Al_2O_3 โดยใช้อนุภาคทองนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้กระบวนการ vapor liquid-solid (VLS) พบว่ามีค่า output voltage อยู่ที่ 9 mV

ในปี 2008 นักวิจัย Pu Xian Gao และคณะได้ทำศึกษาการปลูกซิงค์ออกไซด์นาโนวายด์บนฐานรองรับที่เป็นพลาสติกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ PENG พบว่ามีค่า output voltage อยู่ที่ 45 mV และต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นชั้นๆของเพื่อเพิ่มค่า output voltage ให้มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2012 นักวิจัย Guang Zhu และคณะได้พัฒนา PENG จนมีค่า output voltage ถึง 57 V



ภาพที่ 2.12 แสดงกระบวนการในการทำ PENG (a) แผ่นซิลิกอน (b) การปลูก ITO ด้วยวิธีการ sputtering (c) การปลูกชั้น ZnO ด้วยวิธีการ sputtering (d) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี (e) เลือกพื้นที่ในการปลูก ZnO ด้วยวิธีการ hydrothermal (f) ล้าง photoresist ด้วย acetone (g) ทำการ spin-coating ด้วย PMMA (h) ปลูกชั้นโลหะเป็นขั้วด้วยระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ (Electron-Beam Evaporator System) (i) บรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการ spin-coating ด้วย PMMA (j) สารที่ใช้ในการทำ PENG[16]

วัสดุที่เลือกใช้

จากงานวิจัยส่วนใหญ่วัสดุเพียโซอิเล็กตริกที่นำมาใช้ในการทำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน (nanogenerator) คือวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเวอร์ตไซท์ (wurtzite) เช่น ZnO ,CdS และ GaN เนื่องจากเป็นสารที่สามารถังเคราะห์ได้ง่ายด้วยวิธี hydrothermal ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 100˚C จากความพยายามและความต้องการของนักวิจัยที่จะเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นเพียโซอิเล็กตริกของวัสดุ จึงทำให้ Zhong Lin Wang จาก Georgia Institute of Technology ได้เสนอซิงค์ออกไซด์นาโนวายด์ชนิดพี (p-type ZnO nanowire) ขึ้นซึ่งดีกว่าชนิดเอ็น(n-type) เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 10 เท่า

จากงานวิจัยของ Min-Feng Yu จาก University of Illinois at Urbana Champaign จากได้เสนอว่าวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกด์ (Perovskite Structure) มีความเป็นเพียโซอิเล็กตริกสูงกว่าโครงสร้างแบบเวอร์ตไซท์ นั่นก็คือแบเรียมไทเทเนียมออกไซด์นาโนวายด์ ($BaTiO_3$ nanowire) ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าซิงค์ออกไซด์นาโนวายด์ถึง 16 เท่า
นักวิจัย Liwei Lin และคณะ จาก University of California at Berkeley ได้เสนอว่า PVDF (Polyvinylidencefluoride) สามารถนำมาทำเป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนได้ ทำได้โดยวิธีการ near-field electrospinning ซึ่งเป็นวิธีที่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ วิธีนี้สามารถควบคุมทิศทางของตัวสาร PVDF ให้มีทิศทางตามที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 เปรียบเทียบการใช้สารที่นำมาทำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน[17,18,19]

สาร	ประเภท	ลักษณะ	Output voltage	Output power	การสังเคราะห์
ZnO (n-type)	Wurtzite	D: ~100 nm, L: 200~500 nm	V_p=~9 mV @ R=500 MΩ	~0.5 pW per cycle (estimated)	CVD, hydrothermal process
ZnO (p-type)	Wurtzite	D: ~50 nm, L: ~600 nm	V_p=50~90 mV @ R=500 MΩ	5~16.2 pW per cycle (calculated)	CVD
ZnO-ZnS	Wurtzite (Heterostructure)	Not stated	V_p=~6 mV @ R=500 Ω	~0.1 pW per cycle (calculated)	Thermal evaporation and etching
GaN	Wurtzite	D: 25~70 nm, L: 10~20 μm	V_{avg}=~20 mV, V_{max}=~0.35 V@ R=500 MΩ	~0.8 pW per cycle (average, calculated)	CVD
CdS	Wurtzite	D: ~100 nm, L: 1 μm	V_p=~3 mV	Not stated	PVD, Hydrothermal Process
$BaTiO_3$	Pervoskite	D: ~280 nm, L: ~15 μm	V_p=~25 mV @ R=100 MΩ	~0.3 aJ per cycle (stated)	High temperature chemical reaction
PVDF	Polymer	D: 0.5~6.5 μm, L: 0.1~0.6 mm	V_p=5~30 mV	2.5 pW~90 pW per cycle (calculated)	Electro spinning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไทรโบอิเล็กตริก

อุปกรณ์ไทรโบอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (Triboelectric nanogenerator : TENG) เป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานโดยการเปลี่ยนพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า อาศัยผลของไทรโบอิเล็กทริกและการเหนี่ยวนำของไฟฟ้าสถิต อุปกรณ์ชนิดนี้ถูกนำมาเสนอครั้งแรกใน ค.ศ. 2012 โดย Hong Lin Wang และคณะจาก Georgia Institute of Technology ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเกิดจากปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กตริก เนื่องจากการถ่ายโอนประจุของแผ่นพอลิเมอร์สองชนิดที่มีประจุตรงข้ามกัน เมื่อต่อวงจรภายนอกเกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งอยู่ด้านหลังของแผ่นพอลิเมอร์เพื่อให้ความต่างศักย์เกิดความสมดุล ดังนั้นปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและลักษณะพื้นผิวที่สัมผัส

การทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไทรโบอิเล็กตริก

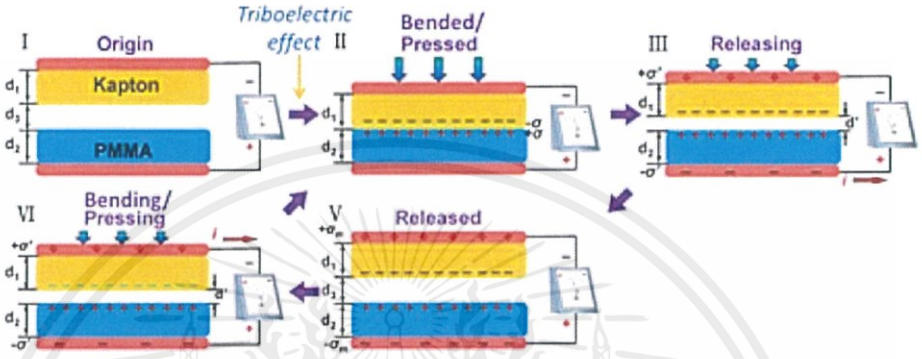
ภาพที่ 2.13 แสดงโหมดการทำงานของ TEG ใน 4 โหมด (a) โหมดสัมผัสและแยกออกในแนวตั้ง (The vertical contact-separation mode) , (b) โหมดสไลด์ด้านข้าง (The lateral sliding mode) ,(c) โหมดขั้วไฟฟ้าขั้วเดียว (The single-electrode mode) ,(d) โหมดยืนแบบอิสระ (The free-standing mode) [20]

1.โหมดสัมผัสและการแยกออกในแนวตั้ง (Vertical contact-separation mode)

การทำงานของ TEG สามารถอธิบายเป็นค่าความต่างศักย์ได้โดยการกำหนดให้พอลิเมอร์สัมผัส (Contact) กัน แล้วแยกออกจากกัน (Separation) เมื่อให้แรงเชิงกลไปยังอุปกรณ์ด้วยการงอ (Bend) หรือกด (Press) พื้นผิวด้านในจะสัมผัสและเริ่มเกิดการถ่ายโอนของประจุ พื้นผิวด้านหนึ่งจะเป็นประจุบวกส่วนอีกด้านเป็นประจุลบ เรียกว่า ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กตริก เมื่อให้แรงเชิงกลออกไป พื้นผิวทั้งสองจะแยกออกจากกัน และประจุไทรโบอิเล็กตริกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและเกิดความต่างศักย์ที่แตกต่างกันที่ขั้วไฟฟ้าบนและล่าง ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงเกิดการไหลและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นจนกระทั่งความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองกลับมาเท่ากันอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

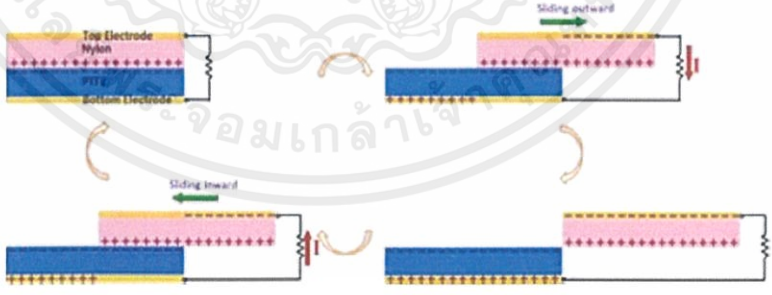
เมื่อพอลิเมอร์ทั้งสองแผ่นถูกกดอีกรอบ จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น อิเล็กตรอนจะไหลย้อนกลับจากขั้วไฟฟ้าด้านล่างสู่ด้านบน ซึ่งทำให้เกิดกระแสในทิศทางตรงข้าม เมื่อพื้นผิวสัมผัสกันแล้วประจุทั้งหมดจะกลายเป็นกลาง (Neutralized) ขณะที่คู่วัสดุสัมผัสและสร้างประจุไทรโบอิเล็กตริก อย่างน้อยหนึ่งด้านจะต้องเป็นฉนวน เพราะประจุไทรโบอิเล็กตริกจะยังไม่ไหล แต่ยังคงค้างอยู่ในพื้นผิวด้านใน หลังจากนั้นประจุที่ไม่เคลื่อนที่จะสามารถเหนี่ยวนำการไหลของไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรภายนอกภายใต้ระยะทางที่เปลี่ยนเป็นช่วงๆ



ภาพที่ 2.14 การทำงานของ TEG โหมดสัมผัสและการแยกออกในแนวตั้ง (Vertical contact-separation mode)[20]

2.โหมดสไลด์ด้านข้าง (Lateral sliding mode)

กระบวนการเสียดสีมีสองแบบที่เกิดขึ้น คือ การสัมผัสธรรมดาและการสไลด์ด้านข้าง TEG สามารถสไลด์ในระนาบระหว่างพื้นผิวในแนวนอน เมื่อเกิดการเสียดสีพื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวทั้งสองเปลี่ยนแปลงโดยค่อย ๆ แยกออกจากกันทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า จากนั้นประจุจะถูกเหนี่ยวนำขึ้น

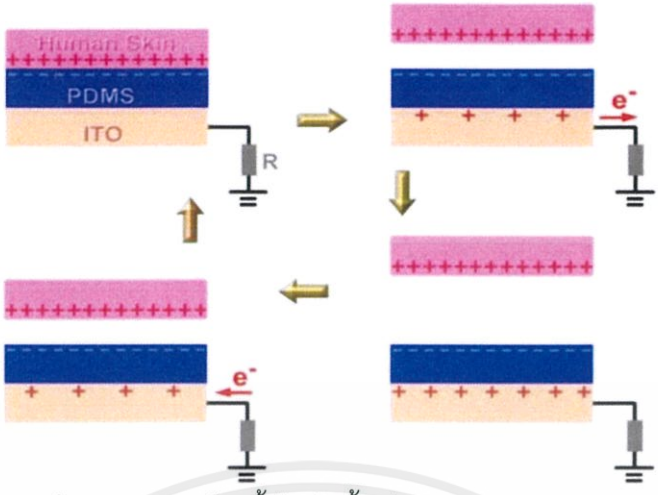


ภาพที่ 2.15 การทำงานของ TEG โหมดสไลด์ด้านข้าง (Lateral sliding mode)

3.โหมดขั้วไฟฟ้าขั้วเดียว (Single-electrode mode)

เป็นวิธีการออกแบบเพื่อให้ใช้งานง่ายโดยใช้นิ้วเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดกระแสไฟฟ้า เมื่อผิวหนังของมนุษย์สัมผัสกับชั้นสาร PDMS ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทประจุไปยังขั้ว ITO ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

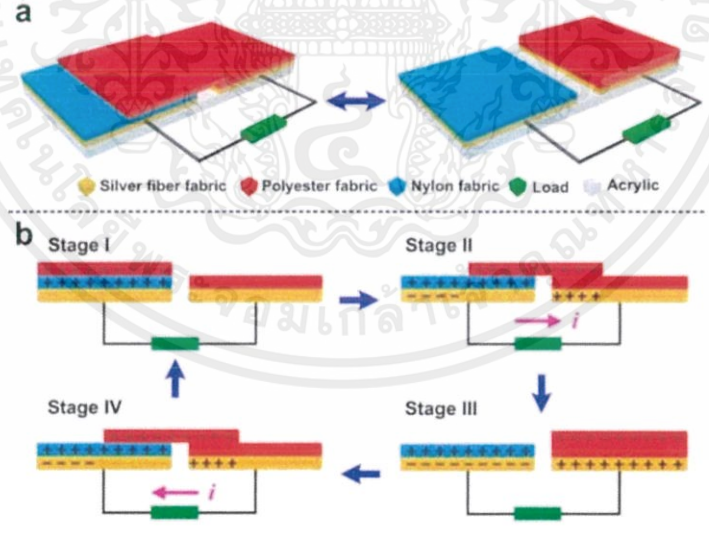
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 โหมดควบคุมด้วยขั้วไฟฟ้าขั้วเดียว (Single-electrode mode)

