



การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนด้วย
การเติมวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลอสอลสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้า
ขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น

Improving the electrical output efficiency of Polydimethylsiloxane
by adding Colossal dielectric materials for flexible triboelectric
nanogenerator

นางสาวอัมรินทร์ ธีรพัฒน์ธาดา

นางสาวอาทิตย์ยา พลอยศรี

นางสาวจิราพัชร เป็งกาสิทธิ์

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2564



การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนด้วย
การเติมวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลอสอลสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้า
ขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น

Improving the electrical output efficiency of Polydimethylsiloxane
by adding Colossal dielectric materials for flexible triboelectric
nanogenerator

นางสาวอัมรินทร์ อีร์พัฒนธาดา

นางสาวอาทิตย์ยา พลอยศรี

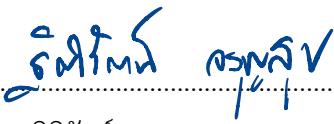
นางสาวจิราพัชร เป็งกาสิทธิ์

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2564

ชื่อเรื่อง	การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ด้วยการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลอสซอลสำหรับอุปกรณ์ผลิต พลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น Improving the electrical output efficiency of Polydimethylsiloxane by adding Colossal dielectric materials for flexible triboelectric nanogenerator
ชื่อผู้วิจัย	นางสาวอัญมรินทร์ อีร์พีพัฒนธาตา นางสาวอาทิตยา พลอยศรี นางสาวจิราพัชร เป็งกาสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จูติรัตน์ จรุงสุข

โครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. จูติรัตน์ จรุงสุข)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ การสนับสนุน และความอนุเคราะห์ที่ดีจากทุก ๆ ท่าน รวมถึงหน่วยงานวิจัยต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วง คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ฐิติรัตน์ จรุงสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ และประสบการณ์ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ พร้อมทั้งให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งเป็นแรงผลักดันและกำลังใจที่ดีแก่คณะผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือและเป็นที่กำลังใจให้แก่คณะผู้วิจัยในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.นราธิป วิทยากร และ ดร.สนน ผ่องอำไพ ที่ให้การสนับสนุนการใช้เครื่องมือวิจัยและการทำต้นแบบอุปกรณ์ขับเคลื่อน GPS ในพื้นรองเท้า พร้อมทั้งถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.วิลาสินี กิ่งแก้ว ที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้วิจัยในการทำการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ภายในห้องทดลอง

ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่าน และสถาบันวิจัยต่าง ๆ ที่ให้ความร่วมมือ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยแห่งชาติ (วช.) ร่วมกับ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2564

ในท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัว เพื่อน ๆ และบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวมาข้างต้น ที่ให้คำแนะนำ การสนับสนุน และความช่วยเหลือ พร้อมทั้งเป็นแรงผลักดันและกำลังใจที่ดีเสมอมาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

อัญมรินทร์ อธิพัฒน์ธาดา

อาทิตยา พลอยศรี

จิราพัชร เป็งกาสิทธิ์

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน ด้วยการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น		
ผู้วิจัย	อัญมรินทร์ อีรพิพัฒนธาดา	รหัสนิสิต	61102010303
	อาทิตยา พลอยศรี	รหัสนิสิต	61102010304
	จิราพัชร เบ็งกาสิทธิ์	รหัสนิสิต	61102010507
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์)		
ปีการศึกษา	2564		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จูติรัตน์ จริญญาสุข		

บทคัดย่อ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (TENG) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลจากการเกิดไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสเป็นไฟฟ้าได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมากสำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดพกพาและสวมใส่ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาอุปกรณ์ TENG โดยใช้พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) เป็นชั้นสัมผัสหลัก และปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์และวัสดุโคโลซอลไดอิเล็กทริกออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ชนิด R_2O_3 และ $RFeO_3$ ตามลำดับ เมื่อ R คือ แลนทานัม (La), ซัมมาเรียม (Sm) และ นีโอติเมียม (Nd) ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่า พิล์มคอมโพสิตมีความยืดหยุ่นสูงสำหรับสารตัวเติมทุกประเภท โดยสามารถยืนยันความบริสุทธิ์ของและโครงสร้างผลึกได้ด้วยเทคนิค IR และ XRD เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของเฟสตัวเติมผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคเอกซเรย์ด้วยรังสีเอกซ์ซินโครตรอน (SR-XTM) พบการกระจายตัวที่ดีของ R_2O_3 และ $RFeO_3$ อยู่ภายในเมทริกซ์ของ PDMS และจากการตรวจสอบประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้า พบว่า PDMS/Sm $_2$ O $_3$ ที่ 5 % wt มีประสิทธิภาพการส่งออกสูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ ~ 68 V และ ~ 66.4 nA ในขณะที่ PDMS/LaFeO $_3$ ที่ 10 % wt สามารถให้ค่าการประสิทธิภาพการส่งออกสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ ~ 75 V และ ~ 164 nA โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ~ 1,990 μ W ซึ่งสามารถขับเคลื่อนหลอดไฟ LED ได้จำนวน 60 หลอด นอกจากนี้ PDMS/LaFeO $_3$ สัดส่วนดังกล่าวยังสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ติดตามตัว (GPS) ที่อยู่ในพื้นรองเท้าได้ ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนากลุ่มอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกลสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก, พอลิไดเมทิลซิลอกเซน, วัสดุโคโลซอลไดอิเล็กทริก

Title	Improving the electrical output efficiency of Polydimethylsiloxane by Adding Colossal dielectric materials for flexible triboelectric nanogenerator		
Authors	Unyamin Tirapipattada	Student ID	61102010303
	Atitaya Ploysri	Student ID	61102010304
	Jirapat Pengkasit	Student ID	61102010507
Degree	Bachelor of Science (Materials Science)		
Academic Year	2021		
Advisor	Dr. Thitirat Charoonsuk		

Abstract

In recent years, the triboelectric nanogenerators (TENG) that can convert mechanical energy into electricity from the electrostaticity have been greatly developed for utilizing as a power source for portable and wearable electronic devices. This research develops the TENG by using polydimethylsiloxane (PDMS) as the primary contact layer and improve its efficiency by adding the dielectric and colossal dielectric materials of oxides and perovskite complex oxides, including the R_2O_3 and $RFeO_3$; where R is Lanthanum (La), Samarium (Sm), and Neodymium (Nd) respectively. The change in ratios was studied at 0.5, 2.5, 5, and 10% wt, respectively. According to the results, the composite films show high flexibility for all types of fillers and compositions. The phase purity and crystal structure can be confirmed by IR and XRD. The morphology and distribution of the filler phase were examined *via* Scanning Electron Microscope (SEM) and Synchrotron X-ray tomographic microscopy (SR-XTM) showed favorable distribution of R_2O_3 and $RFeO_3$ within the PDMS matrix. And the efficiency of the electrical output was examined. It was found that PDMS/ Sm_2O_3 at 5 % wt had the highest output efficiency for voltage and current by ~ 68 V and ~ 66.4 nA. The PDMS/ $LaFeO_3$ at 10 % wt can provide highest output efficiency for voltage and current by ~ 75 V and ~ 164 nA with the maximum output power of $\sim 1,990$ μ W that can light up 60 LEDs. Moreover, the PDMS/ $LaFeO_3$ in optimum condition can be used to power up the global positioning system (GPS) inside the shoe's insole. The researcher believe that it will be useful to develop a group of mechanical energy harvesting device for portable and wearable electronics in future.

Keywords: Triboelectric nanogenerators, Polydimethylsiloxane, Polydimethylsiloxane composites

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	๗
บทคัดย่อภาษาไทย.....	๘
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	๙
สารบัญ.....	๑๐
สารบัญรูปภาพ.....	๑๑
สารบัญตาราง.....	๑๒
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทบทวนวรรณกรรม.....	5
1. อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ (Portable and Wearable electronic).....	5
2. อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน หรือการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting).....	6
3. อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator).....	7
3.1 ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Contact-separation mode).....	7
3.2 ประเภทการสัมผัสแบบเลื่อน (Lateral-sliding mode).....	8
3.3 ประเภทการสัมผัสแบบอิสระ (Freestanding layer mode).....	9
3.4 ประเภทการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode mode).....	9
4. ส่วนประกอบของไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric component).....	10
5. อนุกรมไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series).....	11
6. พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS).....	12
7. วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric materials).....	16
8. วัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Oxide, Multiple Oxides).....	22
8.1 ธาตุหายาก (Rare Earth).....	22
8.2 โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite structure).....	23
9. วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลอสซอล (Colossal dielectric materials).....	25
10. การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation).....	27

10.1 การแคลไซน์ (Calcination).....	28
11. วัสดุคอมโพสิต หรือวัสดุผสม (Composite material).....	28
12. กระบวนการหล่อแบบ.....	29
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	30
14. กล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM).....	31
14.1 การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิค SR-XTM.....	31
15. เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy).....	32
16. เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD).....	33
17. เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	34
18. เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter).....	35
19. เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter).....	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
1. วัสดุและสารเคมี.....	37
2. อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง.....	37
3. ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ.....	38
3.1 การเตรียม Oxalic acid 10%.....	38
3.2 การตกตะกอนแลนทานัม (Lanthanum Oxide: La_2O_3), ซัมมาเรียม (Samarium Oxide: Sm_2O_3) และ นีโอดีเมียม (Neodymium Oxide: Nd_2O_3).....	39
3.3 การกรองสารแลนทานัม (Lanthanum Oxide: La_2O_3), ซัมมาเรียม (Samarium Oxide: Sm_2O_3) และ นีโอดีเมียม (Neodymium Oxide: Nd_2O_3).....	39
4. ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ.....	40
4.1 การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH 6 M.....	40
4.2 การตกตะกอนแลนทานัมเฟอเรต (Lanthanum Iron Oxide : LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอเรต (Samarium Iron Oxide : SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (Neodymium Iron Oxide : NdFeO_3).....	40
4.3 การกรองแลนทานัมเฟอเรต (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอเรต (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3).....	41
5. วิธีการทำคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริก และ PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลโลอิดด้วยกระบวนการหล่อแบบ.....	42

5.1 พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) เติมด้วย Rare Earth oxide และ Rare Earth Perovskite Oxide.....	42
6. การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator).....	44
7. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	44
7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)....	44
7.2 กล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM).....	45
7.3 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy).....	45
7.4 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD).....	45
7.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties).....	45
7.6 การตรวจสอบค่าการส่งออกจากไฟฟ้า.....	46
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	47
1. ผลการวิเคราะห์ของผงผลึกออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Oxide) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD).....	47
1.1 ผลการวิเคราะห์ของผงผลึกออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Oxide) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD).....	47
1.2 ผลการวิเคราะห์ของผงผลึกออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD).....	50
2. ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite).....	54
2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์.....	54
2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide).....	57
3. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)	61

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนบริสุทธิ์ (PDMS pure)	61
3.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ของ แผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ (Rare Earth Oxide).....	62
3.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็น องค์ประกอบ(Rare Earth Perovskite Oxide).....	65
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)...	68
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุ ไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ (Rare Earth Oxide).....	68
5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิด แสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographicmicroscopy: SR-XTM).....	71
5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจาก แหล่งกำเนิดแสงซินโคร- ตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy:SR-XTM) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ (Rare Earth Oxide).....	72
5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจาก แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มี ธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide).....	76
6. เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM).....	80
6.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรเมตริ่งสีแบบการกระจายพลังงาน Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS).....	81

7. ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไฮดรอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	84
7.1 แผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไฮดรอกเซนที่เติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth oxide).....	85
7.2 แผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไฮดรอกเซนที่เติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite oxide).....	89
8. ผลการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไฮดรอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	94
8.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum Oxide: La_2O_3), ซัมมาเรียมออกไซด์ (Samarium Oxide: Sm_2O_3) และนีโอดีเมียมออกไซด์ (Neodymium Oxide: Nd_2O_3).....	94
8.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแลนทานัมเฟอร์ไรต์ (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอร์ไรต์ (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอร์ไรต์ (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3).....	98
9. ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดเมทิลไฮดรอกเซน ฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไฮดรอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	102
10. ตัวขาร์จประจุ (Capacitor).....	104
11. Light emitting diode (LED).....	106
12. การนำอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) ไปประยุกต์ใช้งาน (Application).....	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	112
1. สรุปผลการทดลอง.....	112

1.1 การสังเคราะห์วัสดุกลุ่มออกไซด์ไดอิเล็กทริกและวัสดุออกไซด์เชิงซ้อนไดอิเล็กทริก ชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ.....	112
1.2 การขึ้นรูปคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิต พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite).....	113
1.3 การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator).....	114
1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์ม PDMS กับวัสดุ ไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้าง เพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วน.....	115
1.5 การศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก, ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้า ขาออกของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์ม PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็น กลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มี ธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	115
1.6 การนำไปใช้งาน (Application).....	116
2. ข้อเสนอแนะ.....	116
เอกสารอ้างอิง.....	117
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก.....	125
ภาคผนวก ข.....	127
ภาคผนวก ค.....	128
ประวัติผู้วิจัย.....	129

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 กราฟแสดงการเติบโตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้.....	5
ภาพประกอบ 2.2 องค์ประกอบหลักของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน.....	6
ภาพประกอบ 2.3 ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Contact-separation mode).....	8
ภาพประกอบ 2.4 ประเภทการสัมผัสแบบเลื่อน (Lateral-sliding mode).....	8
ภาพประกอบ 2.5 ประเภทการสัมผัสแบบอิสระ (Freestanding layer mode).....	9
ภาพประกอบ 2.6 ประเภทการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode mode).....	10
ภาพประกอบ 2.7 ส่วนประกอบของไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerators).....	10
ภาพประกอบ 2.8 โครงสร้างพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS).....	12
ภาพประกอบ 2.9 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และ (b) แสดงค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ของ PDMS.....	13
ภาพประกอบ 2.10 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และ (b) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของ PDMS.....	14
ภาพประกอบ 2.11 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และ (b) แสดงค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ของ PDMS.....	15
ภาพประกอบ 2.12 การแสดงแผนผังกระบวนการผลิตฟิล์มบางคอมโพสิต BTO NPs-PDMS.....	17
ภาพประกอบ 2.13 แผนภาพแสดงกลไกการผลิตกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ PDMS-based TENG.....	17
ภาพประกอบ 2.14 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่าความ หนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current) ของ TENG และ (b) แสดงค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density).....	18
ภาพประกอบ 2.15 แผนผังของโหมดสัมผัส Triboelectric nanogenerator (TENG) โดยมี TiO _{2-x} NPs ที่เติมอยู่ใน polydimethylsiloxane (PDMS) เป็นชั้นแรงเสียดทาน.....	19
ภาพประกอบ 2.16 แสดงผลกระทบกำลังขับของ TENG ที่เกิดจากการเติม TiO ₂ โดย (a) แสดงค่า แรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage), (b) แสดงค่ากระแสไฟฟ้า (Current), (c) แสดงแรงดันไฟฟ้าขาออก/กระแส และ (d) แสดงความหนาแน่นกำลังของ TENG ภายใต้แรงผลัก 5 N และความถี่การกด 5 Hz	19
ภาพประกอบ 2.17 (a-e) แสดงแผนผังกระบวนการผลิตผงเซรามิก BaTiO ₃ , (f-h) แสดงการเตรียมฟิล์มคอมโพสิต BaTiO ₃ -base/PDMS (i) ภาพ SEM ของพื้นผิว คอมโพสิต BaTiO ₃ -base/PDMS.....	20