4.โหมดยืนแบบอิสระ (The free-standing mode)

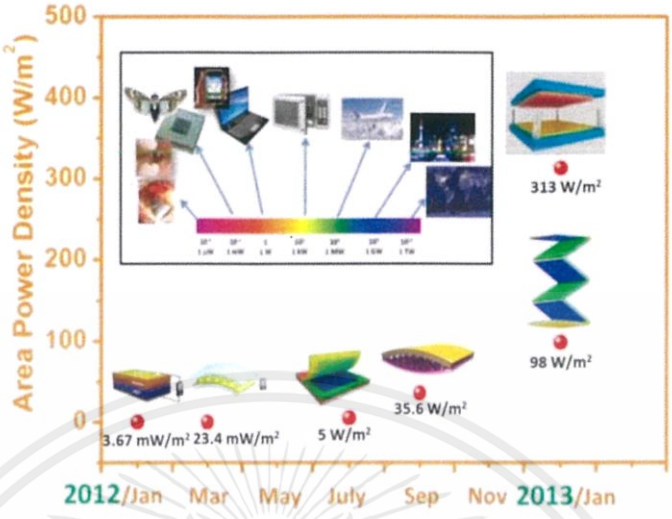
เป็นโหมดที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยมีแรงกระทำกับขั้วโดยตรง ลักษณะของอุปกรณ์ในโหมดนี้คือ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว มีขนาดเท่ากัน และระหว่างขั้วทั้งสองนั้น จะมีระยะห่างระหว่างกัน เมื่อวัตถุเคลื่อนที่เข้ามาและออกจากขั้วไฟฟ้า บริเวณขั้วไฟฟ้าจะเกิดการความไม่สมมาตรของประจุ โดยเกิดจากการเหนี่ยวนำของตัววัสดุ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่เพื่อให้เกิดความสมดุล และมีค่า output ออกมา



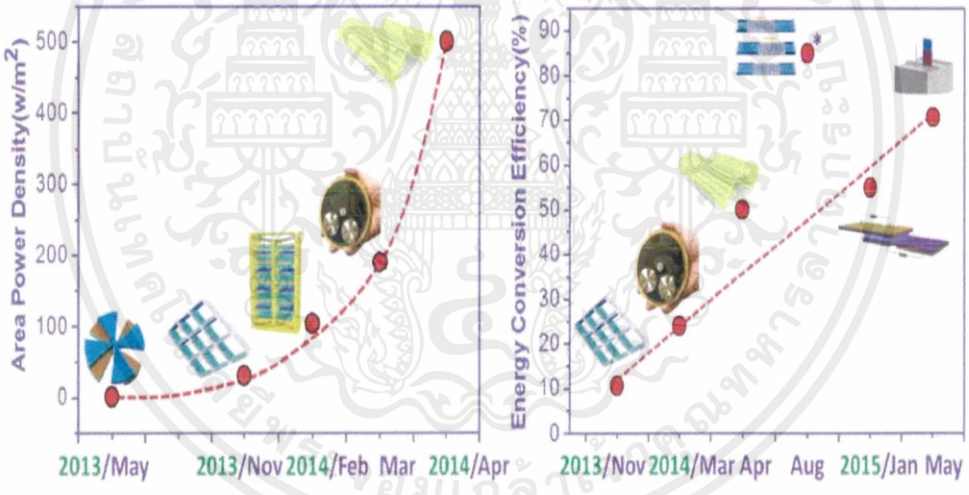
ภาพที่ 2.17 แสดงการทำงานของ TENG ในโหมดยืนแบบอิสระ (The free-standing mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาอุปกรณ์ TEG



ภาพที่ 2.18 การพัฒนาของ TEG ในด้านของพลังงานต่อพื้นที่ ในช่วงปี 2012-2013

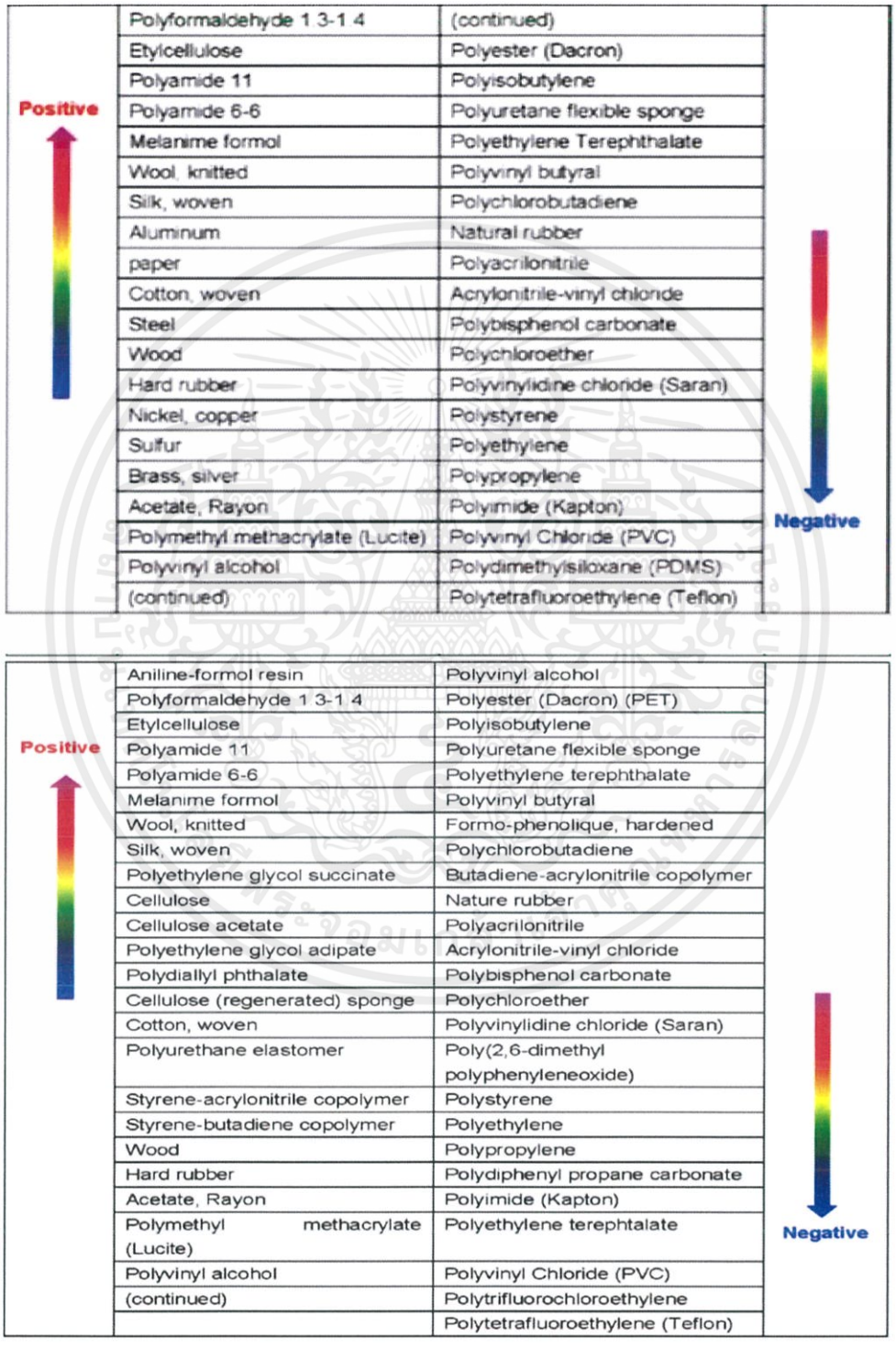


ภาพที่ 2.19 การพัฒนาของ TENG (ด้านซ้าย) พลังงานต่อพื้นที่ในปี 2013-2014 (ด้านขวา) ประสิทธิภาพของพลังงานในปี 2013-2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่เลือกใช้

การเพิ่มประสิทธิภาพของ TEG โดยเลือกวัสดุได้ใน ภาพที่ 2.17 นอกจากนี้ลักษณะของพื้นผิวลักษณะต่างๆ สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสพื้นผิวของวัสดุได้ สามารถปรับปรุงด้วยการใช้อนุภาคนาโน ซึ่งเปลี่ยนค่า Permittivity ได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.20 Triboelectric series สำหรับวัสดุ ที่มีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนและรับอิเล็กตรอนได้ง่าย[21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริก

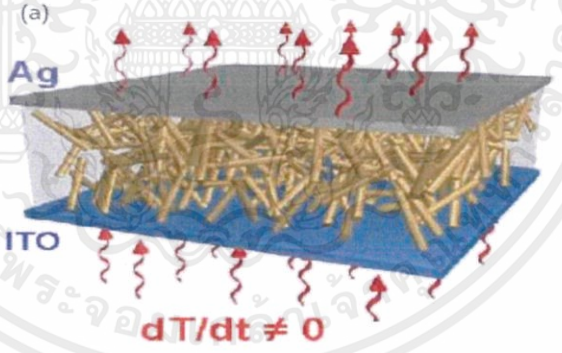
สมบัติไพโรอิเล็กตริก

ปี ค.ศ. 1756 นักวิทยาศาสตร์ ในเมืองเบอร์ลิน ประเทศเยอรมันชื่อ Franz Theoder Aepinus สังเกตแร่ทัวมาลีน เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะมีประจุไฟฟ้าอยู่ที่ผิวคนละข้าง ทำให้นำแร่ชนิดนี้มาใช้ประโยชน์เกิดประจุไฟฟ้า ต่อมา Canton เป็นบุคคลที่สังเกตเห็นว่าการลดอุณหภูมิในแร่ทัวมาลีนเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในระหว่างศตวรรษที่ 19 การวิจัยไพโรอิเล็กตริกเริ่มมีมากขึ้น มีการพัฒนาเทคนิคในการวัดกระแสไฟฟ้าไพโรอิเล็กตริกและประยุกต์ใช้งานสารไพโรอิเล็กตริกมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1859 Jean-Mothee Gaugain ได้ทำเครื่องวัดกระแสไพโรอิเล็กตริกและในปี ค.ศ. 1992 Matossi ทำการทดลองทำหัววัดจากแร่ทัวมาลีน

โดยนิยาม ปรากฏกาณ์ไพโรอิเล็กตริกคือการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผลึก ซึ่งทำให้มีการเคลื่อที่ของไดโพลโมเมนต์ ไปในทิศทางเดียวกัน การเปลี่ยนโพลาไรเซชันเป็นผลทำให้ประจุที่พื้นผิวเปลี่ยนไป

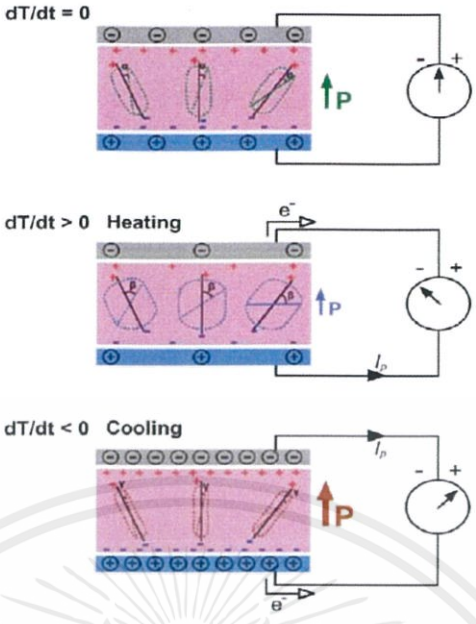
เป็นอุปกรณ์ที่เก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนจากภายนอกแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งกลไกลการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริกมีด้วยกัน 2 แบบคือ

1.ผลของไพโรอิเล็กตริกขั้นปฐมภูมิ (the primary pyroelectric effect)



ภาพที่ 2. 21 โครงสร้างของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริกซึ่ง ประกอบด้วย 3 ชั้น คือขั้วเงิน (Ag) , ชั้นของวัสดุประกอบนาโนวายด์ ($KNbO_3$ NW) กับ PDMS และขั้ว ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

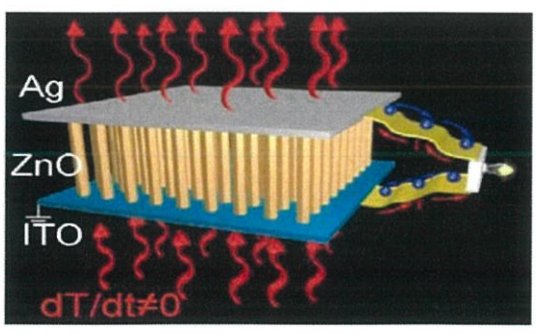


ภาพที่ 2.22 การทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริกกับไดโพลอิเล็กตริกค่าลบด้วยผลของไพโรอิเล็กตริกขั้นปฐมภูมิ (the primary pyroelectric effect)

เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันจากการเปลี่ยนแปลงอุณหูมิของสาร ซึ่งจะเกิดในวัสดุได้แก่ PZT ,BTO และวัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric materials) ซึ่งกลไกเกิดจากความร้อนส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของไดโพลอิเล็กตริกต่างจากแกนสมดุลเดิม