ภาพประกอบ 2.18 การทดสอบความเสถียรของ C-TENG โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าออก และค่ากระแสไฟฟ้าออกที่ความถี่ความถี่ต่างกัน และ (b) แสดงค่าความหนาแน่นของ พลังงานที่มีความถี่ความถี่ต่างกัน.....	21
ภาพประกอบ 2.19 ตารางของธาตุหายาก (Rare Earth Elements).....	23
ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์ (perovskite crystal structure).....	24
ภาพประกอบ 2.21 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ของวัสดุ CP หลายชนิด.....	25
ภาพประกอบ 2.22 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับความถี่ (ϵ') ของ (a) LaFeO_3 , (b) PrFeO_3 และ (c) SmFeO_3 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ของ (d) LaFeO_3 , (e) PrFeO_3 และ (f) SmFeO_3 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	26
ภาพประกอบ 2.23 วิธีการตกตะกอนร่วมโดยทั่วไปสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคไมโครและนาโน.....	27
ภาพประกอบ 2.24 กระบวนการหล่อแบบ.....	29
ภาพประกอบ 2.25 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	30
ภาพประกอบ 2.26 เครื่อง Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SR-XTM).....	31
ภาพประกอบ 2.27 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy).....	33
ภาพประกอบ 2.28 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD).....	34
ภาพประกอบ 2.29 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	35
ภาพประกอบ 2.30 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter).....	35
ภาพประกอบ 2.31 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter).....	36
ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนการเตรียม Oxalic acid 10%.....	38
ภาพประกอบ 3.2 การเตรียมสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ.....	40
ภาพประกอบ 3.3 การเตรียมสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มี ธาตุหายากเป็นองค์ประกอบของ LaFeO_3	42
ภาพประกอบ 3.4 การขึ้นรูป PDMS ที่ถูกเติมด้วย Rare Earth หรือ Rare Earth perovskite oxide.....	43
ภาพประกอบ 3.5 แสดงการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก.....	44
ภาพประกอบ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน เพื่อนำไปตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก.....	46
ภาพประกอบ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก La_2O_3 โดยกระบวนการตก ตะกอนร่วม.....	48
ภาพประกอบ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก Sm_2O_3 โดยกระบวนการตก ตะกอนร่วม.....	49

ภาพประกอบ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก Nd_2O_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม.....	50
ภาพประกอบ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก LaFeO_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม.....	51
ภาพประกอบ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก SmFeO_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม.....	52
ภาพประกอบ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก NdFeO_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม.....	53
ภาพประกอบ 4.7 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย La_2O_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ.....	55
ภาพประกอบ 4.8 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Sm_2O_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ.....	56
ภาพประกอบ 4.9 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Nd_2O_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ.....	57
ภาพประกอบ 4.10 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย LaFeO_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ.....	58
ภาพประกอบ 4.11 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย SmFeO_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ.....	59
ภาพประกอบ 4.12 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย NdFeO_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ.....	60
ภาพประกอบ 4.13 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS pure.....	61
ภาพประกอบ 4.14 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/ La_2O_3	63
ภาพประกอบ 4.15 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Sm_2O_3	64
ภาพประกอบ 4.16 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Nd_2O_3	64
ภาพประกอบ 4.17 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/ LaFeO_3	66
ภาพประกอบ 4.18 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/ SmFeO_3	67
ภาพประกอบ 4.19 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/ NdFeO_3	67
ภาพประกอบ 4.20 แสดงพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแผ่นฟิล์ม PDMS/ La_2O_3	69
ภาพประกอบ 4.21 แสดงพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Sm_2O_3	70
ภาพประกอบ 4.22 แสดงพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Nd_2O_3	71
ภาพประกอบ 4.23 แสดงภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย La_2O_3 ที่ (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ.....	73

ภาพประกอบ 4.24 แสดงภาพถ่ายผ่านฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Sm_2O_3 ที่	
(a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ.....	74
ภาพประกอบ 4.25 แสดงภาพถ่ายผ่านฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Nd_2O_3 ที่	
(a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ.....	75
ภาพประกอบ 4.26 แสดงภาพถ่ายผ่านฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย LaFeO_3 ที่	
(a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ.....	77
ภาพประกอบ 4.27 แสดงภาพถ่ายผ่านฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย SmFeO_3 ที่	
(a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ.....	78
ภาพประกอบ 4.28 แสดงภาพถ่ายผ่านฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย NdFeO_3 ที่	
(a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ.....	79
ภาพประกอบ 4.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PDMS/ LaFeO_3	
(a) 2.5 % wt (b) 10 % wt.....	80
ภาพประกอบ 4.30 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเชิงคุณภาพของ PDMS/ LaFeO_3	
ที่อัตราส่วน 2.5 % wt.....	81
ภาพประกอบ 4.31 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเชิงคุณภาพของ PDMS/ LaFeO_3	
ที่อัตราส่วน 10 % wt.....	81
ภาพประกอบ 4.32 แสดงการกระจายตัวของ PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 2.5 % wt แต่ละธาตุ	
องค์ประกอบในผลึกของ PDMS.....	83
ภาพประกอบ 4.33 แสดงการกระจายตัวของ PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 10 % wt แต่ละธาตุ	
องค์ประกอบในผลึกของ PDMS.....	84
ภาพประกอบ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า	
ของแผ่นฟิล์ม PDMS/ La_2O_3 ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	86
ภาพประกอบ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า	
ของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Sm_2O_3 ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	86
ภาพประกอบ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า	
ของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Nd_2O_3 ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	87
ภาพประกอบ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณ	
ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/ La_2O_3 ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	88
ภาพประกอบ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณ	
ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Sm_2O_3 ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	88
ภาพประกอบ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณ	
ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Nd_2O_3 ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	89

ภาพประกอบ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโพลีทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า ของแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO ₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	90
ภาพประกอบ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโพลีทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า ของแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO ₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	91
ภาพประกอบ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโพลีทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า ของแผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO ₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	91
ภาพประกอบ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดโพลีทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณ ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO ₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	92
ภาพประกอบ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดโพลีทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณ ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO ₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	93
ภาพประกอบ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดโพลีทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณ ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO ₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน.....	93
ภาพประกอบ 4.46 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุ หายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับแผ่นอลูมิเนียม (a) PDMS/La ₂ O ₃ (b) PDMS/Sm ₂ O ₃ และ (c) PDMS/Nd ₂ O ₃	95
ภาพประกอบ 4.47 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุ หายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับเทปลอน (a) PDMS/La ₂ O ₃ (b) PDMS/Sm ₂ O ₃ และ (c) PDMS/Nd ₂ O ₃	97
ภาพประกอบ 4.48 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์โครงสร้าง เพอร์อฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับแผ่นอลูมิเนียม (a) PDMS/LaFeO ₃ (b) PDMS/SmFeO ₃ และ (c) PDMS/NdFeO ₃	99
ภาพประกอบ 4.49 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์โครงสร้าง เพอร์อฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับเทปลอน (a) PDMS/LaFeO ₃ (b) PDMS/SmFeO ₃ และ (c) PDMS/ NdFeO ₃	101
ภาพประกอบ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้า ขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ความต้านทาน 1M Ω ของ PDMS/LaFeO ₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt.....	102

ภาพประกอบ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ความต้านทาน $1\text{M } \Omega$ ของ PDMS/SmFeO ₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt.....	103
ภาพประกอบ 4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ความต้านทาน $5\text{M } \Omega$ ของ PDMS/NdFeO ₃ ที่อัตราส่วน 0.5 % wt.....	103
ภาพประกอบ 4.53 แสดงค่าการชาร์จประจุของ PDMS/LaFeO ₃ 10 % wt.....	105
ภาพประกอบ 4.54 แสดงค่าการชาร์จประจุของ PDMS/SmFeO ₃ 10 % wt.....	105
ภาพประกอบ 4.55 แสดงค่าการชาร์จประจุของ PDMS/NdFeO ₃ 0.5 % wt.....	106
ภาพประกอบ 4.56 แสดงภาพการต่อหลอดไฟ LED แบบอนุกรม.....	106
ภาพประกอบ 4.57 แสดงภาพการทดสอบการขับเคลื่อนหลอดไฟ LED.....	107
ภาพประกอบ 4.58 แสดงส่วนประกอบของรองเท้า.....	107
ภาพประกอบ 4.59 วิธีการต่อวงจรภายในรองเท้า.....	108
ภาพประกอบ 4.60 แสดงภาพรองเท้าที่ทำการต่อวงจร.....	109
ภาพประกอบ 4.61 แสดงภาพการทดลองใช้รองเท้าในการชาร์จประจุ.....	110
ภาพประกอบ 4.62 แสดงค่าการชาร์จประจุของอุปกรณ์ TENG ในพื้นรองเท้า.....	110
ภาพประกอบ 4.63 แสดงภาพการทดลองหาตำแหน่งของ GPS.....	111

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 อนุกรมไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series).....	11
ตาราง 2 แสดงแสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ PDMS pure.....	16
ตาราง 3 แสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ PDMS ที่ถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก.....	21
ตาราง 4 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของธาตุหายากในกลุ่มออกไซด์.....	23
ตาราง 5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	37
ตาราง 6 PDMS/Rare Earth Oxide composites.....	42
ตาราง 7 PDMS/Rare Earth Perovskite Oxide composites.....	43
ตาราง 8 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย La_2O_3	54
ตาราง 9 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Sm_2O_3	55
ตาราง 10 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Nd_2O_3	56
ตาราง 11 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย LaFeO_3	58
ตาราง 12 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย SmFeO_3	59
ตาราง 13 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย NdFeO_3	60
ตาราง 14 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแผ่นฟิล์ม PDMS pure.....	62
ตาราง 15 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบ La_2O_3 , Sm_2O_3 และ Nd_2O_3	65
ตาราง 16 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบ LaFeO_3 , SmFeO_3 และ NdFeO_3	68
ตาราง 17 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ของ PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 2.5 % wt.....	82
ตาราง 18 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ของ PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 10 % wt.....	82
ตาราง 19 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของ PDMS ที่เติมด้วยแลนทานัมเฟอร์ไรต์ (LaFeO_3)....	104

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ (portable and wearable electronics) มีอัตราการเติบโตสูงและได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก เพื่อตอบสนองต่อความสะดวกสบายในการใช้ชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานอันเกี่ยวเนื่องกับ Internet of Thing (IoT) ซึ่งการเติบโตในอุตสาหกรรมดังกล่าวส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กในกลุ่มอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น น้ำ ลม และแรงกล ให้เป็นกระแสไฟฟ้านั้นได้รับการพัฒนาตามมาเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทดแทนแบตเตอรี่ ที่มีข้อจำกัดด้านอายุการใช้งาน อัตราประจุซ้ำ และความเป็นพิษของสารประกอบในแบตเตอรี่ที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเมื่อหมดอายุการใช้งาน โดยหนึ่งในอุปกรณ์ที่น่าสนใจ คือ อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator : TENG)

อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก หรือ TENG เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กประสิทธิภาพสูง ที่สามารถเปลี่ยนแรงกลจากการเสียดสีหรือการสัมผัสกันของวัสดุ 2 ชนิดที่มีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าผ่านพื้นผิวและเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในท้ายที่สุด ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ TENG นั้นเพียงพอต่อการเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กได้ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการจัดกลุ่มวัสดุที่สามารถนำมาใช้งานในอุปกรณ์ TENG ตามความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนไว้เป็นพื้นฐาน เรียกว่า Triboelectric Series [1] ซึ่งพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนสูงในตาราง โดยงานวิจัยปี 2020 มีการใช้ PDMS เป็นชั้นสัมผัสใน TENG และทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า พบว่ามีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) 30.93 V และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) $0.127 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [2] งานวิจัยนี้จึงสนใจนำ PDMS มาเป็นวัสดุฐานในการสร้างชั้นไทรโบอิเล็กทริก แต่อย่างไรก็ตามการใช้พอลิเมอร์บริสุทธิ์สำหรับอุปกรณ์ TENG ยังคงให้ค่าการส่งออกกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก ไม่เพียงพอต่อการใช้งานเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เสถียรได้ งานวิจัยที่ผ่านมาจึงพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของวัสดุพอลิเมอร์ด้วยการทำคอมโพสิต โดยการใส่เฟสกระจาย ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าที่สามารถเกิดประจุไฟฟ้าได้ เช่น ไดอิเล็กทริก (dielectric), เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) และ เฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) [1, 3-4] ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยหนึ่งในเฟสกระจายที่มีประสิทธิภาพสูงคือ วัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้ภายใต้สนามไฟฟ้าและสามารถกักเก็บประจุได้ โดยในปี 2018 Hyun-Woo Park และคณะ ได้ทำการศึกษาการนำวัสดุไดอิเล็กทริกไทเทเนียมไดออกไซด์