จากรูป 2.19 เมื่อทำการกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้ผลรวมของค่าโพลาไรเซชันของไดโพลอิเล็กตริกคงที่ ส่งผลให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าออกมา (ตรงกลาง) เมื่อทำการให้อุณหภูมิค่าหนึ่งแก่อุปกรณ์ที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นสาเหตุทำให้ไดโพลอิเล็กตริกมีการเคลื่อนที่ต่างไปจากเดิมมากขึ้น ทำให้ผลรวมของโพลาไรเซชันลดลง และปริมาณของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าก็ลดลง (ด้านล่าง) ถ้าให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาไรเซชันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้ามากขึ้น และเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนไหลไปทิศทางตรงกันข้าม

2.ผลของไพโรอิเล็กตริกขั้นทุติยภูมิ (the secondary pyroelectric effect)



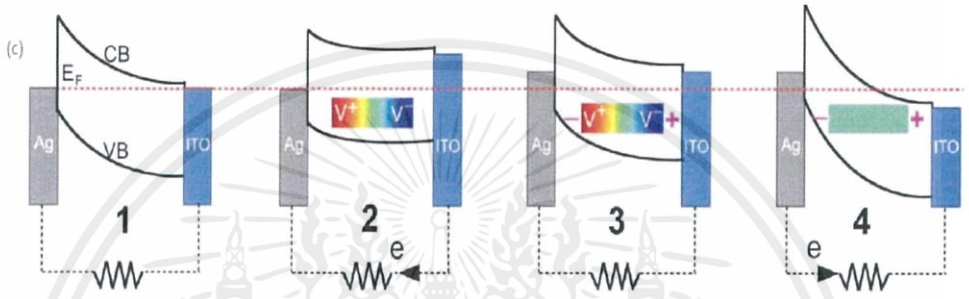
ภาพที่ 2. 23 ตัวอย่างโครงสร้างของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนแบบไพโรอิเล็กตริกซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วย 3 ชั้นคือขั้วเงิน (Ag) ,ชั้นซิงค์ออกไซด์นาโนวายด์ (ZnO NW) และขั้ว ITO [14]

การเกิดประจุเกิดความเครียดของวัสดุ เนื่องมาจากการขยายตัวเชิงความร้อนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ส่วนใหญ่จะเกิดในวัสดุจำพวก ZnO ,CdS และวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเวอร์ตไซต์ (wurtzite-type material) ซึ่งมีโครงสร้างแบบ non-central symmetric

ค่า output ของอุปกรณ์ชนิดนี้ขึ้นกับสัมประสิทธิ์ของค่าเพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric coefficient)และค่าขยายตัวเชิงความร้อนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic thermal expansion) ของวัสดุ



ภาพที่ 2. 24 กลไกการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน
แบบไพโรอิเล็กตริกโดยใช้สาร ZnO NW

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 295 เป็น 304 K ค่าศักย์ไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นตามแนวของ ZnO NW บริเวณขั้ว ITO จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนขั้วเงินเป็นบวก ซึ่งส่งผลให้ระดับของ conduction band และ Fermi level ของขั้ว ITO สูงสุด การไหลของอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้ว ITO ไปยังขั้วเงิน หลังจากนั้นเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงเป็น 295 K พบว่าบริเวณขั้วเงินมีการสะสมอิเล็กตรอนอยู่ ทำให้มีบริเวณขั้วมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้ไหลกลับไปยังขั้ว ITO

เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T) สามารถเขียนสมการสัมพันธ์กับกระแสไพโรอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชั่นของเวลา I(t) ได้ดังนี้

$$p = \frac{I(t)}{A}\frac{1}{dT/dt} \qquad (1)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ขั้วไฟฟ้า และ dT/dt เป็นอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือสามารถเขียนสมการในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน ดังสมการ

$$\Delta P = \frac{\Delta Q}{A} \qquad (2)$$

$$\Delta P = p\Delta T \qquad (3)$$

$$\Delta P = \frac{\Delta Q}{A\Delta T} \qquad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I(T) การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟโรอิเล็กตริกขึ้นกับเวลา มีหน่วยเป็น A

$\frac{dT}{dt}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา มีหน่วยเป็น $^{\circ}C \cdot s^{-1}$

ΔP โพลาไรเซชันที่เปลี่ยนเนื่องจากอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น $C \cdot s^{-1}$

ΔQ ประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนมีหน่วยเป็น C

ΔT อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

A พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็น m^2

P ค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก $\frac{c}{m^2}\frac{1}{^{o}c}$

ความต่างศักย์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$T = \frac{V - 100}{0.385} ^{\circ}C \qquad (5)$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าของวงจรเท่ากับ 1 mA และ V มีหน่วยเป็น mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ในการศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนโลหะ สามารถสรุปขั้นตอนทั้งหมดได้ดังภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. สารอนุภาคนาโนโลหะและโลหะออกไซด์
2. ขั้วอะลูมิเนียม
3. พอลิไดเมทิไลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) และสารที่ทำให้แข็งตัว Curing agent)
4. โพลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidencefluoride : PVDF)
5. ไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ (Dimethylformamide : DMF)
6. กาวนำไฟฟ้า (conductive glue)
7. แผ่นพลาสติกใช้ในการห่อหุ้ม
8. จานเพาะเชื้อ
7. เครื่องชั่งน้ำหนักสาร
8. เครื่องโซนิเคเตอร์ (Sonicator)
9. โถดูดความชื้น (Desiccator)
10. เตาอบความร้อน
11. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply)
12. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า

3.2 การเตรียมชั้นฟิล์ม

จากงานวิจัยได้ศึกษาการเตรียมชั้นฟิล์มด้วยกัน 2 แบบใหญ่ๆ คือ การขึ้นรูปวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS และ PVDF ร่วมกับอนุภาคนาโน

3.2.1 การขึ้นรูปวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS ร่วมกับอนุภาคนาโน

3.2.1.1 การเตรียม PDMS

1. ผสม PDMS 10 กรัมและสารที่ทำให้แข็งตัว (Curing agent) 1 กรัม ในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก ให้เข้ากัน
2. นำไปดูดฟองอากาศโดยวางในโถดูดความชื้น
3. เทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อ
4. นำไปดูดฟองอากาศอีกครั้งจนกระทั่งฟองอากาศหมด
5. นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.1.2 การเตรียม PDMS ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ (อนุภาคนาโนเงินและทอง)

1. ผสมอนุภาคนาโนเงิน 0.25 , 0.50 , 0.75 และ 1 ml ลงใน PDMS 10 กรัม แล้วคนให้เข้ากัน
2. เติม curing agent 1 กรัม นำไปเข้าเครื่องโซนิเคเตอร์ เป็นเวลา 60 นาที
3. เทลงจานเพาะเชื้อ นำเข้าเตาอบอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำอีกครั้งตั้งแต่ 1.- 3.เปลี่ยนอนุภาคนาโนเงินเป็นอนุภาคนาโนทอง

3.2.1.3 การเตรียม PDMS ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ (อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์)

1. ผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.025 , 0.050 , 0.075 , 0.1 g ลงใน PDMS 10 กรัม แล้วคนให้เข้ากัน

2. เติม curing agent 1 กรัม นำไปเข้าเครื่องโซนิเคเตอร์ เป็นเวลา 60 นาที

3. เทลงจานเพาะเชื้อ นำเข้าเตาอบอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

4. ทำอีกครั้งตั้งแต่ 1.- 3.เปลี่ยนอนุภาคนาโนเงินเป็นอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.2 การขึ้นรูปวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF ร่วมกับอนุภาคนาโน

3.2.2.1 การเตรียม PVDF

1. ผสม PVDF 0.5 กรัม ในสารละลาย DMF 10 ml

2. นำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิเคเตอร์เป็นเวลา 120 นาที

3. เทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อ

4. นำไปดูดฟองอากาศจนกระทั่งฟองอากาศหมด

5. นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 นาที

3.2.2.2 การเตรียม PVDF ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ (อนุภาคนาโนเงินและทอง)

1. ผสมอนุภาคนาโนเงิน 0.25 , 0.50 , 0.75 , 1 ml ลงใน PVDF 10 กรัม ที่ผสมด้วยสารละลาย DMF 10 ml

2. นำไปเข้าเครื่องโซนิเคเตอร์ เป็นเวลา 180 นาที

3. เทลงจานเพาะเชื้อ นำเข้าเตาอบอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 นาที

4. ทำอีกครั้งตั้งแต่ 1.-3.เปลี่ยนอนุภาคนาโนเงินเป็นอนุภาคนาโนทอง

3.2.2.3 การเตรียม PVDF ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ (อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์)

1. ผสมอนุภาคนาโนเงิน 0.025 , 0.050 , 0.075 , 0.1 g ลงใน PVDF 10 กรัม ที่ผสมด้วยสารละลาย DMF 10 ml

2. นำไปเข้าเครื่องโซนิเคเตอร์ เป็นเวลา 180 นาที

3. เทลงจานเพาะเชื้อ นำเข้าเตาอบอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 นาที

4. ทำอีกครั้งตั้งแต่ 1.-3.เปลี่ยนอนุภาคนาโนเงินเป็นอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม

3.3.1 การศึกษาองค์ประกอบของสารด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy)

เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด เทคนิค FTIR นี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

3.3.2 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว

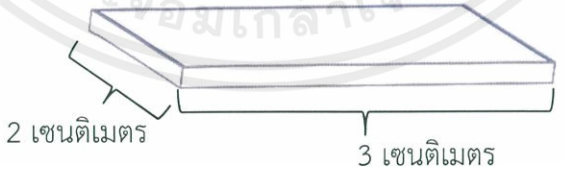
3.4 การประดิษฐ์อุปกรณ์ด้านพลังงาน

PVDF

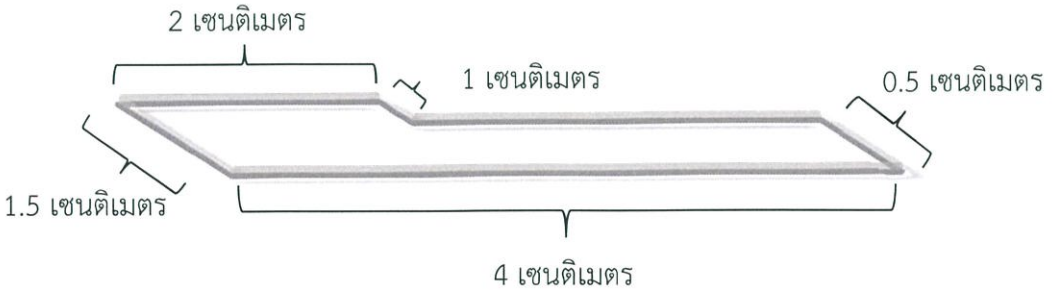
จากขั้นตอนการเตรียมฟิล์มโดยการขึ้นรูปพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนข้างต้น จะนำฟิล์มที่ความเข้มข้นต่างๆ มาทำการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ด้านพลังงาน ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน (nanogenerator),เซนเซอร์ ฯลฯ โดยการสร้างเป็นขั้วไฟฟ้า ด้วยกัน 2 แบบ ดังนี้

3.4.1 การประกอบอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน

1. ตัด PVDF ที่ผสมด้วยอนุภาคนาโนโลหะและโลหะออกไซด์ ขนาด 2x3 ตารางเซนติเมตร

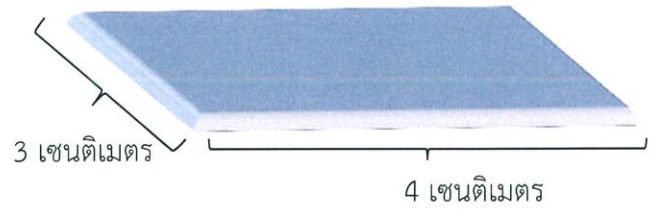


2. ตัดแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 2 ชิ้น ให้มีขนาดดังรูป

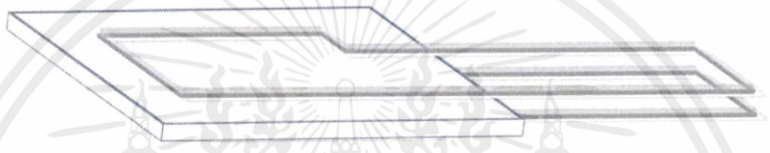


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัดแผ่นพลาสติกให้มีขนาด 3x4 ตารางเซนติเมตร



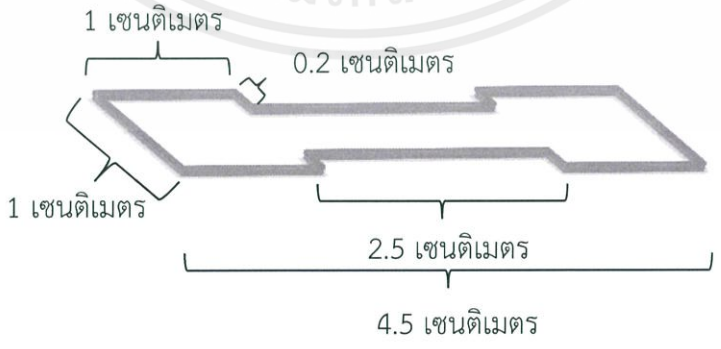
4. ประกอบอุปกรณ์เข้าด้วยกันโดยประกบขั้วอะลูมิเนียมด้านบนและด้านล่างของฟิล์มประกอบพอลิเมอร์ซึ่งใช้กาวนำไฟฟ้าเป็นตัวเชื่อมวัสดุทั้ง 2 เข้าด้วยกัน หลังจากนั้นรอให้กาวแห้ง