(TiO₂) เติมนลงใน PDMS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งออกกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ซึ่งจากการศึกษาพบว่า PDMS ที่ถูกเติมด้วย TiO₂ มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) 180 V ค่ากระแสไฟฟ้า (Current) 8.15 μ A และค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) 1.84 W/m² แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่มากขึ้น [5] และในปีเดียวกัน Shin Jang และ Je Hoon Oh ได้ทำการศึกษานำวัสดุไดอิเล็กทริกแบบเรียบไททานेट (BaTiO₃) เติมนลงใน PDMS เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของ TENG ซึ่งจากการศึกษาพบว่า PDMS ที่ถูกเติมด้วย BaTiO₃ มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก 680 V ค่ากระแสไฟฟ้า 17 μ A และค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 1.184 W/m² แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่มากขึ้นกว่าการใช้ PDMS บริสุทธิ์ [6] เช่นกัน แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคของวัสดุที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก หรือวัสดุไดอิเล็กทริกสามารถเพิ่มความหนาแน่นของประจุให้กับพอลิเมอร์ได้ โดยพบว่าการทำเป็นวัสดุคอมโพสิตในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีค่าความสามารถในการส่งออกกระแสไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และจากงานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่าประสิทธิภาพในการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ยังขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุอีกด้วย ดังนั้นการเลือกวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงจึงเป็นแนวทางหลักที่ช่วยให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพความหนาแน่นประจุของพอลิเมอร์ เพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ได้ งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจไปที่วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกโดยทั่วไป คือ วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอล (colossal dielectric materials) ที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ที่สูง ($>10^3$) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ที่ต่ำ [7] ซึ่งวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ส่วนใหญ่แล้วเป็นกลุ่มของสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนที่มีโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite) เช่น RFeO₃ (เมื่อ R คือไอออนที่มีประจุ +2 หรือ +3) เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการมีธาตุหายาก เช่น แลนทานัม (Lanthanum : La), เพรซีโอดิเมียม (Praseodymium : Pr) และ ซัมมาเรียม (Samarium : Sm) เป็นองค์ประกอบ ช่วยเพิ่มค่าไดอิเล็กทริกในออกไซด์เชิงซ้อน RFeO₃ มากกว่า 10^4 [8, 9] ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์เพื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ TENG ยังไม่มีการรายงานและการศึกษามาก่อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาอุปกรณ์ TENG โดยใช้พอลิเมอร์ชนิด PDMS เป็นวัสดุฐาน และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ด้วยการทำเป็นวัสดุคอมโพสิตกับวัสดุไดอิเล็กทริกและวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนที่โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ เพื่อปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้สูงขึ้น อันนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ในท้ายที่สุด โดยจะทำการศึกษาคำเตรียมวัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์ R₂O₃ และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ RFeO₃ เมื่อ R คือ แลนทานัม (Lanthanum: La), ซัมมาเรียม (Samarium: Sm) และ นีโอดีเมียม (Neodymium: Nd) ตลอดจนศึกษาผลของปริมาณการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนเพอร์อฟสไกต์ ที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กทริก

ริก และค่าการส่งออกทางไฟฟ้า อันประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กำลังไฟฟ้าขาออก ตามลำดับ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาการสังเคราะห์วัสดุกลุ่มออกไซด์ไดอิเล็กทริกและวัสดุออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ
- เพื่อศึกษาการขึ้นรูปคอมโพสิตระหว่าง PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกและ PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอล
- เพื่อสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบไดอิเล็กทริกที่มีชั้นสัมผัสเป็นวัสดุคอมโพสิต PDMS ที่เติมวัสดุไดอิเล็กทริก และ PDMS ที่เติมวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอล
- เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของวัสดุไดอิเล็กทริกและวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิต
- เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของวัสดุไดอิเล็กทริกและวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีผลต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ TENG

3. ขอบเขตของงานวิจัย

- สังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ที่มีสูตรโมเลกุล คือ R_2O_3 และสังเคราะห์วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ในกลุ่ม $RFeO_3$ โดยที่ R คือ La, Sm และ Nd
- ขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม PDMS และ PDMS Composite โดยการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลกลุ่มออกไซด์และออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ที่อัตราส่วน 0.5 % wt, 2.5 % wt, 5 %wt และ 10 % wt ลงใน PDMS
- สร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบไดอิเล็กทริกรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก
- ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite
- ตรวจสอบค่าการส่งออกของอุปกรณ์ TENG ได้แก่ ค่าศักย์ไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้สารประกอบออกไซด์ไดอิเล็กทริกและสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ
- ได้แผ่นฟิล์มคอมโพสิต PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกและแผ่นฟิล์ม PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอล
- ได้อุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กโทรโบไดอิเล็กทริกแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก

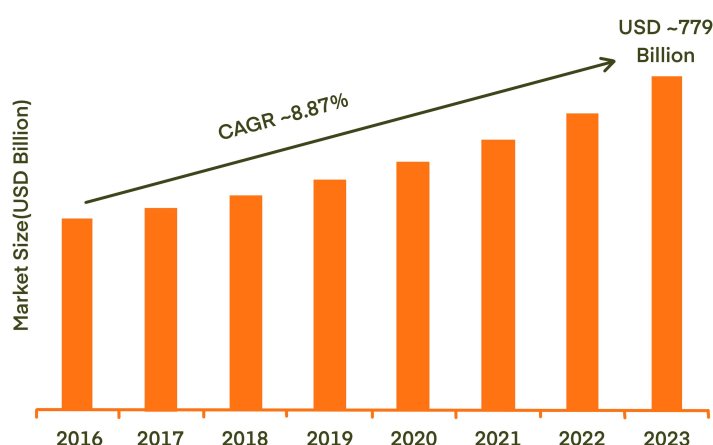
- ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของวัสดุไดอิเล็กทริกและวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลอซอลที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก รวมถึงปริมาณที่เหมาะสมที่แสดงค่าสมบัติไดอิเล็กทริกสูงที่สุด
- ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของวัสดุไดอิเล็กทริกและวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลอซอลที่มีผลต่อค่าการส่งออกจากไฟฟ้า และทราบปริมาณที่ดีที่สุดที่ส่งผลให้ TENG แสดงค่าประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ ค่าศักย์ไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทบทวนวรรณกรรม

1. อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ (Portable and Wearable electronic)

อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ (Portable and Wearable electronic) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ ซึ่งเมื่อนำอุปกรณ์สวมใส่ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย อุปกรณ์จะทำการเก็บข้อมูลและนำไปประมวลผลต่อ โดยในปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้มีอัตราการเติบโตสูงและได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องไปจนถึงปี 2023 [10] แสดงดังภาพประกอบ 2.1 อันเนื่องมาจากการใช้ชีวิตของคนในปัจจุบันมีความต้องการในการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้มากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการทางด้านการดำเนินชีวิต เพื่อนำไปใช้ทางด้านการแพทย์ เพื่ออำนวยความสะดวกต่อการพกพามากยิ่งขึ้น และนอกจากนี้การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ยังสามารถเป็นแฟชั่นของมนุษย์ในชีวิตประจำวันได้อีกด้วย [11] จึงได้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานอันเกี่ยวเนื่องกับ Internet of Thing (IoT) ซึ่งการเติบโตในอุตสาหกรรมดังกล่าวส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กชนิดหนึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ตามมา คือ กลุ่มอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) ซึ่งสามารถเป็นตัวเก็บเกี่ยวพลังงานหรือตัวผลิตพลังงานขนาดเล็กที่สามารถเปลี่ยนพลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

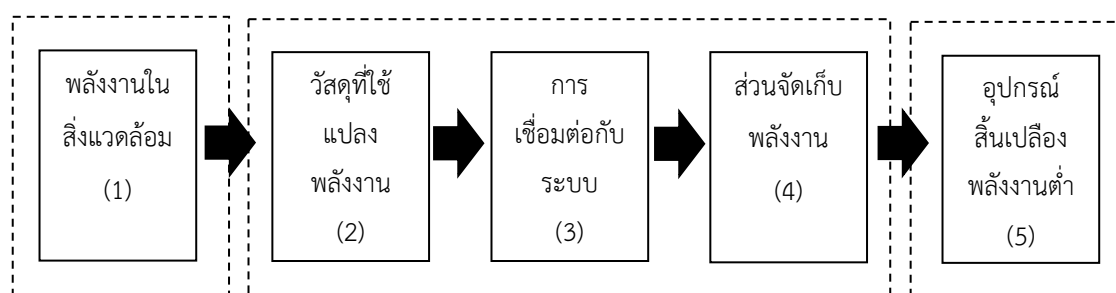


ภาพประกอบ 2.1 กราฟแสดงการเติบโตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ [10]

ที่มา: <https://marketersmedia.com/power-electronics-market-2019-global-industry-analysis-by-size-share-growth-factors-competitive-landscape-with-regional-forecast-to-2023/467241>

2. อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน หรือการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting)

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานหรือการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) คือ การรวบรวมพลังงานแวดล้อมจากแหล่งต่าง ๆ และนำพลังงานที่ได้เหล่านั้นมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถนำไปจัดเก็บหรือป้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กต่าง ๆ ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าตั้งแต่นาฬิกาพกไปจนถึงหลายร้อยมิลลิวัตต์ได้ ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนจากพลังงานหมุนเวียนอย่าง พลังงานน้ำ พลังงานลม หรือพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนจากพลังงานกลที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยองค์ประกอบหลักของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานมี 5 องค์ประกอบ แสดงดังภาพประกอบ 2.2



ภาพประกอบ 2.2 องค์ประกอบหลักของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน [12]

องค์ประกอบที่ 1 พลังงานแวดล้อมที่ต้องการเก็บเกี่ยว

องค์ประกอบที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้แปลงพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง โดยแปลงจากพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้เป็นพลังงานไฟฟ้า

องค์ประกอบที่ 3 การเชื่อมต่อระหว่างวัสดุและการเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกของอุปกรณ์

องค์ประกอบที่ 4 ส่วนจัดเก็บพลังงานที่แปลงได้ เช่น ตัวเก็บประจุแบบเตอรี เป็นต้น

องค์ประกอบที่ 5 ความต้านทานภายนอก เช่น อุปกรณ์พกพา อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ไร้สาย

ซึ่งการเก็บเกี่ยวพลังงานจัดเป็นอีกช่องทางหนึ่งสำหรับพลังงานทดแทนในอนาคต [13] โดยในปัจจุบันการเก็บเกี่ยวพลังงานมีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เนื่องจากไม่ต้องอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ ที่มีข้อจำกัดด้านอายุการใช้งาน การอัดประจุซ้ำ และความเป็นพิษของสารประกอบในแบตเตอรี่ที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเมื่อหมดอายุการใช้งาน แต่ในอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่เก็บเกี่ยวจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนต่าง ๆ ยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเหล่านั้นได้ตลอดเวลา การใช้พลังงานกลที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ตลอดจึง

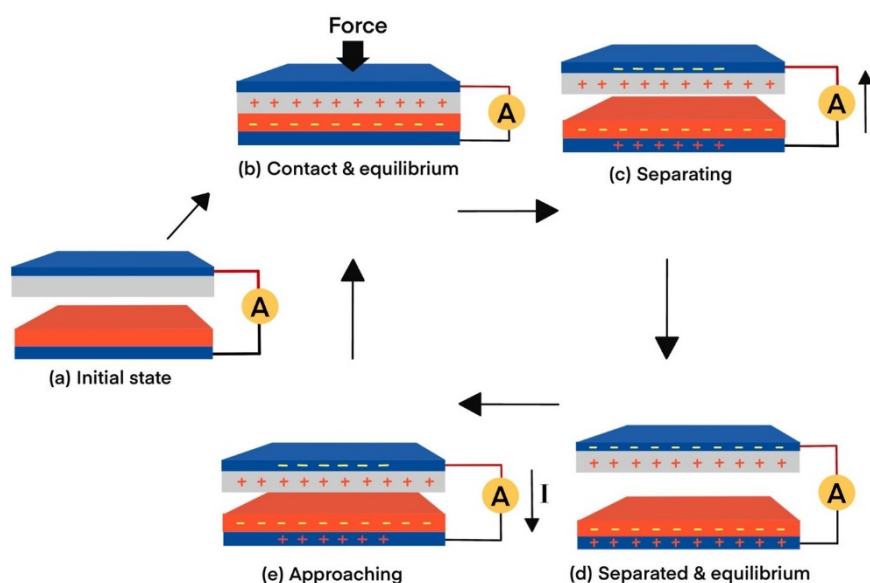
เป็นที่น่าสนใจ โดยหนึ่งในอุปกรณ์การเก็บเกี่ยวพลังงานที่น่าสนใจ คือ อุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator)

3. อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator)

อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator หรือ TENG) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ขนาดเล็กประสิทธิภาพสูง โดยจะประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด ที่มีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันมาสัมผัสหรือเสียดสี เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งในการสร้างอุปกรณ์ TENG สามารถใช้วัสดุได้หลากหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ และในปัจจุบัน TENG ยังถูกนำมาใช้งานร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือแบตเตอรี่ ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานกลที่เก็บเกี่ยวได้ในชีวิตประจำวันไปใช้เป็นพลังงานขับเคลื่อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถจำแนกการทำงานของอุปกรณ์จากการสัมผัสของวัสดุได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้ [14, 15]

3.1 ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-separation mode)

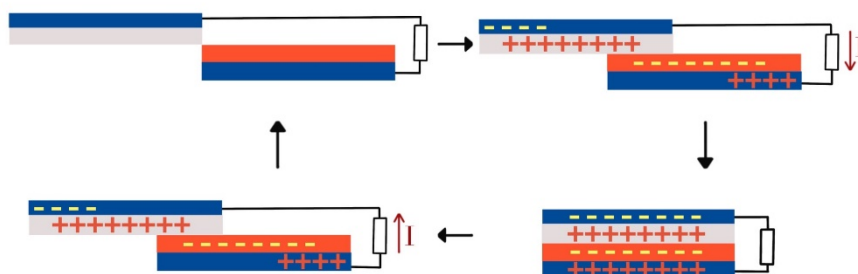
การสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-separation mode) มีหลักการเริ่มจากการนำวัสดุไทรโบอิเล็กทริกที่ต่างกัน 2 ชนิด มาจับคู่สัมผัสกันแต่ยังไม่มีแรงกดเชิงกล ในกรณีนี้จะไม่มีการเสียดสีไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากวัสดุทั้ง 2 ชนิดไม่สัมผัสกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3 (a) และเมื่อให้แรงกดเชิงกลลงมาที่วัสดุส่วนบน จนวัสดุทั้ง 2 ชนิดสัมผัสกัน จะเกิดประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวเกิดขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุทั้ง 2 แตกต่างกัน แต่ในกรณีนี้ยังไม่มีเกิดการเสียดสีไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากประจุไฟฟ้ายังไม่ถูกถ่ายโอนและถูกกักเก็บไว้อยู่ที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุเท่านั้น แสดงในภาพประกอบ 2.3 (b) และเมื่อนำแรงกดเชิงกลออก วัสดุทั้ง 2 ชนิดจะถูกแยกออกจากกัน ทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีประจุคงค้างอยู่บนพื้นผิว จึงทำให้แต่ละวัสดุไม่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งในทางธรรมชาติแล้ว วัสดุจะพยายามทำให้วัสดุมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า จึงเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีขั้วตรงข้ามเข้ามาที่อิเล็กโทรด ผ่านโหลดไฟฟ้าภายนอก ซึ่งในกรณีนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 2.3 (c) อย่างไรก็ตาม ค่ากระแสไฟฟ้าของวัสดุจะสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ ตามระยะห่างของวัสดุที่แยกออกจากกัน แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะสูงขึ้นจนถึงเพียงจุด ๆ หนึ่งเท่านั้น เรียกว่า จุดอิ่มตัว ซึ่งคือจุดที่วัสดุเกิดการเท่ากันของประจุ จนเกิดความเป็นกลางทางไฟฟ้าของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ดังภาพประกอบ 2.3 (d) และเมื่อให้แรงกดเชิงกลอีกครั้ง วัสดุทั้ง 2 ชนิดจะสัมผัสกัน ในกรณีนี้ประจุเหนี่ยวนำที่สะสมอยู่ที่ขั้วอิเล็กโทรด จะถูกเหนี่ยวนำให้วิ่งกลับลงไปที่ตำแหน่งเดิม ทำให้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยน



ภาพประกอบ 2.3 ประเภทการสัมผัสแบบต้งฉาก (Contact-separation mode)

3.2 ประเภทการสัมผัสแบบเลื่อน (Lateral-sliding mode)

การสัมผัสแบบเลื่อน (Lateral-sliding mode) มีหลักการเกิดจากวัสดุ 2 ชนิดเสียดสีกัน ที่มีการต่อขั้วอิเล็กโทรดที่บริเวณพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุ 2 ชนิดที่วางขนานกันคล้ายกับการสัมผัสแบบต้งฉาก แต่มีหลักการที่แตกต่างกันในเรื่องของการให้แรงเชิงกลกับวัสดุ ซึ่งการสัมผัสแบบเลื่อนจะให้แรงเชิงกลไปในลักษณะการสัมผัสแบบเลื่อนในแนวนอน และเกิดการเสียดสีกันของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวและเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีขั้วตรงข้ามเข้ามาที่อิเล็กโทรด ผ่านโหลดไฟฟ้าภายนอก โดยประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ตามทิศทางการเลื่อนของวัสดุ และเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น [15] แสดงดังภาพประกอบ 2.4

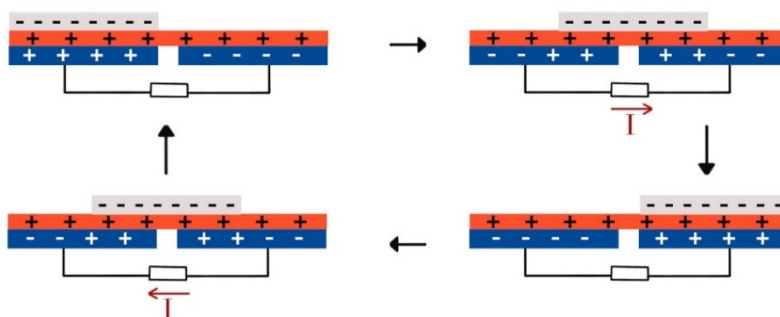


ภาพประกอบ 2.4 ประเภทการสัมผัสแบบเลื่อน (Lateral-sliding mode) [16]

ที่มา: Karan Sumanta Kumar. (2020). Advanced Functional Materials

3.3 ประเภทการสัมผัสแบบอิสระ (Freestanding layer mode)

การสัมผัสแบบอิสระ (Freestanding layer mode) ประกอบด้วยการนำวัสดุ 2 ชนิด ที่มีการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และมีการใช้วัสดุทั้งหมด 3 ชั้น โดยมีหลักการทำงานเริ่มจากการวางวัสดุฐานที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน 2 ชั้นวางอยู่ข้างกัน ซึ่งวัสดุฐานทั้งสองจะมีการต่อขั้วอิเล็กโทรดที่วัสดุ โดยวัสดุทั้งสองจะมีอิเล็กโทรดที่ไม่เชื่อมต่อกัน เพื่อให้สามารถเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าระหว่างกันได้ และอีกหนึ่งชั้นจะเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งจะวางอยู่ด้านบนของวัสดุฐาน โดยเมื่อให้แรงเชิงกลไปในลักษณะของการเลื่อนไปตามแนวนอนหรือการให้แรงเหวี่ยง วัสดุชั้นด้านบนจะเกิดการเลื่อนผ่านวัสดุฐานชั้นแรกไปยังวัสดุฐานชั้นที่สองและเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด จากนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีขั้วตรงข้ามเข้ามาที่อิเล็กโทรด ผ่านโหนดไฟฟ้าภายนอก และเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 2.5 ซึ่งประเภทการสัมผัสแบบอิสระเป็นประเภทที่มีประสิทธิภาพในการเกิดพลังงานสูงที่สุด [14]

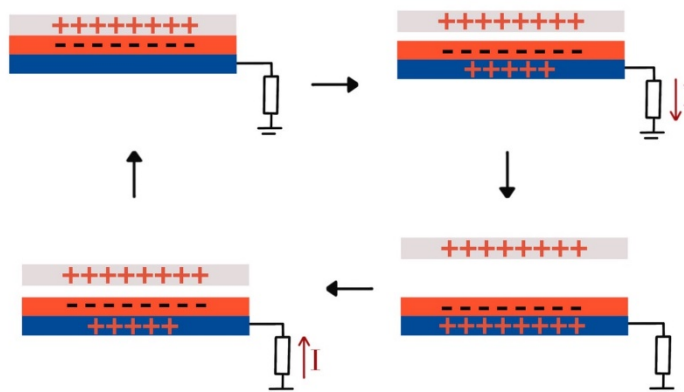


ภาพประกอบ 2.5 ประเภทการสัมผัสแบบอิสระ (Freestanding layer mode) [16]

ที่มา: Karan Sumanta Kumar. (2020). Advanced Functional Materials

3.4 ประเภทการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode mode)

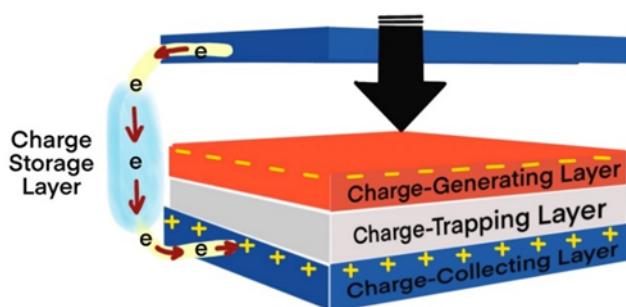
การสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode mode) ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด โดยวัสดุชนิดหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และอีกชนิดหนึ่งจะต่อเข้ากับขั้วอิเล็กโทรดเพียงข้างเดียวที่บนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งเมื่อวัสดุทั้ง 2 ชนิดเกิดการสัมผัสกัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนกันของประจุไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวและเกิดการเหนี่ยวนำประจุทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีขั้วตรงข้ามเข้ามาที่อิเล็กโทรด ผ่านโหนดไฟฟ้าภายนอก และเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 2.6 โดยประเภทการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนไหวและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ



ภาพประกอบ 2.6 ประเภทการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode mode) [16]
ที่มา: Karan Sumanta Kumar. (2020). Advanced Functional Materials

4. ส่วนประกอบของไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric component)

โดยส่วนประกอบของอุปกรณ์ TENG จะประกอบไปด้วยชั้น 3 ชั้น คือ ชั้น charge-generating layer ชั้น charge-trapping layer และชั้น charge-collecting layer ซึ่งแต่ละชั้นทำหน้าที่ดังนี้ ชั้น charge-generating layer ทำหน้าที่เป็นชั้นที่สัมผัสกับอีกวัสดุหนึ่ง ชั้นตรงกลางเป็นชั้น charge-trapping layer ทำหน้าที่ป้องกันการดึงดูดกันเองของประจุบวกและประจุลบ และชั้นของ charge-collecting layer ทำหน้าที่ในการพาประจุ แสดงดังภาพประกอบ 2.7



ภาพประกอบ 2.7 ส่วนประกอบของไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerators) [17]
ที่มา: Kim Dong Wook. (2020). NPG Asia Materials

ซึ่งในการสร้างอุปกรณ์ TENG การเลือกวัสดุถือเป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะทำให้ TENG มีประสิทธิภาพสูงหรือต่ำได้ จึงได้มีงานวิจัยที่ได้พยายามเรียงเรียงความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนนำมาสร้างเป็นอนุกรมไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series) เพื่อจำกัดความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนต่าง ๆ และแบ่งให้เห็นว่าวัสดุใดเหมาะที่จะเป็นชั้นบวกหรือชั้นลบ

5. อนุกรมไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series)

อนุกรมไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series) เป็นรายการที่จัดลำดับวัสดุตามแนวโน้มที่จะได้รับหรือสูญเสียอิเล็กตรอนในกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุสองชิ้นมาสัมผัสกันและแยกออกจากกัน เรียกว่า การสร้างพลังงานภายในไทรโบอิเล็กทริก โดยระหว่างกระบวนการดังกล่าว วัสดุหนึ่งจะได้รับอิเล็กตรอนเสมอจนกลายเป็นประจุลบ และอีกวัสดุหนึ่งจะสูญเสียอิเล็กตรอนจนกลายเป็นประจุบวก ซึ่งตำแหน่งสัมพัทธ์ของวัสดุทั้งสองในอนุกรมไทรโบอิเล็กทริกจะกำหนดว่าวัสดุใดได้รับอิเล็กตรอนและวัสดุใดสูญเสียอิเล็กตรอน [18]

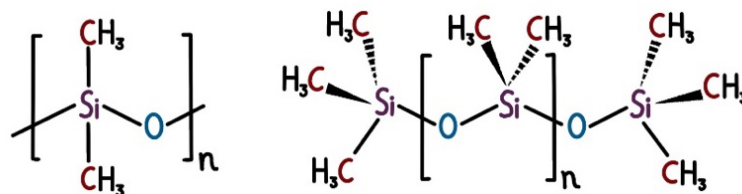
โดยส่วนใหญ่วัสดุที่ถูกนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ TENG จะเป็นวัสดุยืดหยุ่นที่อยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ เนื่องจากมีความสามารถในการยืดหยุ่นสูง บาง น้ำหนักเบา และพกพาง่าย จึงเหมาะจะใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุที่น่าสนใจ คือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) ที่มีประสิทธิภาพในการรับอิเล็กตรอนสูง แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 อนุกรมไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series) [19]

	Glass	Poly(methyl methacrylate) (PMMA)
	Mica	Copper
	Polyamide (Nylon 6,6)	Silver
	Wool	Gold
	Fur	Poly(ethylene terephthalate) (Mylar)
	Silk	Natural rubber
	Aluminum	Polyacrylonitrile (PAN)
	Poly(vinyl alcohol) (PVA)	Poly(vinylidene chloride) (Saran)
	Poly(vinyl acetate) (PVAc)	Polystyrene (PS)
	Paper	Polyethylene (PE)
	Cotton	Polypropylene (PP)
	Steel	Poly(vinyl chloride) (PVC)
	Wood	Polydimethylsiloxane (PDMS)
	Amber	Polytetrafluoroethylene (Teflon, PTFE)
		

6. พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS)

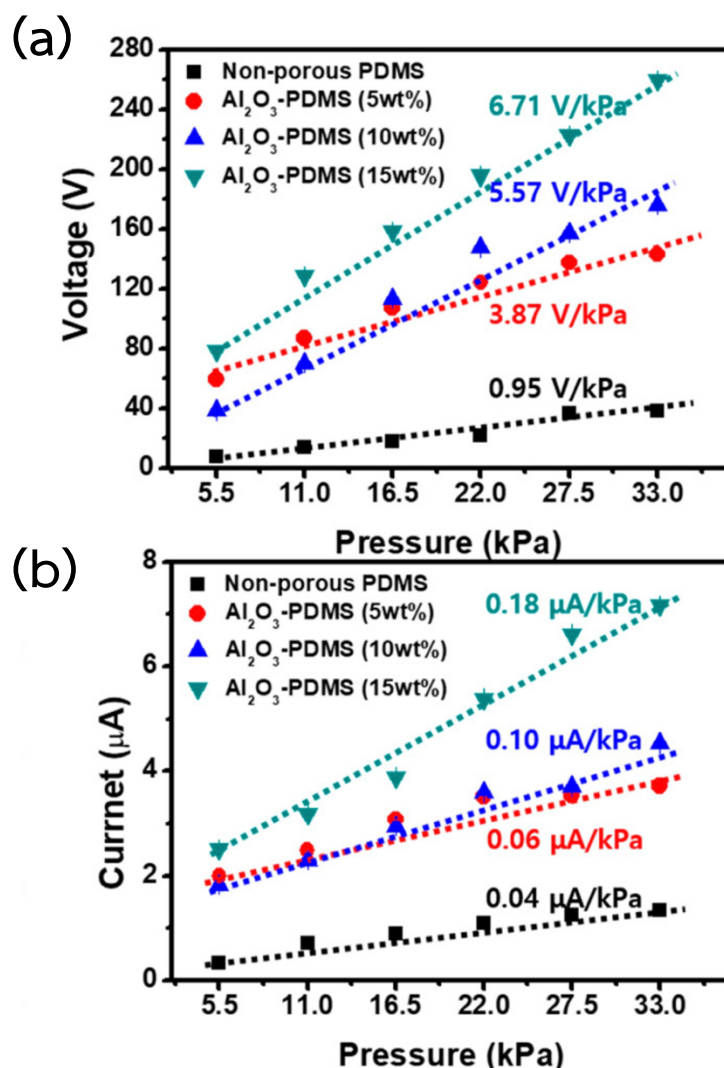
พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มของสารประกอบพอลิเมอร์ออร์แกโนซิลิกอน (Organosilicon) หรือที่เรียกว่า ซิลิโคน (Silicone) โดยประกอบด้วยไดเมทิลซิลิโคนออกไซด์เป็นหน่วยมอโนเมอร์ ประกอบด้วยธาตุ 4 ชนิด คือ ซิลิกอน (Si) ออกซิเจน (O) ไฮโดรเจน (H) และคาร์บอน (C) มีสูตรโมเลกุล คือ C_2H_6OSi แสดงดังภาพประกอบ 2.8



ภาพประกอบ 2.8 โครงสร้างพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS)

ซึ่ง PDMS มีลักษณะเป็นน้ำมันที่มีความข้นหนืด โดยในช่วงที่มีการไหลนานหรืออุณหภูมิสูง จะอยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืด และในช่วงเวลาการไหลสั้นหรืออุณหภูมิต่ำ จะอยู่ในรูปของแข็งยืดหยุ่น คล้ายกับยาง (Viscoelasticity) ซึ่งโดยรวมมีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำทำให้ PDMS สามารถเปลี่ยนรูปและปรับแต่งได้ง่าย นอกจากนี้ PDMS ยังมีความโปร่งแสง ไม่ละลายในน้ำ ไม่ติดไฟ และไม่มีความเป็นพิษ รวมถึงมีงานวิจัยที่ได้มีการใช้ PDMS เป็นชั้นสัมผัสใน TENG ซึ่งพบว่า PDMS เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพที่จะนำมาทำเป็นอุปกรณ์ TENG ได้ จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ PDMS เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