5. นำอุปกรณ์ที่ได้มาหุ้มด้วยพลาสติกประกบเข้ากันด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์

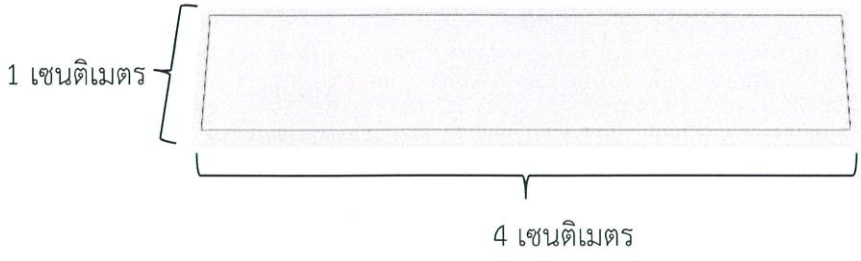
3.4.2 การประกอบอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโน

1. ตัด PVDF ที่ผสมด้วยอนุภาคนาโนโลหะและโลหะออกไซด์ ขนาดดังรูป

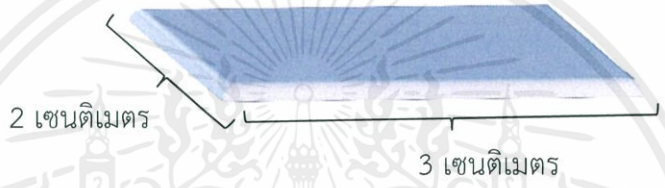


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัดแผ่นอะลูมิเนียมให้มีขนาด 1x4 เซนติเมตรจำนวน 2 ชิ้น



3. ตัดแผ่นพลาสติกให้มีขนาด 2x3 ตารางเซนติเมตร



4. ประกอบอุปกรณ์เข้าด้วยกันโดยประกบขั้วอะลูมิเนียมด้านบนและด้านล่างของฟิล์มประกอบพอลิเมอร์ซึ่งใช้กาวนำไฟฟ้าเป็นตัวเชื่อมวัสดุทั้ง 2 เข้าด้วยกัน หลังจากนั้นรอให้กาวแห้ง

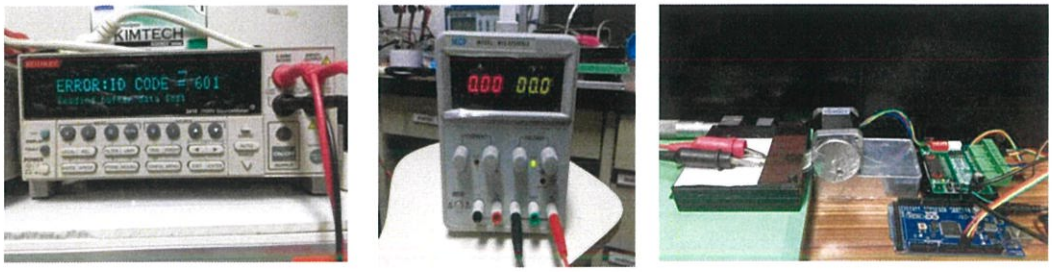
5. นำอุปกรณ์ที่ได้มาหุ้มด้วยพลาสติกประกบเข้ากันด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์

3.5 การตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์

มีการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ด้วยการให้แรงแก่อุปกรณ์ แล้วบันทึกผลเป็นค่าทางไฟฟ้ากับเวลา โดยมีการติดตั้งระบบด้วยกัน 2 แบบดังนี้

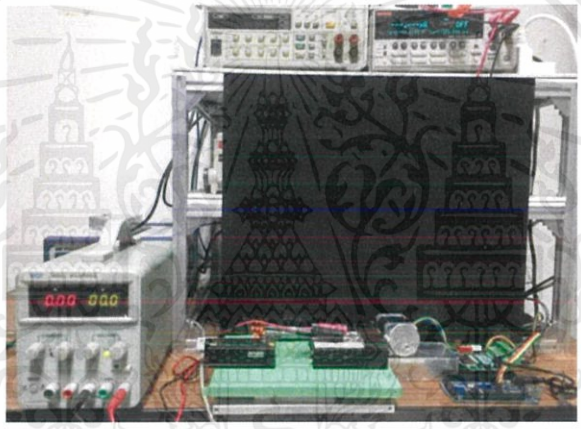
3.5.1 การตรวจวัดอุปกรณ์จากวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



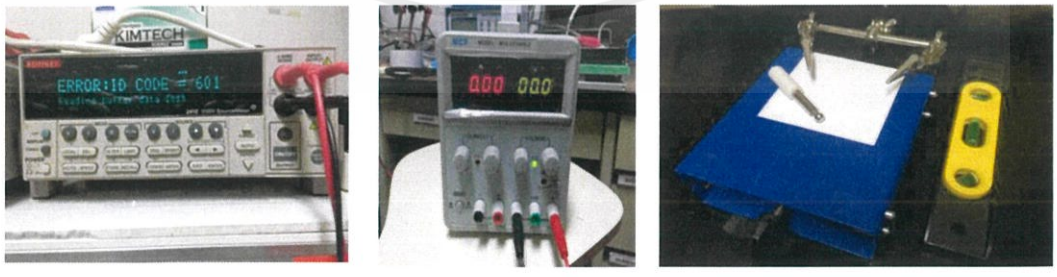
(a) (b) (c)

ภาพที่ 3. 2 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (a) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (b) เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) ควบคุมมอเตอร์ (c) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัววัดประกอบด้วย 1.มอเตอร์และระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ใช้การหมุน 2.ฐานที่ใช้วางอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF 3.สายไฟใช้ในการหนีบขั้วต่อเข้ากับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3. 3 การติดตั้งอุปกรณ์ในตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF

3.5.2 การตรวจวัดอุปกรณ์จากวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS

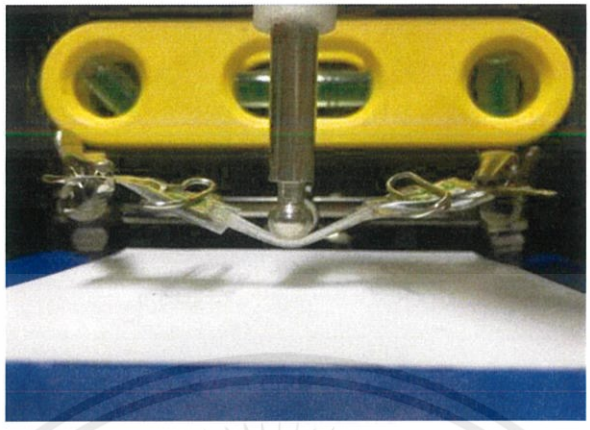


(a) (b) (c)

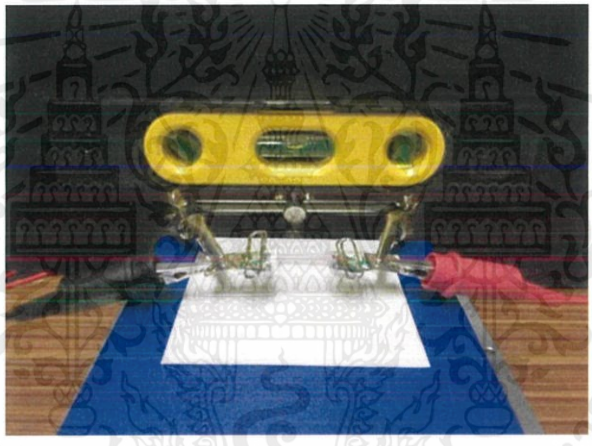
ภาพที่ 3. 4 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (a) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (b) เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) ควบคุมมอเตอร์ (c) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัววัดประกอบด้วย 1.ที่หนีบขั้ว 2.อุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้กด 3.ฐานปรับระดับใช้เป็นฐานในการกดอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS 4.อุปกรณ์วัดระดับน้ำ 5..ขั้วไฟฟ้าใช้ในการหนีบขั้วของอุปกรณ์ต่อเข้ากับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า

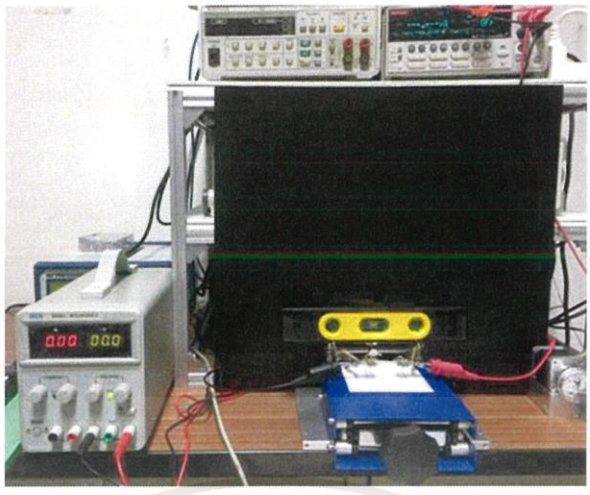


ภาพที่ 3. 5 ลักษณะการกดอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS



ภาพที่ 3. 6 การต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS

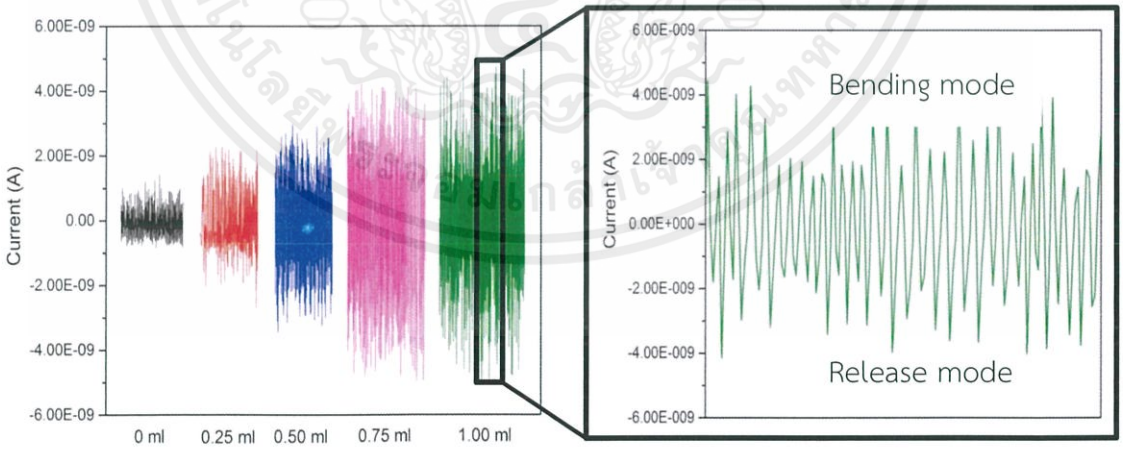
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3. 7 การติดตั้งอุปกรณ์ในตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS

3.6 ผลทางไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์

ผลที่ได้จากการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์จะวัดเป็นค่าในโหมด bending และ release



ภาพที่ 3. 8 ตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์จะวัดเป็นค่าในโหมด bending และ release

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

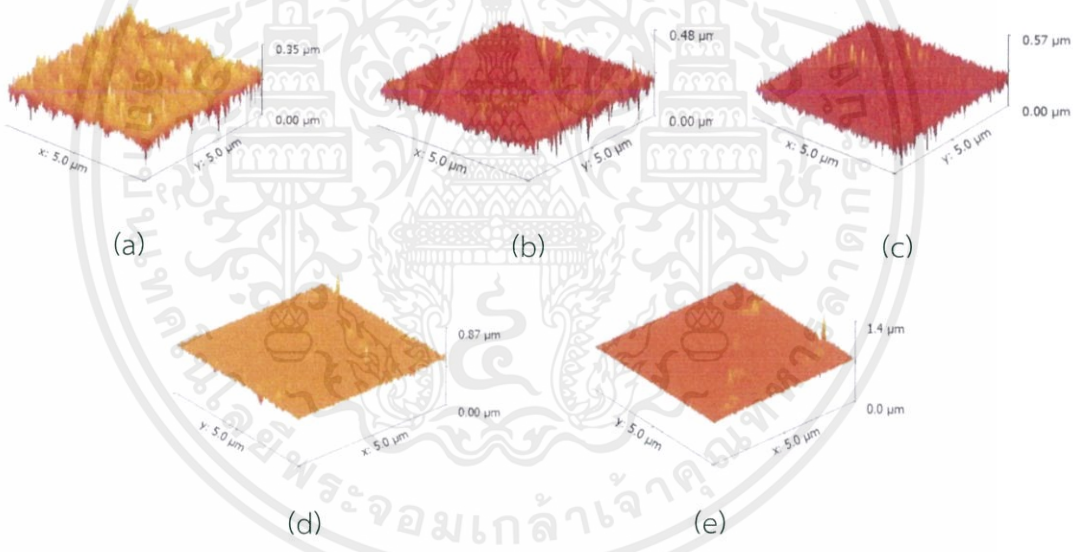
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลของการตรวจสอบพื้นผิวของตัวของอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโลหะออกไซด์ในพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ส่วนที่สองเป็นผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด ส่วนที่สามเป็นผลของการโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน และส่วนที่สี่เป็นผลของสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