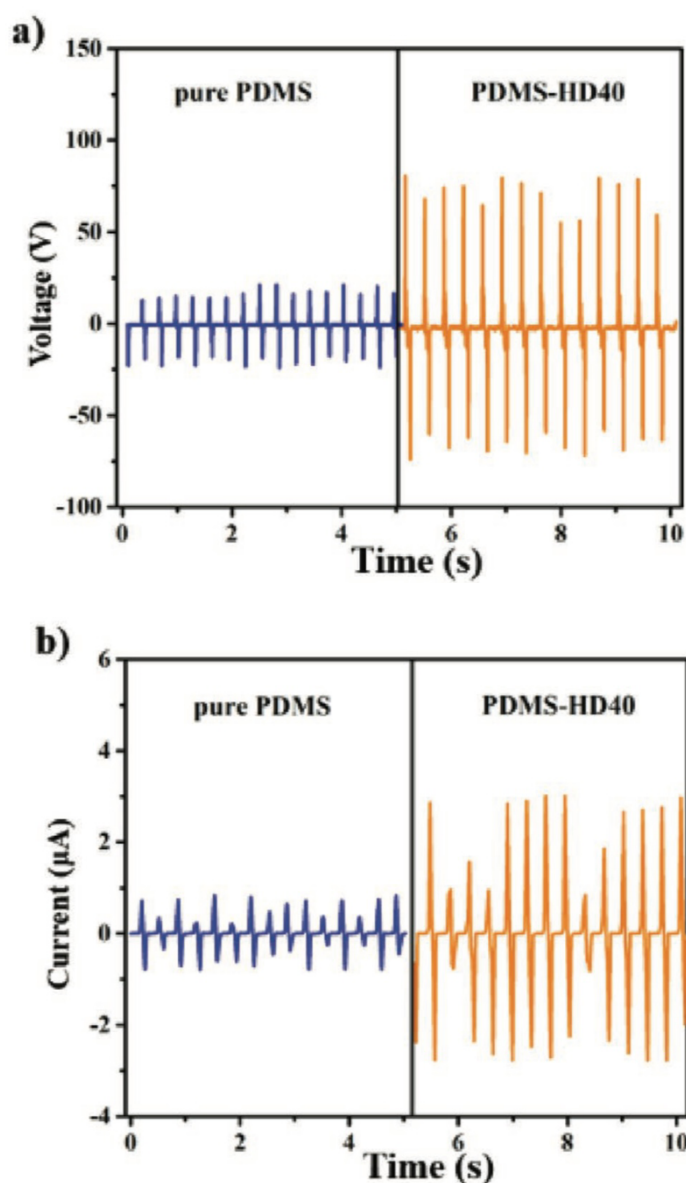
โดยในปี 2018 Hee Jae Hwang และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เปลี่ยนรูปได้สูงแบบมีโซพอร์ส (Mesoporous) สำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (TENG) แบบไม่มีช่องว่าง ผ่านกระบวนการออกซิเดชันของโลหะในขั้นตอนเดียว โดยใช้ PDMS เป็นชั้นสัมผัสใน TENG และทำการทดสอบค่าการส่งออกจากไฟฟ้า ซึ่งพบว่า PDMS บริสุทธิ์ มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) 39 V และมีค่ากระแสไฟฟ้า (Current) 1.2 μA แสดงดังภาพประกอบ 2.9



ภาพประกอบ 2.9 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และ (b) แสดงค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ของ PDMS [20]

ที่มา: Hwang Hee J. (2018). Micromachines

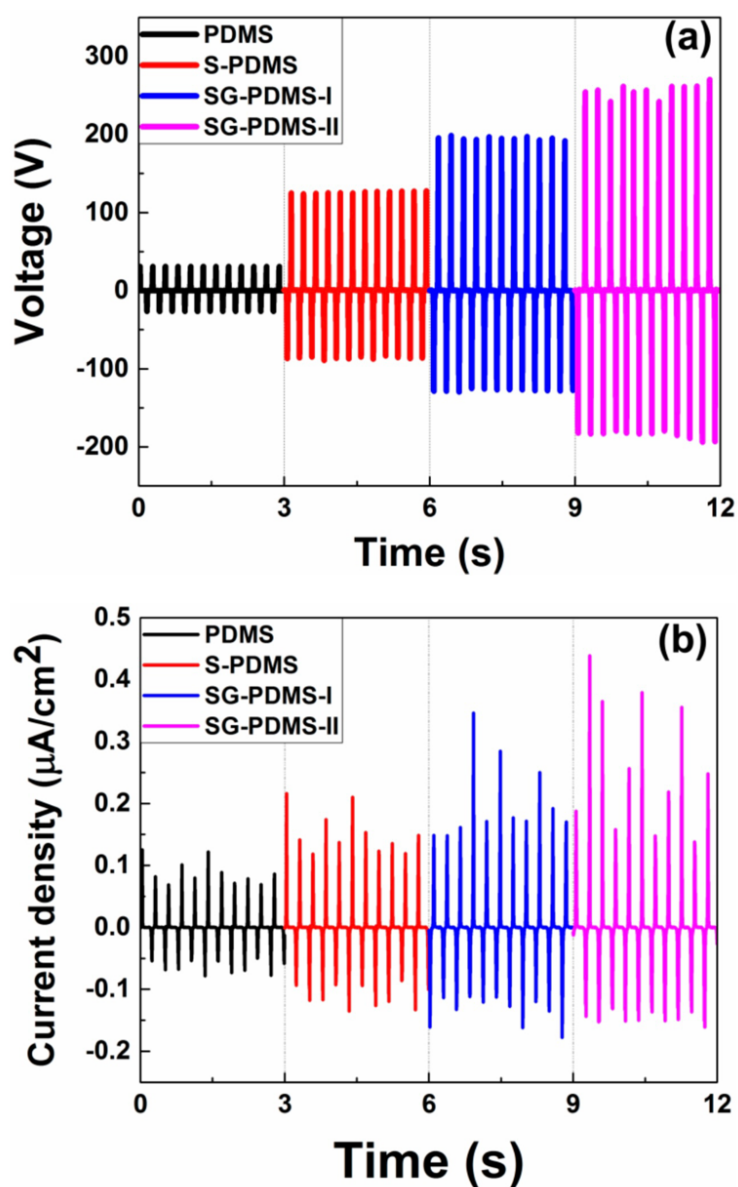
และต่อมาในปี 2020 Jing Titao และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของวัสดุในอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) ที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของ TENG เพื่อการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ยั่งยืน โดยในงานได้มีการใช้วัสดุพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และทำการทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ซึ่งพบว่า PDMS บริสุทธิ์มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) 24 V และมีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 0.83 μ A แสดงดังภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.10 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และ (b) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของ PDMS [21]

ที่มา: Jing Titao. (2020). Macromolecular Materials and Engineering

และในปีเดียวกัน Habtamu Gebeyehu Menge และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TEG) โดยการดัดแปลงพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และทำการทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ซึ่งพบว่า PDMS บริสุทธิ์ มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) 30.93 V และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) $0.127 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงดังภาพประกอบ 2.11



ภาพประกอบ 2.11 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และ (b) แสดงค่าความแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ของ PDMS [2]
 ที่มา: Menge Habtamu G. (2020). Materials

ซึ่งนอกจากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วยังได้มีงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ PDMS บริสุทธิ์ในการสร้างอุปกรณ์ TENG และทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า แสดงค่าดังตาราง 2

ตาราง 2 แสดงแสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ PDMS pure

PDMS pure	วัสดุที่ใช้ประกบ	ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage)	กระแสไฟฟ้า (Current)	ที่มา
1.	Aluminum	9 V	0.8 μ A	[22]
2.	Aluminum plate	3.6 V	0.012 μ A/cm ²	[23]
3.	Aluminum foil	35 V	0.28 μ A	[24]
4.	Copper	33 V	0.13 μ A	[25]
5.	Copper	22.5 V	0.65 μ A	[26]
6.	Aluminum plate	39 V	1 μ A	[27]
7.	Aluminum	18 V	0.7 μ A	[28]
8.	Aluminum	16 V	0.45 μ A	[28]

โดยจากงานวิจัยที่ยกมาข้างต้น พบว่า PDMS pure แม้จะเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพที่จะนำมาทำเป็นอุปกรณ์ TENG ได้ แต่ยังคงให้ค่าการส่งออกกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก ไม่เพียงพอต่อการใช้งานเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เสถียรได้ จึงมีนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของวัสดุ PDMS ด้วยการทำคอมโพสิต โดยการใส่เฟสกระจายเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างประจุ ซึ่งหนึ่งในเฟสกระจายที่นิยมใช้ คือ วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric)

7. วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric)

วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric) คือ วัสดุที่มีความสามารถในการเกิดโพลาไรเซชันภายใต้สนามไฟฟ้า หรือเกิดขั้วได้มากจึงเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ไม่ดี เมื่อวัสดุถูกวางในสนามไฟฟ้าจึงแทบจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในไดอิเล็กทริก เนื่องจากไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่ลอยผ่านวัสดุซึ่งต่างจากวัสดุโลหะ แต่วัสดุไดอิเล็กทริกจะมีการแยกขั้วไฟฟ้า (Electric polarization) แทน ซึ่งประจุบวกในไดอิเล็กทริกจะถูกแทนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า และประจุลบจะถูกแทนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า โดยการแยกประจุจะช่วยลดการเกิดสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กทริก [29]

โดยประสิทธิภาพของวัสดุไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, ϵ) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ และสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากดังสมการนี้

$$\epsilon_r = (t_m \times C_p) / (A \times \epsilon_0) \quad (1)$$

โดยที่

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ (Dielectric constant)

C_p คือ ค่าความจุทางไฟฟ้าของวัสดุ (Guarded electrode's surface area)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ (8.85×10^{-12} F/m เช่น Farad ต่อเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าของอิเล็กโทรดในการวัด

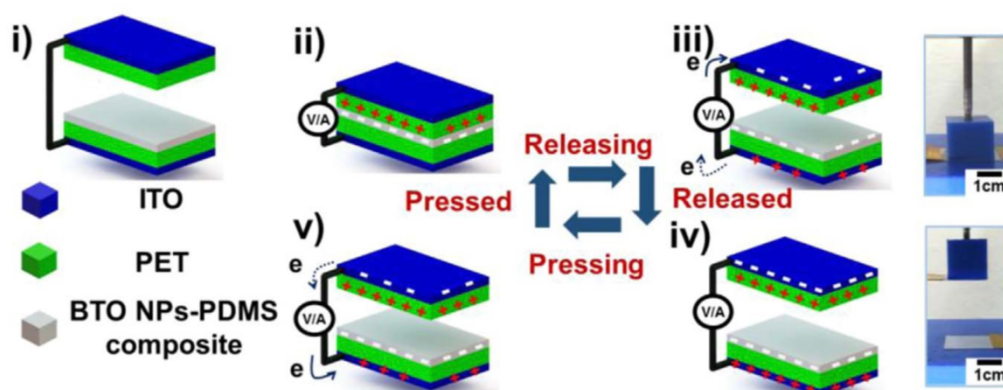
t_m คือ ความหนาของวัสดุ (Average thickness)

โดยในปี 2016 Yang Hyeog Kwon และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวสัมผัสแบบไทรโบอิเล็กทริกและการเหนี่ยวนำประจุเพียโซอิเล็กทริก โดยใช้ฟิล์มบางแบบโพลาริซคอมโพสิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริก (TEG) โดยการเติมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BTO NPs) ที่มีคุณสมบัติการยอมให้มีการร้าวซึมสูงและคุณสมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectrics) ลงในพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) แสดงดังภาพประกอบ 2.12 เพื่อใช้เป็นชั้นสัมผัสในอุปกรณ์ TENG แสดงดังภาพประกอบ 2.13



ภาพประกอบ 2.12 การแสดงแผนผังกระบวนการผลิตฟิล์มบางคอมโพสิต BTO NPs-PDMS [30]

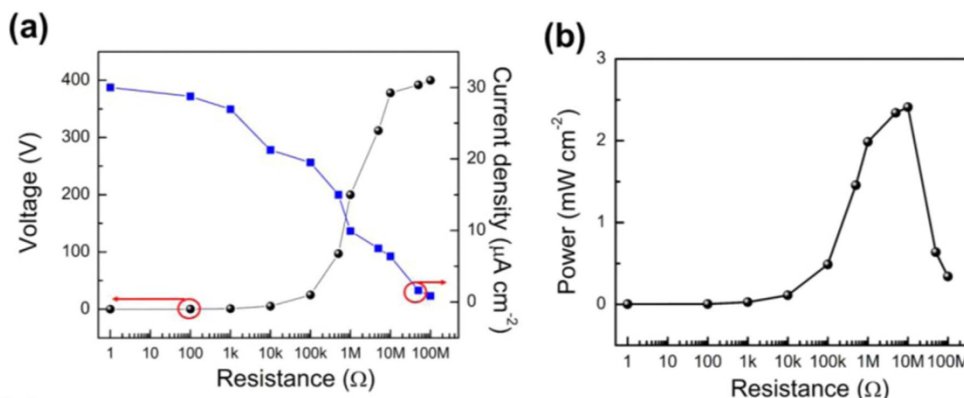
ที่มา: Kwon, Yang Hyeog. (2016). Nano Energy



ภาพประกอบ 2.13 แผนภาพแสดงกลไกการผลิตกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ PDMS-based TENG [30]

ที่มา: Kwon Yang Hyeog. (2016). Nano Energy

และทำการทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ซึ่งจากทดสอบพบว่า PDMS ที่ถูกเติมด้วย BTO NPs มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุด (Output voltage) 380 V ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Current density) $30 \mu\text{A}/\text{m}^2$ และค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Power density) $2.5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ แสดงดังภาพประกอบ 2.14

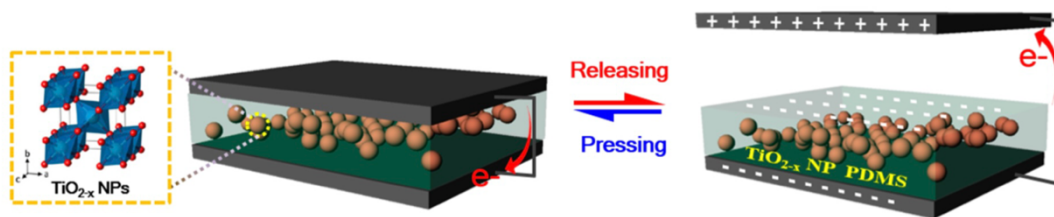


ภาพประกอบ 2.14 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current) ของ TENG และ (b) แสดงค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) [30]

ที่มา: Kwon Yang Hyeog. (2016). Nano Energy

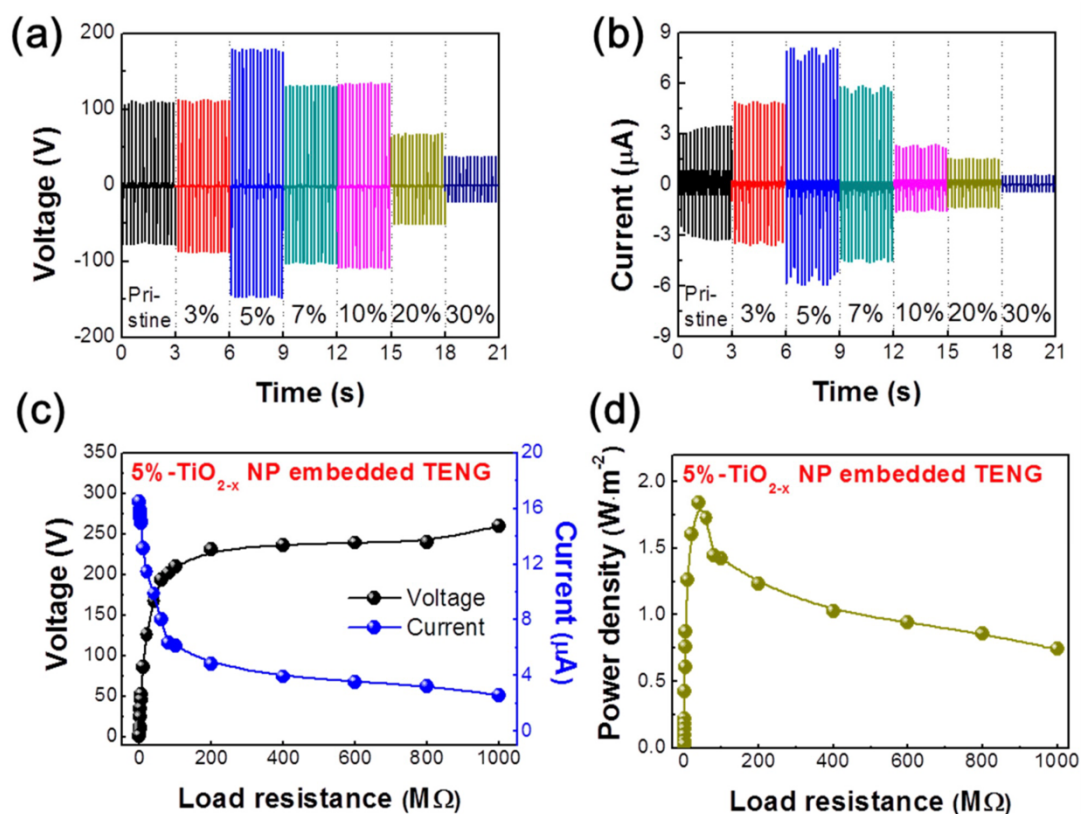
โดยผลลัพธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นขาออกสูงสุดของ TENG เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนลูกบาศก์ BTO NP % wt ในชั้นคอมโพสิต รวมถึงการปรับความหนาแน่นประจุของพื้นผิวสัมผัสและการเหนี่ยวนำประจุเพียโซอิเล็กทริก โดยการเพิ่มประสิทธิภาพ % wt ของ Tetragonal BTO NPs และโพลาริซของชั้นคอมโพสิต ยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ TENG ที่ได้รับการปรับปรุงเป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพภาพที่มากขึ้นของ TENG

ต่อมาในปี 2018 Hyun-Woo Park และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคนาโนที่ฝังตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_{2-x}) ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบ อิเล็กทริก (TENG) โดยการเติมอนุภาคนาโนไดอิเล็กทริก TiO_{2-x} (NPs) ลงในพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งออกของ TENG แสดงดังภาพประกอบ 2.15 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนน้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมใน PDMS ที่ 5 % แสดงประสิทธิภาพสูงสุด (highest output voltage and current) โดยที่ 5 % มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (output voltage) 180 V มีค่ากระแสไฟฟ้า (Current) $8.15 \mu\text{A}$ และมีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density) $1.84 \text{ W}/\text{m}^2$ แสดงดังภาพประกอบ 2.16



ภาพประกอบ 2.15 แผนผังของโหมดสัมผัส Triboelectric nanogenerator (TENG) โดยมี TiO_{2-x} NPs ที่เติมอยู่ใน polydimethylsiloxane (PDMS) เป็นชั้นแรงเสียดทาน [5]

ที่มา: Park Hyun Woo. (2018). Micromachines

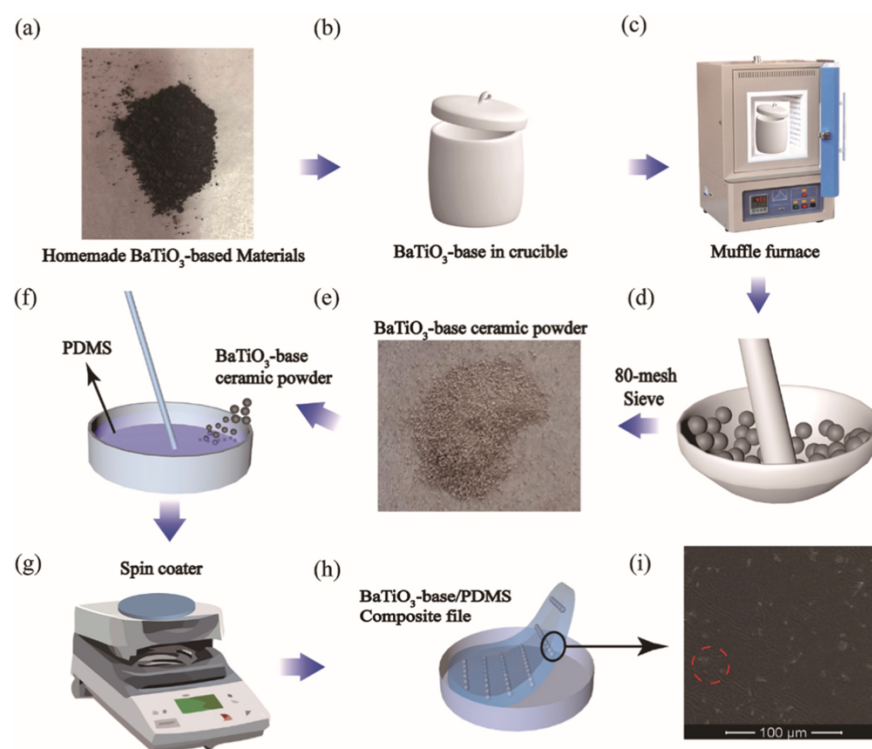


ภาพประกอบ 2.16 แสดงผลกระทบกำลังขับของ TENG ที่เกิดจากการเติม TiO_2 โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage), (b) แสดงค่ากระแสไฟฟ้า (Current), (c) แสดงแรงดันไฟฟ้าขาออก/กระแส และ (d) แสดงความหนาแน่นกำลังของ TENG ภายใต้แรงผลัก 5 N และความถี่การกด 5 Hz [5]

ที่มา: Park Hyun Woo. (2018). Micromachines

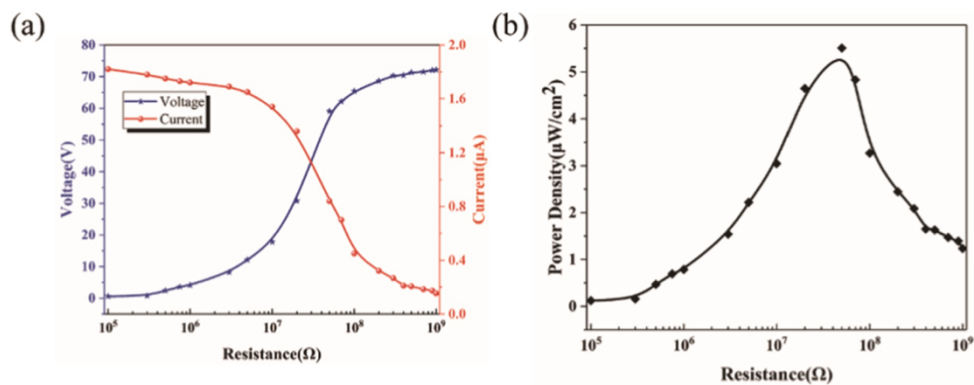
โดยผลลัพธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการส่งออกที่ดีขึ้น โดยมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งช่องว่างของออกซิเจนบนพื้นผิว PDMS เช่นเดียวกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่องว่างของออกซิเจนในอนุภาคนาโนออกไซด์ที่เป็นประจุบวกทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถนำไปสู่การแลกเปลี่ยนและการดักจับอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ TENG

และในปี 2021 Ping Zhang และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) เนื่องจากประสิทธิภาพของ TENG ได้รับผลกระทบอย่างมากจากอุณหภูมิแวดล้อม โดยสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิแวดล้อมจะเปลี่ยนค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งสัมพันธ์เป็นอย่างมากกับประสิทธิภาพของ TENG โดยในงานวิจัยนี้ใช้ผงเซรามิกแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) เพื่อเตรียมวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ซึ่งมีความเสถียรต่ออุณหภูมิ เติมนลงใน PDMS เพื่อสร้างฟิล์มคอมโพสิตสำหรับใช้เป็นชั้นสัมผัสใน TENG แสดงดังภาพประกอบ 2.17 และทำการทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ซึ่งจากการทดสอบพบว่า PDMS ที่ถูกเติมด้วย BaTiO_3 มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุด (Output voltage) 72.2 V ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (Current) 1.82 μA และค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Power density) 5.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ แสดงดังภาพประกอบ 2.18



ภาพประกอบ 2.17 (a–e) แสดงแผนผังกระบวนการผลิตผงเซรามิก BaTiO_3 , (f–h) แสดงการเตรียมฟิล์มคอมโพสิต BaTiO_3 -base/PDMS (i) ภาพ SEM ของพื้นผิวคอมโพสิต BaTiO_3 -base/PDMS [26]

ที่มา: Zhang Ping. (2021). Nano Energy



ภาพประกอบ 2.18 การทดสอบความเสถียรของ C-TENG โดย (a) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าออกและค่ากระแสไฟฟ้าออกที่ความต้านทานต่างกัน และ (b) แสดงค่าความหนาแน่นของพลังงานที่มีความต้านทานต่างกัน [26]

ที่มา: Zhang Ping. (2021). Nano Energy

โดยจากผลลัพธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของ TENG ดีขึ้น โดยสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับอุปกรณ์ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเองได้ และยังช่วยลดความไวต่ออุณหภูมิแวดล้อม ทำให้มีการใช้ TENG ในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้มากขึ้น ซึ่งนอกจากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกลงใน PDMS เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ TENG และทำการทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า แสดงค่าดังตาราง 3

ตาราง 3 แสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ PDMS ที่ถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก

PDMS ถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก	ก่อนเติม	หลังเติม	ที่มา
	Voltage	Voltage	Current
			Power density
1. BaTiO ₃	3.6 V	150 V (0.3 vol%)	0.32 μA/cm ²
2. ZnO	28 V	37 V (10:1)	6.1 μA/cm ²
3. TiO ₂	105 V	130 V (0.001 % wt)	2.7 μA
4. BaTiO ₃	1.5 V	39 V (20 % wt)	2.9 μA
5. BaTiO ₃	338 V	680 V (5 % wt)	17 μA
6. BaTiO ₃	95 V	200 V	0.4 μA
7. BaTiO ₃	15 V	76 V	7.6 μA
8. ZnO	23 V	145 V	5 μA

โดยจากตารางข้างต้นที่แสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกลงใน PDMS แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเติมวัสดุกลุ่มออกไซด์ไดอิเล็กทริกลงใน PDMS ส่งผลให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์อีกกลุ่มหนึ่งที่ยังไม่มีผู้ทำการศึกษาหรือทดลองในการนำมาเติมลงในวัสดุ PDMS เพื่อนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ TENG นั่นคือ วัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Oxide, Multiple Oxides)

8. วัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนที่โครงสร้างเพอโรฟสไกต์มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Oxide, Multiple Oxides)

สารประกอบออกไซด์ (Oxide) เกิดได้จากธาตุที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมแล้วเกิดการจับตัวกัน จนเกิดความแข็งแรงระหว่างธาตุออกซิเจนกับธาตุอื่น ๆ จึงเป็นสารประกอบธาตุคู่ที่ประกอบด้วยธาตุเพียง 2 ธาตุเท่านั้น และนอกจากนี้ยังเป็นธาตุที่มีความแข็งแรงมากและทนทานต่อสารเคมี และสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อน (Multiple Oxides) มีลักษณะคล้ายคลึงกับกลุ่มออกไซด์ แต่กลุ่มออกไซด์เชิงซ้อนจะรวมธาตุที่มีความคล้ายคลึงกันมาจับตัวอยู่ในกลุ่มเดียวกัน โดยเป็นการรวมธาตุที่สำคัญในกลุ่มออกไซด์ให้อยู่ใกล้ ๆ กัน และสมบัติบางอย่างของกลุ่มออกไซด์เชิงซ้อนจะแตกต่างกันออกไป

โดยสารประกอบออกไซด์ที่งานวิจัยฉบับนี้สนใจ คือ วัสดุออกไซด์กลุ่มธาตุหายาก (Rare Earth) ที่มีสูตรโมเลกุล R_2O_3 และสนใจสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite structure) เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ หากมีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกโดยทั่วไป และสามารถประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้

8.1 ธาตุหายาก (Rare Earth)

ธาตุหายาก (Rare Earth) คือ กลุ่มโลหะธาตุหายากที่อยู่ในตารางธาตุจำนวน 17 ชนิด แสดงดังภาพประกอบ 2.19 โดยเป็นธาตุในกลุ่มของอนุกรมเคมีแลนทาไนด์ (Lanthanide) จำนวน 15 ชนิด และอีก 2 ชนิด คือ สแกนเดียม (Sc) และอิตเทรียม (Y) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะทรานซิชัน โดยธาตุหายากจะมีคุณสมบัติ คือ ทนความร้อนได้สูง นำไฟฟ้าได้ดี และมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กสูง ซึ่งธาตุหายากจะต้องใช้เทคนิคขั้นสูงและต้นทุนที่สูงในการถลุง ทำให้ธาตุหายากมีราคาสูงและเป็นที่ต้องการจำนวนมาก ซึ่งธาตุหายากสามารถนำไปผลิตเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ เช่น ชิปคอมพิวเตอร์ แบตเตอรี่ กล้องถ่ายภาพ เครื่องยนต์ของเครื่องบิน รวมถึงอาวุธต่าง ๆ อีกมากมาย [38]

H	Rare Earth Elements																He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
		*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
			Light Rare Earth Element								Heavy Rare Earth Element						

ภาพประกอบ 2.19 ตารางของธาตุหายาก (Rare Earth Elements) [39]

ที่มา: <https://sciencenotes.org/rare-earth-elements/>

โดยวัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ได้มีผู้ทำการศึกษาและตรวจสอบเกี่ยวกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของธาตุหายากในกลุ่มออกไซด์ ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงดังตาราง 4