4.1 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ในพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

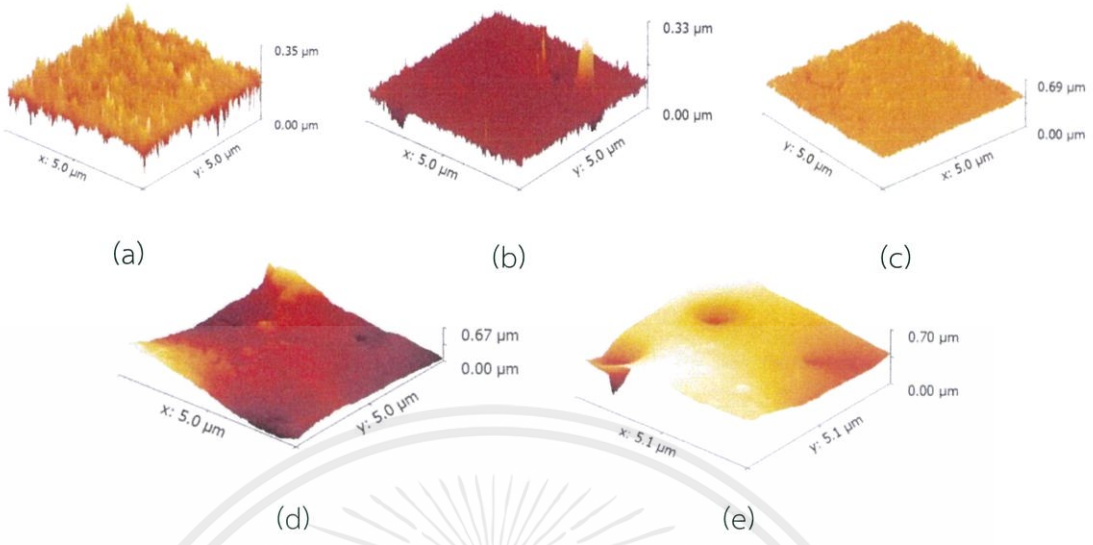
4.1.1 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคทองนาโนใน PVDF



ภาพที่ 4. 1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PVDF 5wt% (b) PVDF 5wt% Au NPs 0.25 ml (c) PVDF 5wt% AuNPs 0.50 ml (d) PVDF 5wt% AuNPs 0.75 ml (e) PVDF 5wt% AuNPs 1 ml

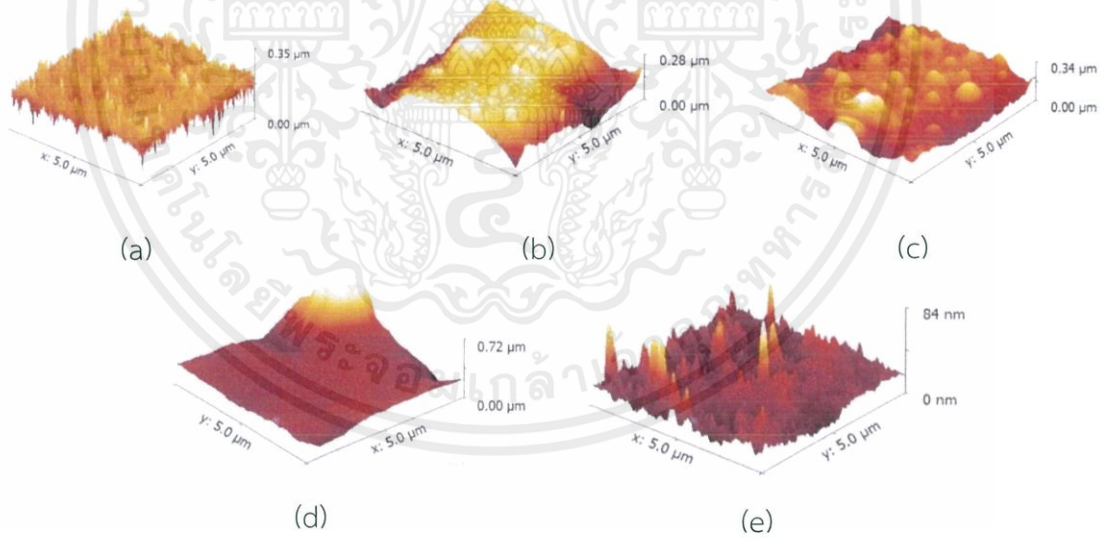
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคเงินนาโนใน PVDF



ภาพที่ 4. 2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PVDF 5wt% (b) PVDF 5wt% AgNPs 0.25 ml (c) PVDF 5wt% AgNPs 0.50 ml (d) PVDF 5wt% AgNPs 0.75 ml (e) PVDF 5wt% AgNPs 1.00 ml

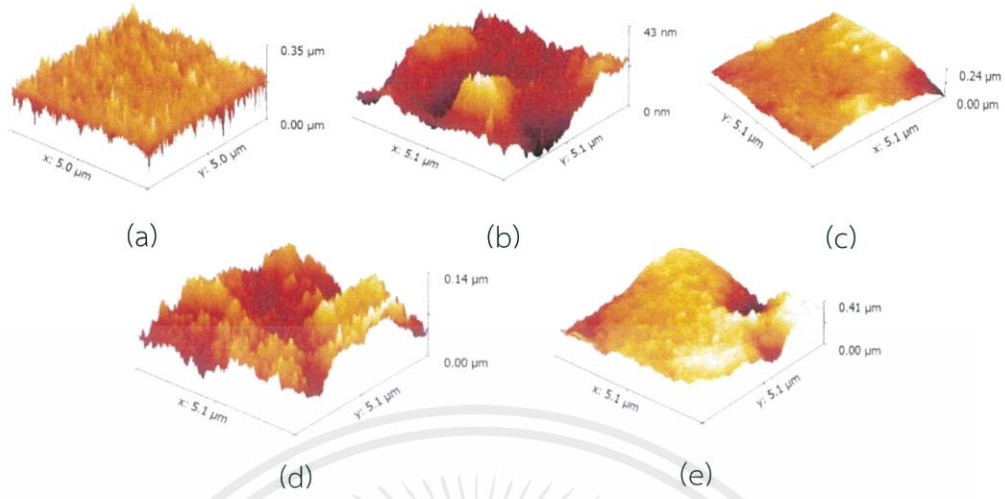
4.1.3 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ใน PVDF



ภาพที่ 4. 3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PVDF 5wt% (b) PVDF 5wt% ZnO 0.025 g (c) PVDF 5wt% ZnO 0.050 g (d) PVDF 5wt% ZnO 0.750 g (e) PVDF 5wt% ZnO 0.1 g

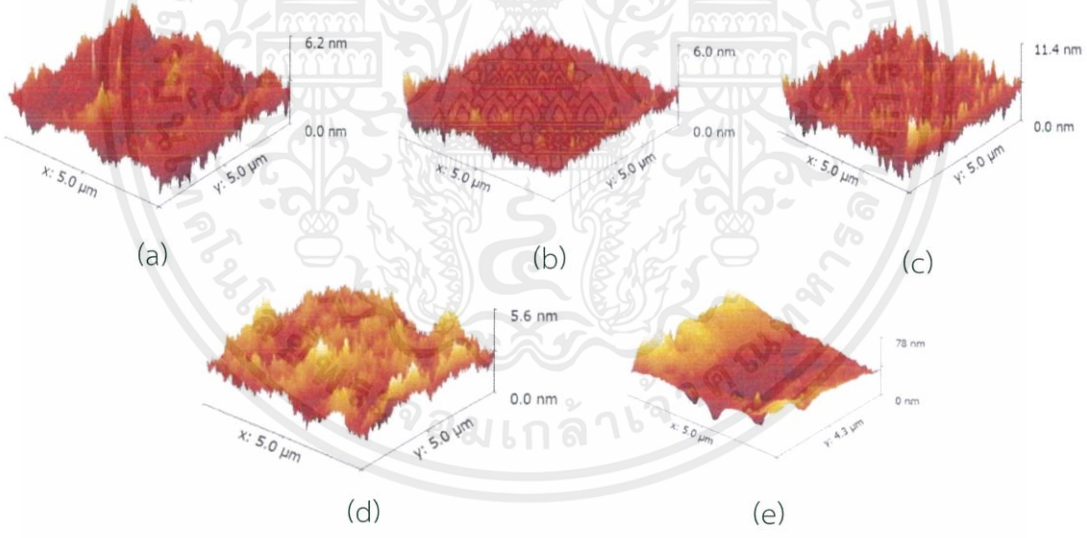
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ใน PVDF



ภาพที่ 4. 4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PVDF 5wt% (b) PVDF 5wt% TiO_2 0.025 g (c) PVDF 5wt% TiO_2 0.050 g (d) PVDF 5wt% TiO_2 0.750 g (e) PVDF 5wt% TiO_2 0.100 g

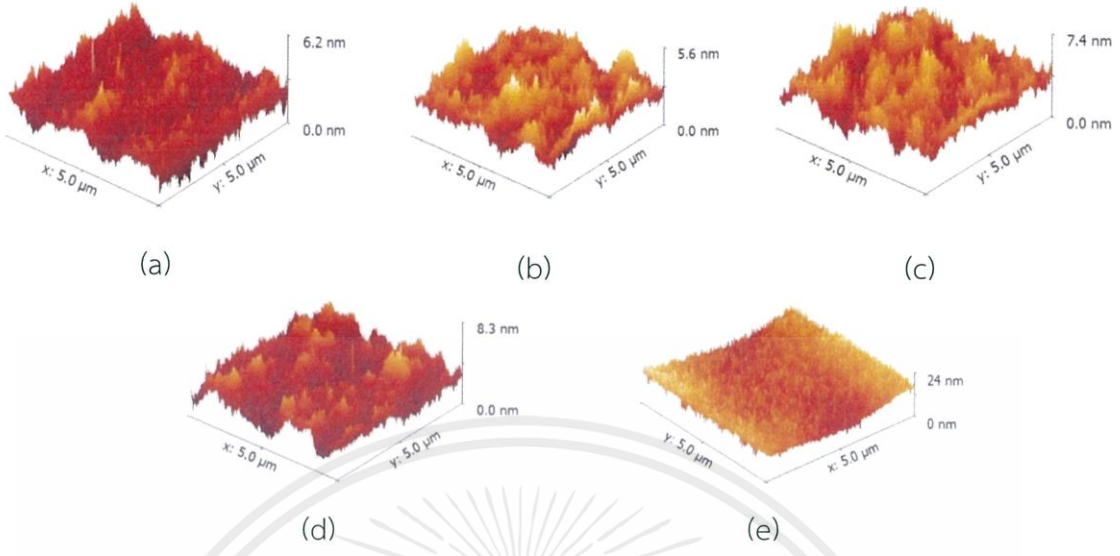
4.1.5 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคทองนาโนใน PDMS



ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS 10 g (b) PDMS AuNPs 0.25 ml (c) PDMS AuNPs 0.50 ml (d) PDMS AuNPs 0.75 ml (e) PDMS AuNPs 1 ml

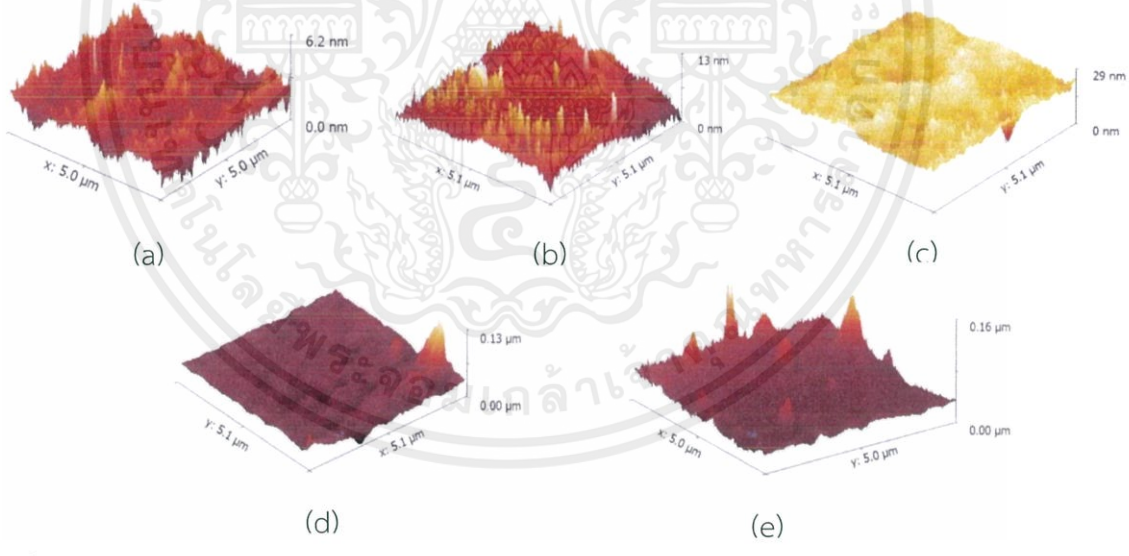
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคเงินนาโนใน PDMS