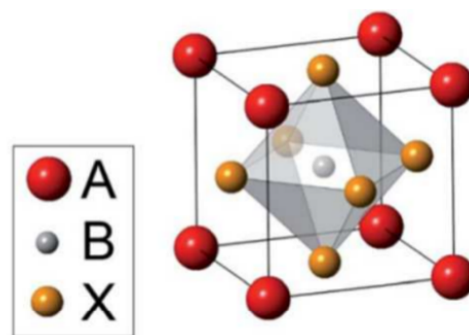
ตาราง 4 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของธาตุหายากในกลุ่มออกไซด์

ธาตุหายากในกลุ่มออกไซด์ (Rare Earth oxide)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	ที่มา
1. Pr_2O_3	23-25	[40]
2. Sm_2O_3	15	[41]
3. La_2O_3	27	[42]
4. Nd_2O_3	11	[43]
5. Y_2O_3	13	[44]

8.2 โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite structure)

โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite Structure) ประกอบด้วยแคลเซียมไทเทเนียมออกไซด์ (CaTiO_3) มีสูตรทางเคมีทั่วไปเป็น ABX_3 โดยอะตอม A และอะตอม B จะเป็นไอออนบวก (cation) ซึ่งอะตอม A จะวางอยู่ในตำแหน่งมุมทุกมุมของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ส่วนอะตอม B จะมีตำแหน่งอยู่ตรง

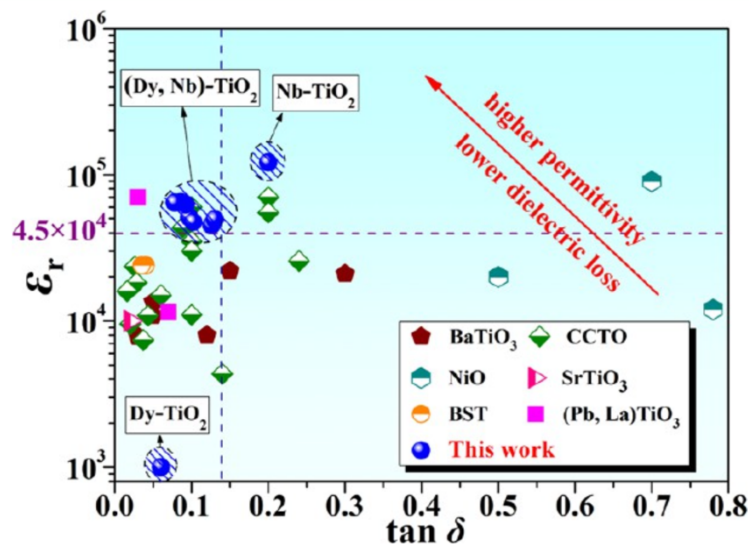
กลางของหน่วยเซลล์ ซึ่งอะตอมทั้งสองจะมีขนาดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่อะตอม A จะมีขนาดใหญ่กว่าอะตอม B และอะตอม X จะเป็นไอออนลบ ซึ่งจะมีตำแหน่งล้อมรอบอะตอม B เป็นลักษณะรูปออกตะฮีดรอล(octahedral) [45] แสดงดังภาพประกอบ 2.20 โดยสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์จะรวมไปถึงพวกสารประกอบในกลุ่มไททาเนต (Titanates) หลาย ๆ ชนิด สารที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก ได้แก่ แบเรียมไททาเนต (Barium Titanate, BaTiO_3), เลดไททาเนต (Lead Titanate, PbTiO_3) และเลดเซอร์โคเนต (Lead Zirconate) เช่น เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate, $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) [46] เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์ (perovskite crystal structure) [47]

ที่มา: Luo Shiqiang. (2015). Journal of Materials Chemistry A

โดยในปี 2018 Chunlin Zhao และ Jiagang Wu [48] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กทริกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของไดอิเล็กทริกให้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มาก และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ เนื่องจากความต้องการที่มากขึ้นของไมโครอิเล็กทรอนิกส์และการจัดเก็บพลังงาน จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มาก (Colossal Permittivity : CP) ของตัวอย่างสารประกอบออกไซด์และสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อน ได้แก่ แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: CCTO), นิกเกิลออกไซด์ (NiO), เพอโรฟสไกต์ออกไซด์ เช่น แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3), สตรอนเทียมไททาเนต (SrTiO_3), แบเรียมสตรอนเทียมไททาเนต ($(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$: BST) และเลดแลนทานัมไททาเนต ($(\text{Pb}, \text{La}) \text{TiO}_3$) เป็นต้น และรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity; ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss; $\tan \delta$) ของวัสดุดังกล่าว แสดงดังภาพประกอบ 2.21



ภาพประกอบ 2.21 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ของวัสดุ CP หลายชนิด [48]

ที่มา: Zhao Chunlin. (2018). ACS Applied Materials & Interfaces

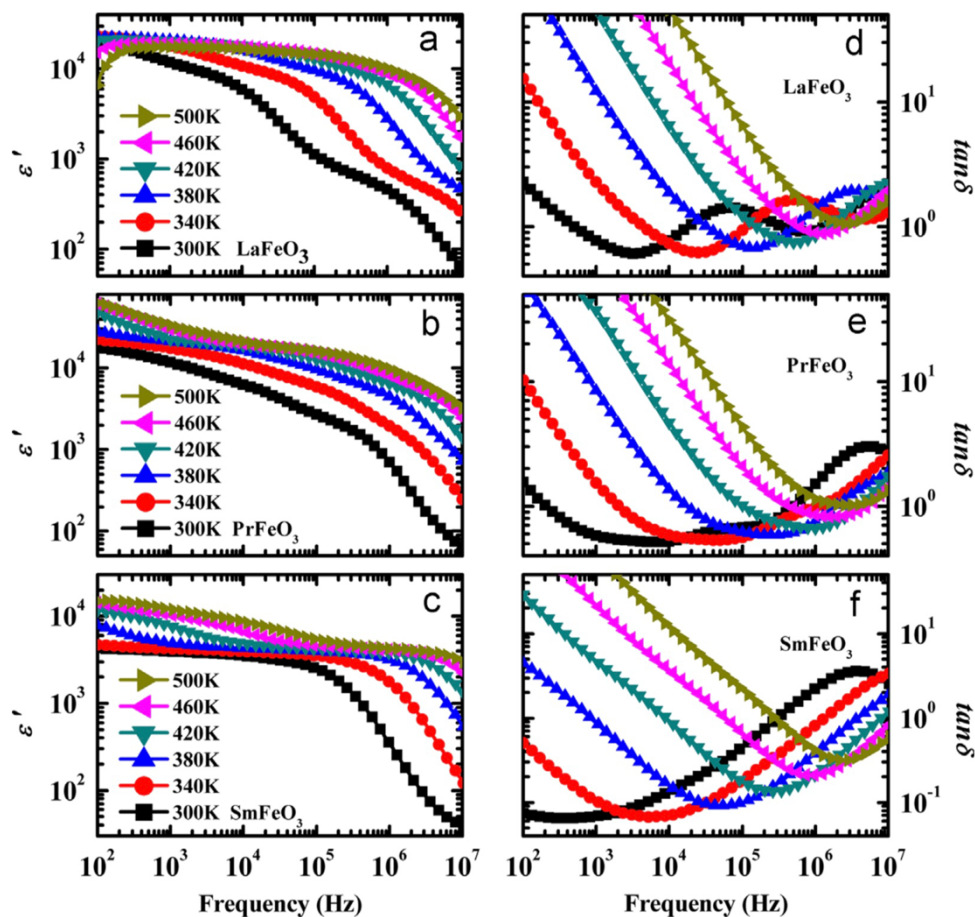
โดยจากรูปดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าวัสดุกลุ่มที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ได้แก่ แบเรียม สตรอนเทียมไททาเนต, สตรอนเทียมไททาเนต และเลดแลนทานไททาเนต ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ที่สูง โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดถึง 10^5 ซึ่งวัสดุที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกโดยทั่วไป จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลossal (Colossal dielectric materials) งานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจการปรับปรุงวัสดุพื้น PDMS ด้วยการเติมเฟสกระจายของ วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลossal เพื่อปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้สูงขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพการส่งออก ไฟฟ้า

9. วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลossal (Colossal dielectric materials)

วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลossal (Colossal dielectric materials) เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ที่สูง ($>10^3$) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ที่ต่ำ ซึ่งวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคลossal ที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงส่วนใหญ่แล้วเป็นกลุ่มของ สารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ได้แก่ RFeO_3 (เมื่อ R คือไอออนที่มีประจุ +2 หรือ +3) เป็นต้น

โดยในปี 2015 Shuai Huang และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีค่า มากที่อุณหภูมิสูงในเซรามิก RFeO_3 (R = La, Pr และ Sm) โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธี Pechini แบบ ดัดแปลง และตรวจสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 300 ถึง 600 K ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวพบว่าการเติม

ธาตุหายาก เช่น แลนทานัม (La), เพอร์ซีโอดีเมียม (Pr) และซัμμαเรียม (Sm) ช่วยเพิ่มค่าไดอิเล็กทริกในออกไซด์เชิงซ้อนของ RFeO_3 ได้มากกว่า 10^4 แสดงดังภาพประกอบ 2.22



ภาพประกอบ 2.22 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับความถี่ (ϵ') ของ (a) LaFeO_3 , (b) PrFeO_3 และ (c) SmFeO_3 และค่าการสูญเสียอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ของ (d) LaFeO_3 , (e) PrFeO_3 และ (f) SmFeO_3 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [9]

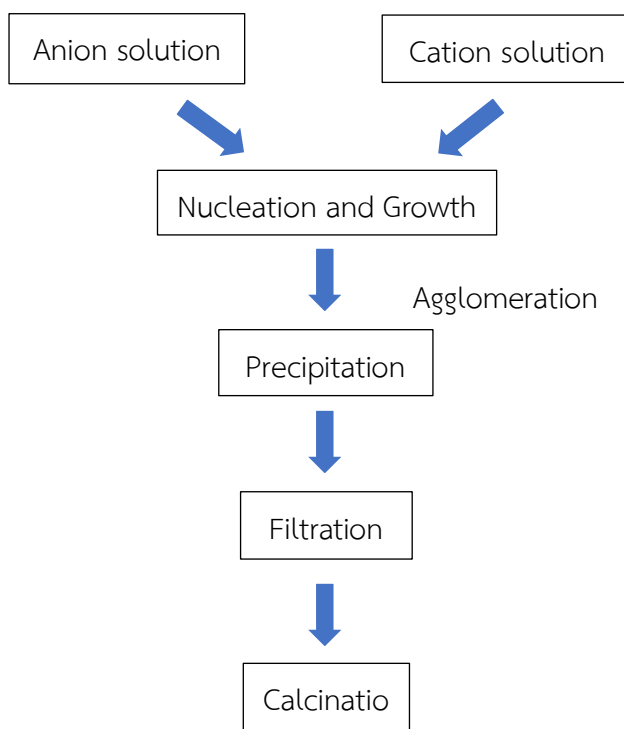
ที่มา: Huang Shuai. (2015). Ceramics International

โดยการสังเคราะห์ผงผลึกของออกไซด์ไดอิเล็กทริกและออกไซด์เชิงซ้อนไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ จะถูกเตรียมด้วยสารตั้งต้นที่อยู่ในรูปของสารละลาย ให้กลายเป็นอนุภาค โดยใช้กลุ่มของกระบวนการ Bottom-up เช่น การตกตะกอนจากสารละลาย (Co-Precipitation), การอบสารละลายที่อุณหภูมิและความดันสูง (Hydrothermal/Solvothermal), การสังเคราะห์ทางกลแบบอ่อน (Soft-mechanochemical) และการสังเคราะห์โดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ (Sonochemical)

ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้สนใจวิธีการสังเคราะห์ผงผลึกของออกไซด์ไดอิเล็กทริกและออกไซด์เชิงซ้อนไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ด้วยวิธีการตกตะกอนจากสารละลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ

10. การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

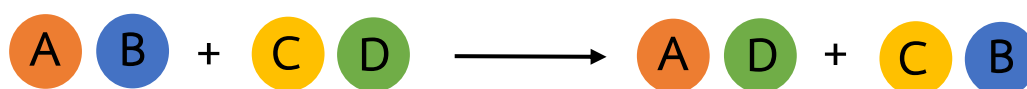
ในทางเคมี การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation : CPT) เป็นกระบวนการเตรียมผงละเอียดนาโนจากสารละลายตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการตกตะกอนโดยการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการใช้สารช่วยในการตกตะกอน เช่น กรด เบส ฯลฯ โดยรูปแบบของปฏิกิริยาในการเกิดตะกอนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การตกตะกอนจากการอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation solution) และการเกิดตะกอนจากปฏิกิริยาเมตาทีซิส (Metathesis reaction) โดยกระบวนการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของอนุภาคจะเป็นไปตามกลไกพื้นฐาน ดังนั้นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จะอยู่ในรูปของสารละลาย และเมื่อทำการตกตะกอนเสร็จ จะถูกนำไปทำการการแคลไซน์ (Calcination) เป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยขั้นตอนจะแสดงดังภาพประกอบ 2.24



ภาพประกอบ 2.23 วิธีการตกตะกอนร่วมโดยทั่วไปสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคไมโครและนาโน [49]
ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Coprecipitation#/media/File:Co-precipitation.png>

โดยการตกตะกอนจากการอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation solution) เกิดจากสมดุลของการละลาย เกิดเป็นสารละลายอิ่มตัว อิ่มตัวยิ่งยวด และตกตะกอนตามลำดับ ส่วนปฏิกิริยาเมตาทีซิส (Metathesis reaction) หรือปฏิกิริยาการแทนที่สองครั้ง (Double – displacement reaction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการแลกเปลี่ยนหรือแลกตำแหน่งของไอออนบวกหรือไอออนลบซึ่งกันและกัน โดยมีรูปแบบของสมการทั่วไป แสดงดังสมการที่ 1 [50]

สมการที่ 1 สมการปฏิกิริยาเมตาทีซิส



10.1 การแคลไซน์ (Calcination)

การแคลไซน์ (Calcination) คือ กระบวนการให้ความร้อน โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงในระดับที่ยังไม่ถึงจุดหลอมเหลวของอุณหภูมิของอนุภาคหรือสารนั้น ๆ เพื่อทำการกำจัดความชื้นออกจากอนุภาคหรือสารบางอย่าง เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคหรือสาร เพื่อการเติมออกซิเจนหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การออกซิไดซ์ ลงไปในอนุภาคหรือสาร และเพื่อให้ได้อนุภาคหรือสารที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

11. วัสดุคอมโพสิต หรือวัสดุผสม (Composite material)