ภาพที่ 4. 6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS (b) PDMS AgNPs 0.25 ml (c) PDMS AgNPs 0.50 ml (d) PDMS AgNPs 0.75 ml (e) PDMS AgNPs 1 ml

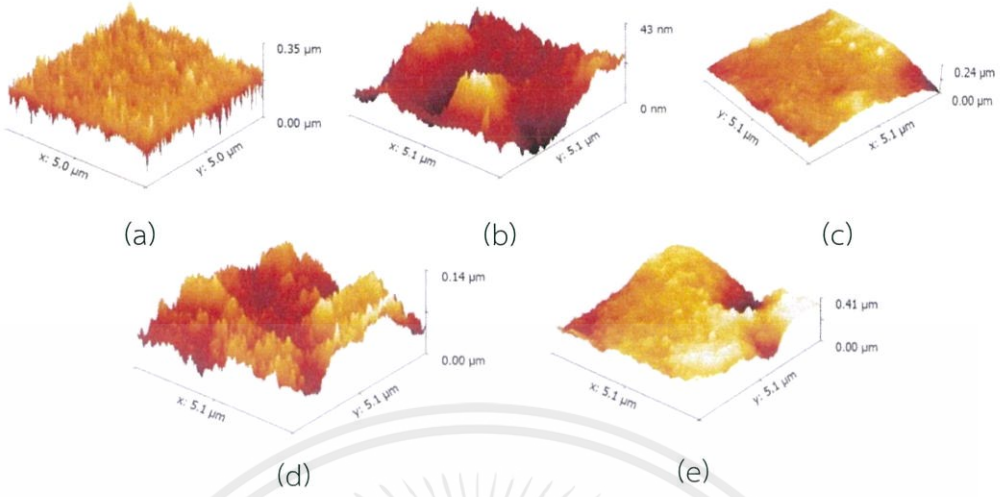
4.1.7 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ใน PDMS



ภาพที่ 4. 7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS (b) PDMS ZnO 0.025 g (c) PDMS ZnO 0.050 g (d) PDMS ZnO 0.075 g (e) PDMS ZnO 0.100 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ใน PDMS



ภาพที่ 4. 8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับวัสดุนาโน (a) PDMS (b) PDMS TiO_2 0.025 g (c) PDMS TiO_2 0.050 g (d) PDMS TiO_2 0.075 g (e) PDMS TiO_2 0.100 g

จากภาพที่ 4.1 - 4.8 เป็นภาพ Topographic ของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (5µm x5µm) ของ PDMS หลังจากเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าผลของการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ทำให้ค่าความขรุขระของพื้นผิว PDMS เปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมบางภาพ ดังนั้นจึงมีการคำนวณจากค่ารากที่สองของค่าความขรุขระ (root mean square roughness (rms)) ของภาพที่ได้ ได้ค่าดังนี้

ตารางที่ 4. 1 ค่ารากที่สองของค่าความขรุขระ (root mean square roughness (rms)) ของวัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนโลหะที่ความเข้มข้นต่างๆ

อนุภาคนาโนโลหะ (ml)	PDMS (nm.)		PVDF (nm.)	
	Ag	Au	Ag	Au
0	0.51	0.51	1.53	1.53
0.25	0.61	0.55	3.49	4.34
0.50	0.72	0.61	6.57	7.25
0.75	0.83	0.85	9.75	10.10
1.00	0.90	1.01	13.56	15.67

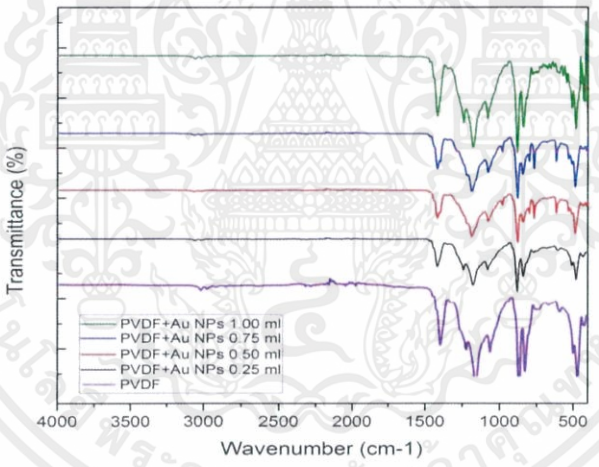
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4. 2 ค่ารากที่สองของค่าความขรุขระ (root mean square roughness (rms)) ของวัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

อนุภาคนาโนโลหะ (g)	PDMS (nm.)		PVDF (nm.)	
	ZnO	TiO_2	ZnO	TiO_2
0	0.51	0.51	1.53	1.53
0.025	1.58	4.34	6.78	7.02
0.050	4.32	7.25	9.56	13.59
0.075	6.53	10.10	14.93	15.60
0.100	12.40	15.67	18.03	20.51

4.2 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF และ PDMS ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคทองนาโน

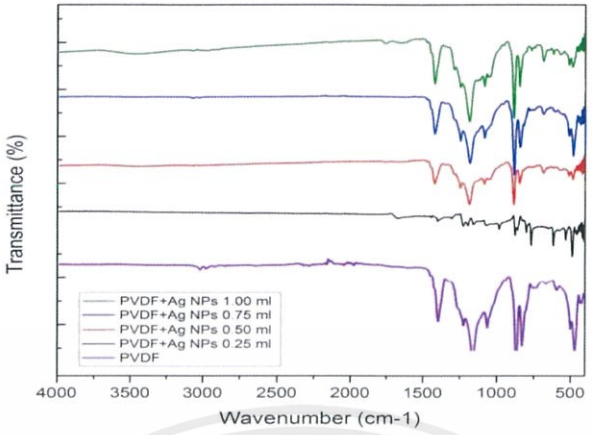


ภาพที่ 4. 9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคทองนาโนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคทองนาโนขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance)ลดลง เนื่องจากอนุภาคทองนาโนได้ดูดกลืนแสงเข้าไปมาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ PVDF อยู่ที่ 856 cm^{-1} เป็นโหมด symmetric stretching vibration ของ CF กับ deformation ของมุม HCH , 1219 cm^{-1} เป็นโหมด coupling asymmetric stretching ของ CF_2 และ 1456 cm^{-1} เป็นโหมด bending ของ CH_2 [22]–[24] ส่วนเส้นสเปกตรัมของอนุภาคทองนาโนนั้นมีค่าการทะลุผ่านที่สูงมาก เมื่อเทียบกับปริมาณของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า จึงส่งผลให้เห็นเส้นสเปกตรัมของอนุภาคทองนาโนไม่ชัดเจน แต่สามารถสรุปได้ว่ามีอนุภาคทองผสมอยู่จากค่าการทะลุผ่านที่น้อยลงของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

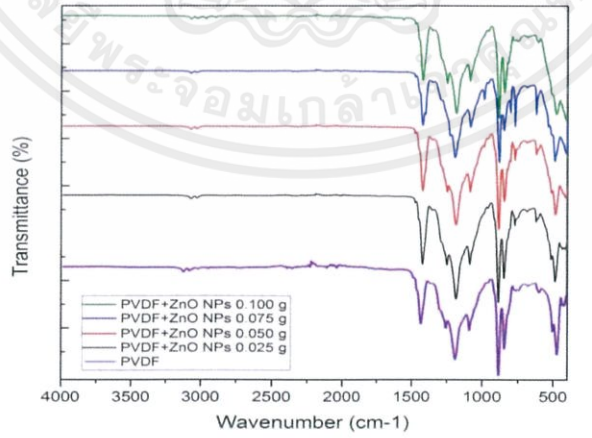
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโน



ภาพที่ 4. 10 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์ PDVF กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคเงินนาโนขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) ลดลง เนื่องจากอนุภาคเงินนาโนได้ดูดกลืนแสงเข้าไปมาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของอนุภาคเงินนาโนอยู่ที่ 1456 และ 1629 cm^{-1} ส่วนของพอลิเมอร์ PVDF อยู่ที่ 856 cm^{-1} เป็นโหมด symmetric stretching vibration ของ CF กับ deformation ของมุม HCH , 1219 cm^{-1} เป็นโหมด coupling asymmetric stretching ของ CF_2 กับ symmetric stretching ของ CC , 1456 cm^{-1} เป็นโหมด bending ของ CH_2 [22], [22], [25], [26]

4.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

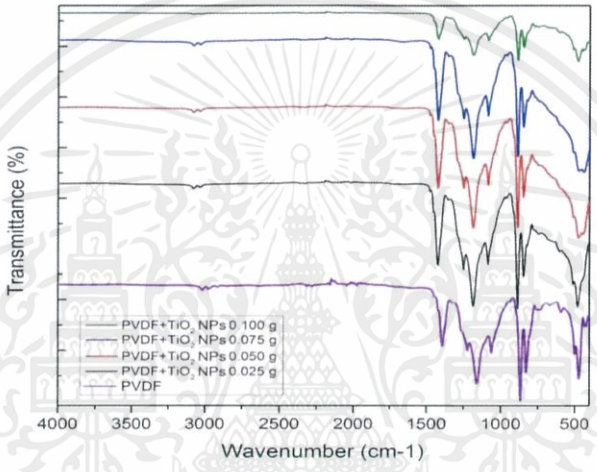


ภาพที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) ลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นาโนได้ดูดกลืนแสงเข้าไปมาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของอนุภาคเงินนาโนซิงค์ออกไซด์อยู่ที่ 621 cm^{-1} เป็นโหมด deformation ของ ZnO ส่วนของพอลิเมอร์ PVDF อยู่ที่ 766 cm^{-1} เป็นโหมด bending vibration ของ CF_2, 856 cm^{-1} เป็นโหมด symmetric stretching vibration ของ CF กับ deformation ของมุม HCH , 1219 cm^{-1} เป็นโหมด coupling asymmetric stretching ของ CF_2 กับ symmetric stretching ของ CC และ 1456 cm^{-1} เป็นโหมด bending ของ CH_2 [22], [23], [27]

4.2.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

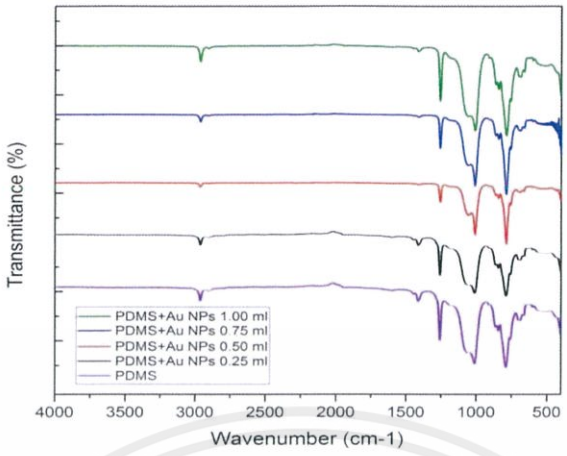


ภาพที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) ลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดูดกลืนแสงเข้าไปได้มาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของอนุภาคเงินนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ที่ 523.88 cm^{-1} เป็นโหมด stretching vibration ของ Ti-O ส่วนของพอลิเมอร์ PVDF อยู่ที่ 856 cm^{-1} เป็นโหมด symmetric stretching vibration ของ CF กับ deformation ของมุม HCH , 1219 cm^{-1} เป็นโหมด coupling asymmetric stretching ของ CF_2 กับ symmetric stretching ของ CC และ 1456 cm^{-1} เป็นโหมด bending ของ CH_2 [22], [23], [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

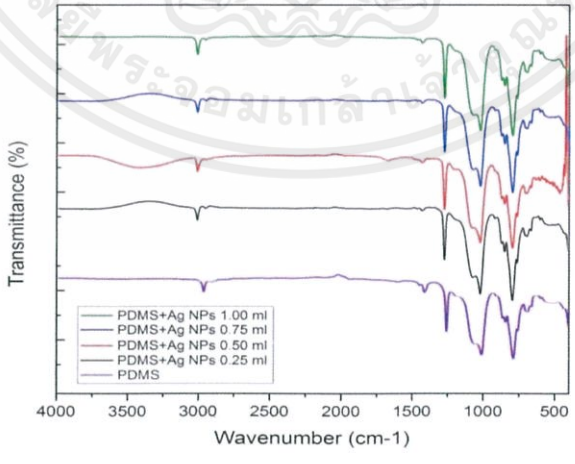
4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโน



ภาพที่ 4. 13 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคทองนาโนขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) ลดลง เนื่องจากอนุภาคทองนาโนได้ดูดกลืนแสงเข้าไปมาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ PDMS อยู่ที่ 780 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ Si-O-Si , 1020 cm^{-1} เป็นโหมด stretching vibration ของ Si-O และ 1250 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ $Si-CH_3$ [24], [29] ส่วนเส้นสเปกตรัมของอนุภาคทองนาโนนั้นมีค่าการทะลุผ่านที่สูงมาก เมื่อเทียบกับปริมาณของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า จึงส่งผลให้เห็นเส้นสเปกตรัมของอนุภาคทองนาโนไม่ชัดเจน แต่สามารถสรุปได้ว่ามีอนุภาคทองผสมอยู่จากค่าการทะลุผ่านที่น้อยลงของพอลิเมอร์

4.2.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโน

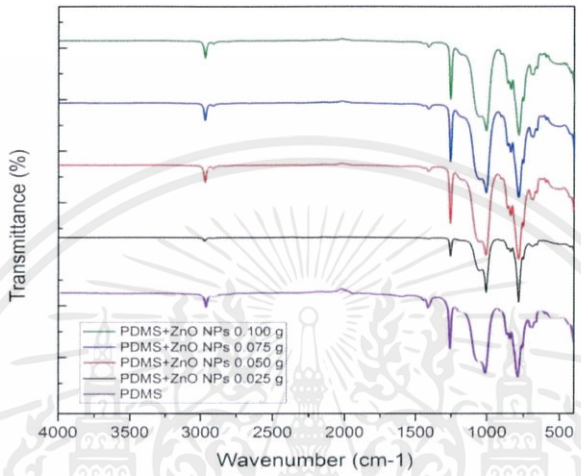


ภาพที่ 4. 14 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคเงินนาโนขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) ลดลง เนื่องจากอนุภาคเงินนาโนได้ดูดกลืนแสงเข้าไปมาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ PDMS อยู่ที่ 780 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ Si-O-Si , 1020 cm^{-1} เป็นโหมด stretching vibration ของ Si-O และ 1250 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ $Si-CH_3$ [25], [26], [29]

4.2.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

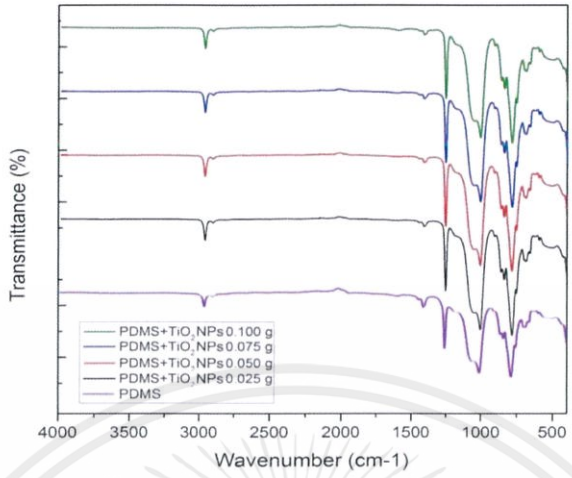


ภาพที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) ลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ดูดกลืนแสงเข้าไปมาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ PDMS อยู่ที่ 780 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ Si-O-Si , 1020 cm^{-1} เป็นโหมด stretching vibration ของ Si-O และ 1250 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ $Si-CH_3$ [22], [23], [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์



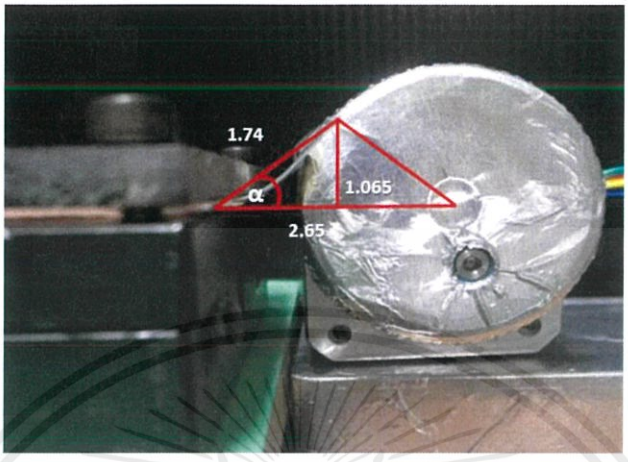
ภาพที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) ลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดูดกลืนแสงเข้าไปได้มาก นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ PDMS อยู่ที่ 780 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ Si-O-Si , 1020 cm^{-1} เป็นโหมด stretching vibration ของ Si-O และ 1250 cm^{-1} เป็นโหมด stretching ของ $Si-CH_3$ [28], [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของการโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน

4.3.1 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน



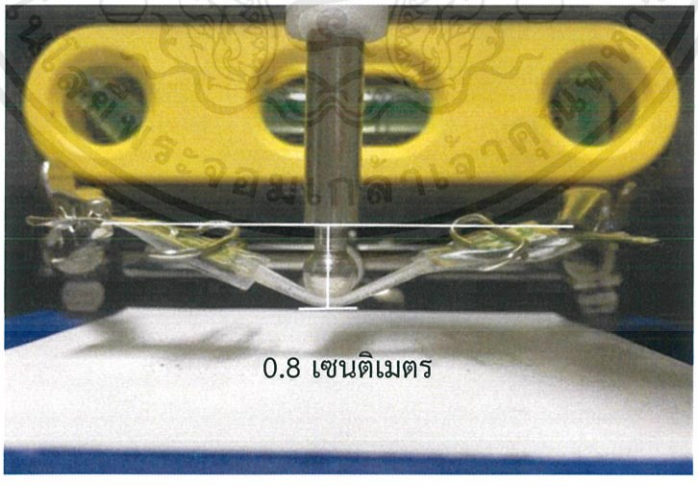
ภาพที่ 4. 17 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน

พบว่าอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนสามารถโค้งงอได้สูงสุดคือ

$$\sin \alpha = \frac{1.065}{1.74}$$

$$\alpha = 37.34^{\circ}$$

4.3.2 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโน



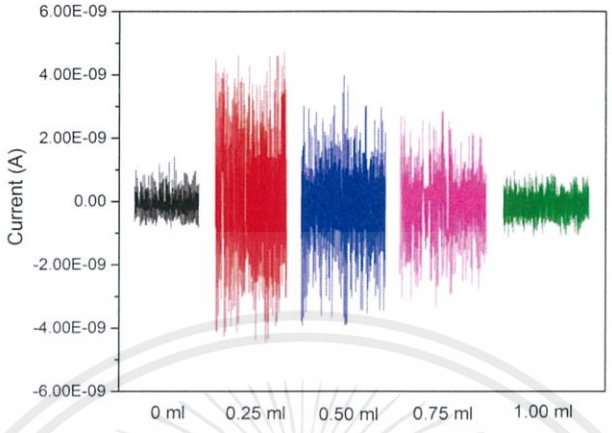
ภาพที่ 4. 18 การโค้งงอที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน

พบว่าอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนสามารถโค้งงอได้สูงสุดคือ 0.8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน

4.4.1 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคทองนาโน



ภาพที่ 4.19 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วม PVDF กับอนุภาคทองนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคทองนาโนลงไปในพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

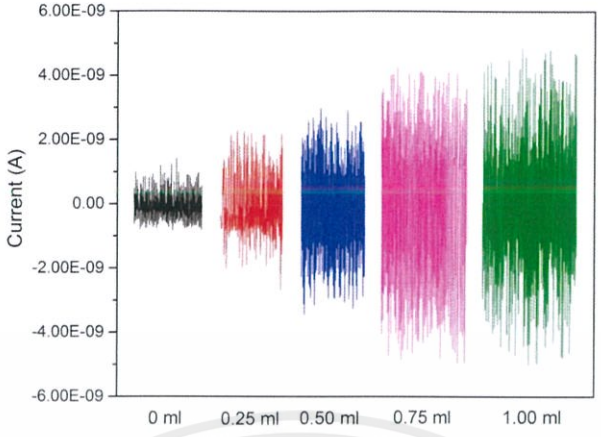
ตารางที่ 4. 3 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วม PVDF กับอนุภาคทองนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ml)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0.81	~ -0.50
0.25	~ 3.80	~ -3.73
0.50	~ 3.02	~ -3.12
0.75	~ 2.15	~ -1.84
1.00	~ 0.96	~ -0.73

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคทองนาโนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคทองนาโนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 5 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มเข้มข้นมากขึ้นทำให้อนุภาคมีการรวมตัวกัน และความร้อนที่เกิดจากการโซนิเคดก็เป็นผลให้ทองมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป นอกจากนี้ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคทองนาโนที่สเปกตรัม 1280 cm^{-1} เป็นโหมด asymmetric stretching vibration ของ CF_2 มีค่าการทะลุผ่านลดลง แสดงว่าการดูดกลืนมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ PVDF ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโน



ภาพที่ 4. 20 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคเงินนาโนลงไปในพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

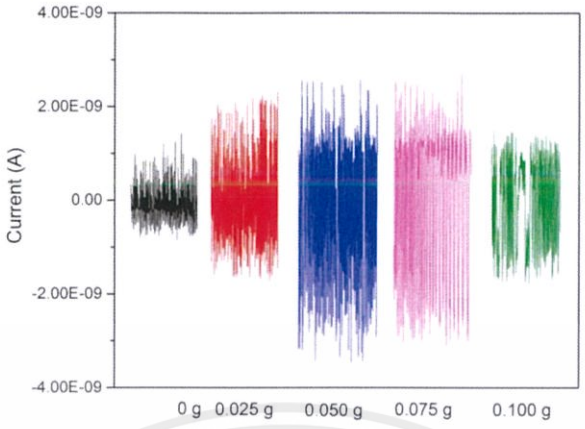
ตารางที่ 4. 4 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ml)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0.81	~ -0.50
0.25	~ 1.92	~ -1.53
0.50	~ 2.43	~ -2.26
0.75	~ 3.68	~ -3.54
1.00	~ 4.02	~ -3.81

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเงินนาโนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงได้จากผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคเงินนาโนที่สเปกตรัมต่างๆพบว่าที่ อยู่ที่ 766 cm^{-1} เป็นโหมด bending vibration ของ CF_2 , 1219 cm^{-1} เป็นโหมด coupling asymmetric stretching ของ CF_2 มีค่าการทะลุผ่านลดลง แสดงว่าค่าการดูดกลืนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้การนำไฟฟ้าของวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF มีค่ามากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์



ภาพที่ 4.21 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงไปในพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

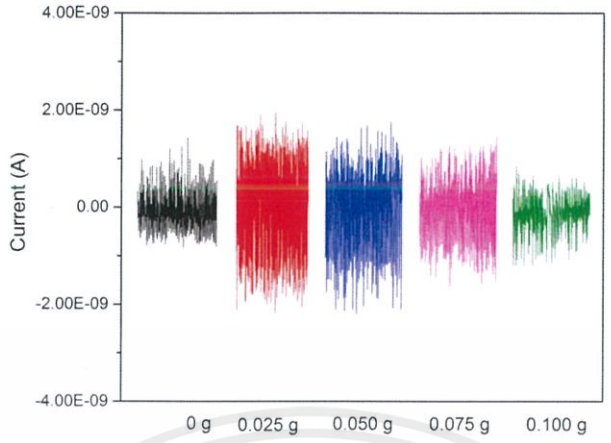
ตารางที่ 4. 5 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (g)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0.81	~ -0.50
0.025	~ 1.95	~ -1.46
0.050	~ 2.12	~ -2.64
0.075	~ 2.47	~ -2.72
0.100	~ 1.34	~ -1.45

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงความเข้มข้นที่ 0.075 g แล้วมีค่าลดลงที่ความเข้มข้น 0.100 g ซึ่งเป็นผลของปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มากเกินไปทำให้การส่งผ่านกระแสไฟฟ้าลดลง รวมไปถึงการโซนิเคดสารที่มีระยะเวลาเท่ากับความเข้มข้นอื่นๆ แต่ปริมาณสารมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคมีค่าต่ำลง และนอกจากนี้สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงได้จากผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.100 g ที่สเปกตรัมต่างๆพบว่าที่ 766 cm^{-1} เป็นโหมด bending vibration ของ CF_2 และที่ 1119.15 cm^{-1} เป็นโหมด deformation ของ OH มีค่าการทะลุผ่านมากขึ้น แสดงว่าค่าการดูดกลืนน้อยลง ซึ่งเป็นผลให้การนำไฟฟ้าของวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF มีค่าลดลงที่ความเข้มข้น 0.100 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4. 22 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปในพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

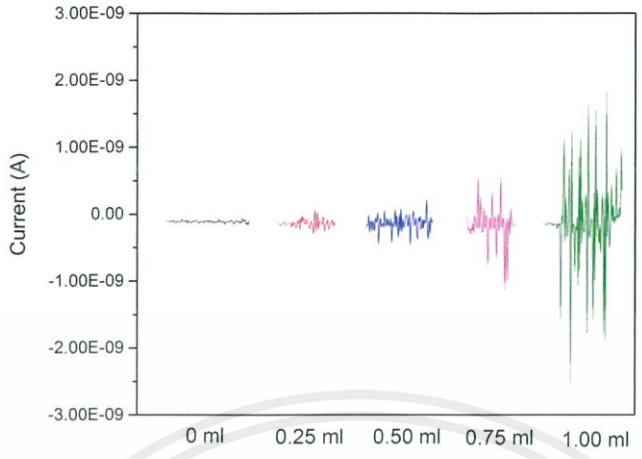
ตารางที่ 4. 6 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (g)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0.81	~ -0.50
0.025	~ 1.79	~ -1.83
0.050	~ 1.56	~ -1.61
0.075	~ 1.08	~ -1.12
0.100	~ 0.76	~ -0.92

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลของปริมาณของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ที่มากเกินไปทำให้การส่งผ่านกระแสไฟฟ้าลดลง รวมไปถึงการโซนิเคตสารที่มีระยะเวลาเท่ากับความเข้มข้นอื่นๆ แต่ปริมาณสารมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคมีค่าต่ำลง และนอกจากนี้สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงได้จากผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PVDF มีค่าการทะลุผ่านมากขึ้น แสดงว่าค่าการดูดกลืนน้อยลง เมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้การนำไฟฟ้าของวัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF มีค่าลดลงที่ความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโน



ภาพที่ 4.23 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคทองนาโนลงไปในพอลิเมอร์ PDMS ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

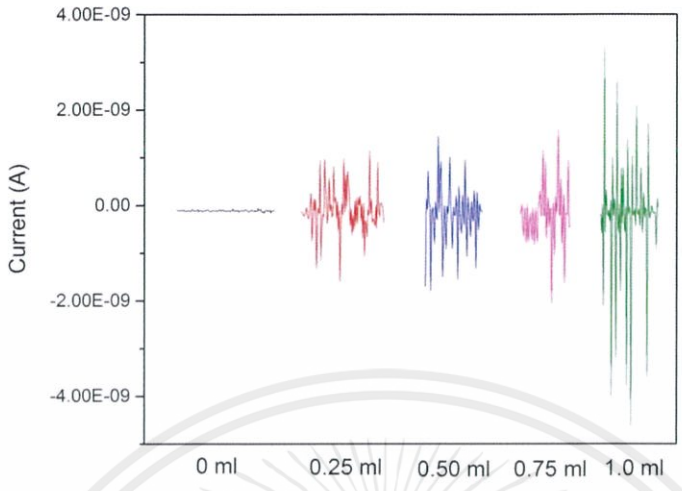
ตารางที่ 4. 7 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ml)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0	~ 0
0.25	~ 0.01	~ -0.01
0.50	~ 0.11	~ -0.18
0.75	~ 0.38	~ -0.35
1.00	~ 1.13	~ -1.21

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคทองนาโนเพิ่มขั้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระจายตัวที่ดีของอนุภาค และนอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคทองนาโน มีค่าการทะลุผ่านลดลง แสดงว่าค่าการดูดกลืนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโน



ภาพที่ 4. 24 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคเงินนาโนลงไปในพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

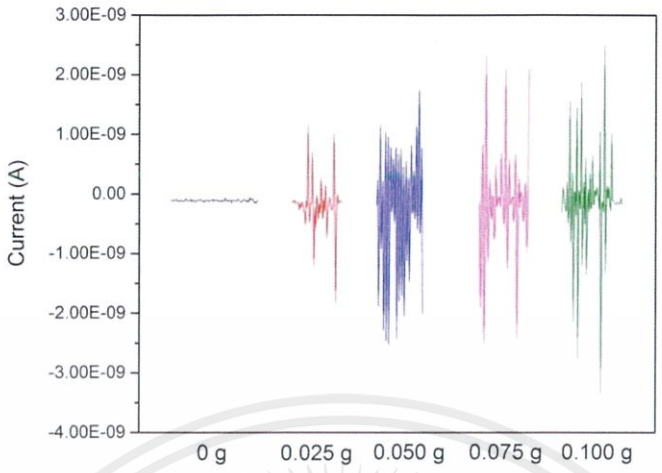
ตารางที่ 4. 8 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ml)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0	~ 0
0.25	~ 0.71	~ -0.52
0.50	~0.75	~ -0.77
0.75	~ 0.84	~ -0.89
1.00	~ 1.97	~ -2.67

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเงินนาโนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระจายตัวที่ดีของอนุภาค และนอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคเงินนาโน มีค่าการทะลุผ่านลดลง แสดงว่าค่าการดูดกลืนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์



ภาพที่ 4.25 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงไปในพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

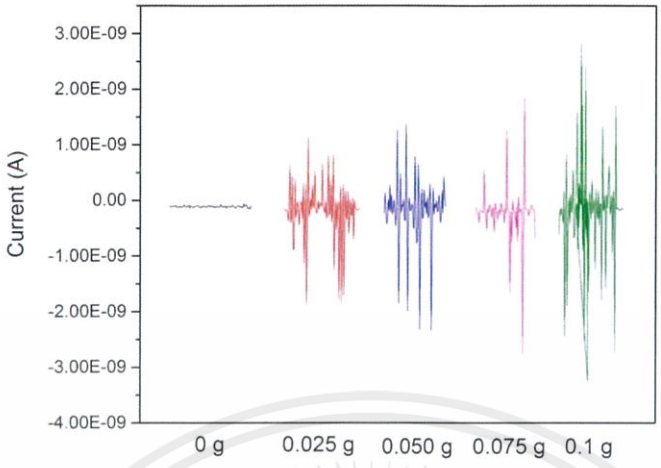
ตารางที่ 4. 9 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ml)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0	~ 0
0.25	~ 0.05	~ -0.11
0.50	~0.13	~ -0.30
0.75	~ 0.36	~ -0.41
1.00	~ 1.17	~ -1.34

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระจายตัวที่ดีของอนุภาค และนอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มีค่าการทะลุผ่านลดลง แสดงว่าค่าการดูดกลืนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.8 ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4. 26 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปข้างต้นเป็นการเติมอนุภาคเงินนาโนลงไปในพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งวัดผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยให้ความถี่ในการกด 1 Hz พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

ตารางที่ 4. 10 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัสดุพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ml)	โหมดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม	
	Bending (nA)	Release (nA)
0	~ 0	~ 0
0.25	~ 0.41	~ -0.78
0.50	~0.48	~ -0.84
0.75	~ 0.87	~ -0.91
1.00	~ 1.12	~ -1.51

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระจายตัวที่ดีของอนุภาค และนอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าการทะลุผ่านลดลง แสดงว่าค่าการดูดกลืนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอุปกรณ์ด้านพลังงาน โดยมีพอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ PVDF และ PDMS โดยมีการเติมอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ อย่างละ 2 ชนิด ซึ่งอนุภาคนาโนที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ อนุภาคทองนาโนและอนุภาค ปริมาณ 0.25 , 0.50 , 0.75 และ 1 ml ส่วนอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 0.025 , 0.050 ,0.075 และ 0.100 g พบว่าลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบของวัสดุพอลิเมอร์และค่าการนำไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกันออกไป

เมื่อทำการศึกษาลักษณะความขรุขระของพื้นผิววัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น ส่วนผลการศึกษาองค์ประกอบของวัสดุพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนนั้นวัดเป็นค่าการทะลุผ่านของแสงอินฟราเรดให้ค่าต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบของสาร และอีกส่วนหนึ่งผลของการโค้งงอของอุปกรณ์ประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน มีค่าโค้งงอสูงสุดที่ 37.34° ผลของการโค้งงอของอุปกรณ์ประกอบพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโน มีค่าโค้งงอสูงสุดที่ 0.8 เซนติเมตร ซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมาจะมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PVDF กับอนุภาคนาโน พบว่าอุปกรณ์ให้ค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุดอยู่ที่ ~4.02 และ ~ -3.81 nA ในโหมด bending และ release ตามลำดับ และในส่วนของการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์ PDMS กับอนุภาคนาโน พบว่าอุปกรณ์ที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุดอยู่ที่ ~ 1.97 และ ~-2.67 nA ในโหมด bending และ release ตามลำดับ

5.2 แนวทางการพัฒนา

5.2.1.การผสมพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ให้มีการกระจายได้อย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์ เพื่อให้การวัดค่าสมบัติต่างๆแม่นยำมากขึ้น

5.2.2.ศึกษาหาแรงในการกดอุปกรณ์วัสดุประกอบพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนที่ค่าต่างๆ มีผลต่อการนำไฟฟ้าอย่างไร

5.2.3.ศึกษาผลของความเข้มข้นพอลิเมอร์ที่ค่าต่างๆ เมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนเท่าเดิม ว่ามีผลต่อการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์อย่างไร

5.2.4.พัฒนาในด้านการห่อหุ้มของอุปกรณ์เพื่อยืดอายุการใช้งานและความคงทนของอุปกรณ์

5.2.5.สามารถนำอุปกรณ์ไปใช้ร่วมกับสิ่งมีชีวิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Rsc. Early composites. *Rsc* **4.3.1,** 3–5

[2] Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G. & Wypych, F. Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. *Mat. Res.* **12,** 1–39 (2009).

[3] Baur, C. *et al.* Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Vibrational Energy Harvesting. *Polym. Compos. Energy Harvest. Convers. Storage* 1–27 (2014). doi:10.1021/bk-2014-1161.ch001

[4] Pronk, M., Substances, C. & Assessment, I. R. *Nanomaterials in REACH Nanosilver as a case study*. (2009).

[5] Widgerow, A. D. Nanocrystalline silver, gelatinases and the clinical implications. *Burns* **36,** 965–974 (2010).

[6] Vandebriel, R. J. *et al.* Immunotoxicity of silver nanoparticles in an intravenous 28-day repeated-dose toxicity study in rats. *Part. Fibre Toxicol.* **11,** 21 (2014).

[7] Wiley, B., Sun, Y., Mayers, B. & Xia, Y. Shape-controlled synthesis of metal nanostructures: The case of silver. *Chem. - A Eur. J.* **11,** 454–463 (2005).

[8] Prabhu, S. & Poulose, E. K. Silver nanoparticles: mechanism of antimicrobial action, synthesis, medical applications, and toxicity effects. *Int. Nano Lett.* **2,** 32 (2012).

[9] Alkilany, A. M. & Murphy, C. J. Toxicity and cellular uptake of gold nanoparticles: what we have learned so far? *J. Nanopart. Res.* **12,** 2313–2333 (2010).

[10] Words, K. Application of PVDF Pressure Gauge for Pressure Measurements of Non-ideal Explosives. **17,** 112–114 (2010).

[11] Kim, B. S. & Lee, J. Macroporous PVDF / TiO 2 membranes with three-dimensionally interconnected pore structures produced by directional melt crystallization. *Chem. Eng. J.* **301,** 158–165 (2016).

[12] WEC. World Energy Resources. *World Energy Counc. Rep.* 468 (2013).

[13] Wang, Z. L. & Wu, W. Nanotechnology-Enabled Energy Harvesting for Self-Powered Micro-/Nanosystems. *Angew. Chemie Int. Ed.* **51,** 11700–11721 (2012).

[14] Wang, Z. L., Zhu, G., Yang, Y., Wang, S. & Pan, C. Progress in nanogenerators for portable electronics. *Mater. Today* **15,** 532–543 (2012).

[15] Xu, S. *et al.* Self-powered nanowire devices. *Nat. Nanotechnol.* **5,** 366–373 (2010).

[16] Zhu, G., Wang, A. C., Liu, Y., Zhou, Y. & Wang, Z. L. Functional electrical stimulation by nanogenerator with 58 v output voltage. *Nano Lett.* **12,** 3086–3090 (2012).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] Lin, Y. F., Song, J., Ding, Y., Lu, S. Y. & Wang, Z. L. Piezoelectric nanogenerator using CdS nanowires. *Appl. Phys. Lett.* **92,** 1–4 (2008).

[18] Chang, C., Tran, V. H., Wang, J., Fuh, Y. K. & Lin, L. Direct-write piezoelectric polymeric nanogenerator with high energy conversion efficiency. *Nano Lett.* **10,** 726–731 (2010).

[19] Huang, C. Te *et al.* GaN nanowire arrays for high-output nanogenerators. *J. Am. Chem. Soc.* **132,** 4766–4771 (2010).

[20] Wang, Z. L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors – Principles, problems and perspectives. *Faraday Discuss.* **176,** 447–458 (2014).

[21] Wang, Z. L., Chen, J. & Lin, L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy Environ. Sci.* **8,** 2250–2282 (2015).

[22] Adem, E., Rickards, J. & Mu, E. Changes in the physical and chemical properties of PVDF irradiated by 4 MeV protons. **49,** 537–541 (2003).

[23] Nallasamy, P. & Mohan, S. Vibrational spectroscopic characterization of form II poly (vinylidene fluoride). **43,** 821–827 (2005).

[24] Smitha, S. L., Philip, D. & Gopchandran, K. G. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Green synthesis of gold nanoparticles using Cinnamomum zeylanicum leaf broth. **74,** 735–739 (2009).

[25] Search, H. *et al.* Synthesis of silver nanoparticles by silver salt reduction and its characterization. **012034,**

[26] Phanjom, P. & Ahmed, G. Biosynthesis of Silver Nanoparticles by Aspergillus oryzae (MTCC No . 1846) and Its Characterizations. **5,** 14–20 (2015).

[27] Kumar, H. & Rani, R. Structural and Optical Characterization of ZnO Nanoparticles Synthesized by Microemulsion Route. **14,** 26–36 (2013).

[28] Transactions, C. S. & Arasi, A. Y. Titania Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Technique. **2,** 239–245 (2013).

[29] Journal, M. P. Polydimethyl Siloxane Toughened Epoxy Resins: Tensile Strength and Dynamic Mechanical Analysis Whidad S. Hanoosh and Emad M. Abdelrazaq. **4,** (2009).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวธัญญารัตน์ สุหัสโช เกิดเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพัทลุง จังหวัดพัทลุง ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้