วัสดุคอมโพสิต หรือวัสดุผสม (Composite material) คือ วัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการรวมกันของวัสดุมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่างกันมาประกอบกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุพื้นฐานให้ดีขึ้น และนำไปใช้ประโยชน์ในการใช้งานเฉพาะด้าน โดยการรวมกันของของวัสดุเหล่านี้ ภายในโครงสร้างองค์ประกอบแต่ละอย่างจะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกจากกันอย่างชัดเจน โดยประกอบด้วยเฟส 2 ชนิด คือ

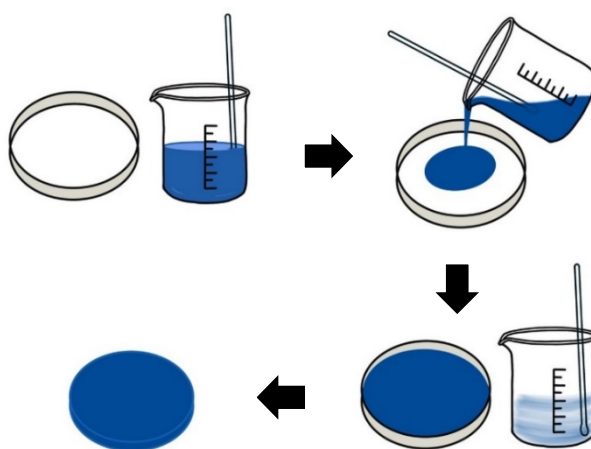
1. เฟสเนื้อพื้น (matrix phase) คือ เฟสที่มีลักษณะติดกัน และอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องล้อมรอบอีกเฟสที่เรียกว่า เฟสกระจาย (dispersed phase)

2. เฟสกระจาย (dispersed phase) คือ เฟสที่ถูกฝังอยู่ในเฟสเนื้อพื้น โดยที่เนื้อวัสดุกระจายตัวในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งจะมีรูปแบบที่เป็นกลุ่ม เช่น อนุภาค ไฟเบอร์ หรือเกล็ด

ซึ่งในการสร้างวัสดุคอมโพสิตในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ โดยมีวัสดุพื้นที่ใช้ คือ PDMS และทำการเติมเฟสกระจายวัสดุกลุ่มออกไซด์ไดอิเล็กทริกและวัสดุออกไซด์เชิงซ้อนไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ เพื่อปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้สูงขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของ PDMS ในขั้นตอนการขึ้นรูป

12. กระบวนการหล่อแบบ

กระบวนการหล่อแบบเป็นกระบวนการการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่ใช้ เช่น โลหะหรือพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่ใช้มักจะอยู่ในรูปแบบของเม็ด ผง หรือของเหลว โดยหากอยู่ในรูปแบบของเม็ดหรือผงจะต้องถูกนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนจนเกิดการหลอมเหลว และจะถูกเทใส่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปขึ้นงานให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ โดยที่ช่องว่างจะถูกเติมโดยใช้แรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียว ซึ่งกระบวนการหล่อแบบเป็นกระบวนการที่ง่ายและสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ [51] แสดงดังภาพประกอบ 2.25



ภาพประกอบ 2.24 กระบวนการหล่อแบบ

โดยเมื่อเตรียมผงผลึกและแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) ที่ต้องการแล้ว ผงผลึกจะถูกนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) จะถูกนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และใช้เครื่องออสซิลโลสโคปและเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์เพื่อวัดค่าการส่งออกทางไฟฟ้า และเครื่องวัดแอลซีอาร์เพื่อตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) คือ การศึกษาโครงสร้างภายนอกหรือพื้นผิวของตัวอย่างที่นำมาใช้ โดยใช้การกวาดลำอิเล็กตรอนบนวัสดุ และนำสัญญาณที่ได้มาสร้างเป็นภาพ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพที่มีกำลังสูงและเป็นภาพเสมือน 3 มิติ โดยจะมีระยะชัดลึกสูงที่ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างได้อย่างชัดเจน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง แสดงดังภาพประกอบ 2.26

โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเริ่มจากการปล่อยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ออกมา และจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านปาด้านล่างโดยแผ่นแอโนด (Anode plate) และเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) จะทำการปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็ก ลำอิเล็กตรอนจะปาด้านล่างผ่านเลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีจุดโฟกัสที่ตรงกับพื้นผิว โดยจะมีขดลวดที่ใช้ควบคุมการกวาด (Scan coil) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของลำอิเล็กตรอนและกำหนดทิศทางผ่านชุดควบคุม (Control unit) ลำอิเล็กตรอนที่กระทบกับพื้นผิวจะเกิดอันตักิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของธาตุ และเกิดการถ่ายโอนพลังงานจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ออกมา [52]



ภาพประกอบ 2.25 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) [53]

ที่มา: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZEISS_SIGMA_HD_FESEM_\(10710289333\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZEISS_SIGMA_HD_FESEM_(10710289333).jpg)

14. กล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM)

กล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน แสดงดังภาพประกอบ 2.27 เป็นเทคนิคการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน โดยสามารถใช้เทคนิคนี้ในการตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่างได้หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น การสร้างภาพ การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเฟส การดูรูพรุนขนาดเล็ก รอยแตก การตกตะกอน หรือเกรนที่แตกต่างกันในตัวอย่าง โดยการใช้รังสีซินโครตรอนจะเกิดจากการเร่งอนุภาคอิสระในสุญญากาศสูง ซึ่งตามกฎของอิเล็กโทรไดนามิกส์ความเร่งดังกล่าวจะนำไปสู่การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในระบบจะต้องให้อนุภาคที่มีประจุอยู่ในวิถีปิดเพื่อให้ได้แหล่งกำเนิดรังสีที่มีความต่อเนื่อง โดยจะใช้สนามแม่เหล็กเพื่อบังคับอนุภาคให้เข้าสู่วงโคจรที่ต้องการ



ภาพประกอบ 2.26 เครื่อง Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SR-XTM)
[54]

ที่มา: <https://www.sri.or.th/en/bl1-2w.html>

14.1 การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิค SR-XTM

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านชิ้นงานตัวอย่าง ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนไปจากความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน (Attenuation coefficient, μ) ที่ต่างกันของโครงสร้างภายในของชิ้นงานตัวอย่างจะถูกรวบรวมและเปลี่ยนเป็นแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) ด้วย Scintillator จากนั้นระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์จะทำหน้าที่รวมแสงที่เกิดขึ้นและส่งต่อไปยังกล้องดิจิทัล sCMOS โดยสามารถบันทึกภาพในรูปของสัญญาณดิจิทัลได้ความละเอียดสูงถึง 5.5 ล้านพิกเซล ส่วนคอนทราสต์ของภาพเอกซเรย์จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Attenuation coefficient, μ) ที่ต่างกันของโครงสร้างภายในของวัตถุตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Lambert Beer's law [55]

15. เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบเกี่ยวกับโมเลกุลของสารและวิเคราะห์สารอินทรีย์ ซึ่งจะใช้ได้ดีมากกับสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูง ทั้งอยู่ในรูปของเหลว ของแข็ง และก๊าซ โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี จะอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลนั้น ๆ ที่เกิดจากการยิงรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ช่วง $4000-400\text{ cm}^{-1}$ แล้วทำการศึกษาผลกระทบของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้ากับตัวอย่างที่ต้องการศึกษา จึงได้นำคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดที่สามารถทำให้เกิดการสั่นขึ้นภายในโมเลกุลมาใช้ในการวิเคราะห์ และเนื่องจากแสงในช่วงยูวีถึงรังสีเอกซ์มีพลังงานสูงมากกว่าช่วงอินฟราเรด โดยการมีพลังงานสูงจะทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดหลุดออกจากโมเลกุล และเกิดการทำลายพันธะเคมีได้ ส่วนในช่วงไมโครเวฟมีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลหรือทำให้เกิดการสั่นภายในโมเลกุลได้ แต่ทำได้แค่เพียงให้โมเลกุลเกิดการหมุนเท่านั้น โดยการสั่นภายในโมเลกุลสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ 1. การสั่นแบบยืด (stretching) เป็นการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมแบบยืดหรือหดตามแนวแกนพันธะ 2. การสั่นแบบงอ (bending) เป็นการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมที่จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากพันธะเดิม [56] ทำให้ขนาดของมุมเปลี่ยน ส่งผลต่อความแข็งแรงของพันธะ

โดยหลักการของเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีจะอาศัยการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของโมเลกุลของสารตัวอย่าง ว่ามีพลังงานเหมาะสมต่อการเกิดการสั่นของพันธะเคมีภายในโมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้วทำการวัดแสงที่ผ่านออกมา ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Wave Number) โดยทั่วไปจะเป็นแกน x กับค่าการส่งผ่านของแสง (transmittance) หรือความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืน (absorbance) จะเป็นแกน y โดยจะวิเคราะห์ผลจากตำแหน่งของพีคที่ขึ้นและขึ้นลง

ซึ่งเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ๆ ของสารชีวโมเลกุล และนอกจากนี้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปียังมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างที่ไม่มีความซับซ้อน [57] ทำให้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเป็นที่นิยมในการใช้วิเคราะห์หรือทดสอบสารอินทรีย์ แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องการนำไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบธาตุหรือสารอะตอมเดี่ยว เช่น ก๊าซเฉื่อย หรือธาตุต่าง ๆ เช่น ธาตุโซเดียม เนื่องจากไม่มีพันธะเคมีที่ทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุล จึงไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้ โดยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีแสดงดังภาพประกอบ 2.28



ภาพประกอบ 2.27 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) [58]
ที่มา: <https://www.perkinelmer.com/th/category/infrared-ir-instruments>

16. เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) แสดงดังภาพประกอบ 2.29 เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ไม่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดความเสียหาย เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) เพื่อวิเคราะห์สารประกอบที่อยู่ในชิ้นงานตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดจากการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงานตัวอย่าง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีและสะท้อนออกมาที่มุมต่างกัน โดยหากชิ้นงานตัวอย่างมีองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกที่แตกต่างกัน องค์การในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีมุมที่แตกต่างกันไป โดยเมื่อเกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมา จะมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล ซึ่งผลที่ได้สามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงานตัวอย่าง โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ สามารถวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในชิ้นงานตัวอย่างได้ [59]

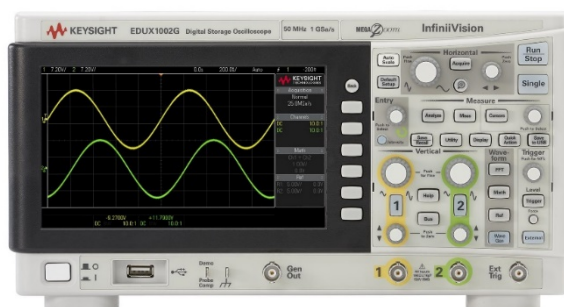


ภาพประกอบ 2.28 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) [59]
ที่มา: <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>

17. เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) หรือเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้าไฮเทค คือ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า แสดงดังภาพประกอบ 2.30 โดยผลที่ได้จากสัญญาณไฟฟ้าจะแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟขึ้นลง ซึ่งจะแสดงผลผ่านหลอดภาพที่ฉาบด้วยฟอสเฟอร์ โดยการวัดออสซิลโลสโคปนั้นสามารถใช้สำหรับวัดค่าต่าง ๆ ได้ เช่น วัดค่าแรงดันของไฟฟ้า การวัดความถี่ วัดเฟสของสัญญาณ ใช้สำหรับการวัดแรงดันและคาบเวลา ใช้ในการวัดไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับ และสามารถวัดความถี่ของสัญญาณ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการวัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

โดยเครื่องออสซิลโลสโคปใช้หลักการในการเบี่ยงเบนไฟฟ้า โดยที่ปลายข้างหนึ่งจะประกอบด้วยแคโทด เพื่อทำการยิงอิเล็กตรอนไปยังที่ปลายอีกข้างหนึ่ง เมื่อเครื่องออสซิลโลสโคปได้รับสัญญาณ จะเกิดการเร่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อแสดงผลสัญญาณที่ได้รับ และเครื่องจะแสดงผลที่หน้าจอแสดง โดยสามารถแบ่งหลักการทำงานออกเป็น 2 แบบ คือ 1. การป้ายเบนสัญญาณทางแนวตั้ง (Vertical deflection) มีหลักการคือเมื่อป้อนข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าเข้าไป ข้อมูลจะถูกส่งไปยังวงจรที่ทำการลดทอนสัญญาณ เพื่อให้สัญญาณที่เข้ามามีขนาดเล็กลง จากนั้นส่งไปยังวงจรขยายผ่านแผ่นเพลตเพื่อเบี่ยงเบนในแนวตั้งให้เกิดการสร้างการป้ายเบนอิเล็กตรอนทางแนวตั้ง 2. การป้ายเบนสัญญาณทางแนวนอน (Horizontal deflection) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตสัญญาณไฟฟ้าในรูปฟันเลื่อย ซึ่งสัญญาณที่เข้าไปจะถูกป้อนในลักษณะเบี่ยงเบนในแนวนอน เกิดเป็นการป้ายเบนอิเล็กตรอนทางแนวนอน [60]



ภาพประกอบ 2.29 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) [61]

ที่มา: <https://th.element14.com/keysight-technologies/edux1002g/digital-storage-osc-50mhz-2-ch/dp/2690191>

18. เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)

เครื่องมือมัลติมิเตอร์ (Multimeter) คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าแบบเข็ม โดยสามารถใช้ได้ทั้งกับไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Electricity : AC) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดและแสดงค่าต่าง ๆ ที่มัลติมิเตอร์สามารถวัดได้ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และความต่างศักย์ เป็นต้น [62]

เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) หรือเครื่องมือที่ใช้วัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าแบบตัวเลข แสดงดังภาพประกอบ 2.31 เป็นเครื่องมือที่พัฒนาต่อจากแบบเข็ม โดยการแสดงผลการวัดค่าด้วยตัวเลขจะช่วยให้การวัดค่า และการอ่านค่าให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งดิจิตอลมัลติมิเตอร์มีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากมัลติมิเตอร์แบบเข็ม เนื่องจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ใช้การแสดงผลด้วยการนับค่าเป็นตัวเลขตามหลักการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ดิจิตอล (Digital electronic) [63]



ภาพประกอบ 2.30 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) [64]

ที่มา: https://www.irct.co.th/shop_detail/86

19. เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter)

เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter) หรือ เครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ แสดงดังภาพประกอบ 2.32 เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุปกรณ์ภายในวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ โดยภายในวงจรไฟฟ้าจะมีตัวเหนี่ยวนำ (Inductance: L), ตัวเก็บประจุ (Capacitance: C) และความต้านทาน (Resistance: R) ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในงานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด ตั้งแต่งานกำลังสูงด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ (Power electronic) จนถึงงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Microelectronic) ที่มีขนาดเล็กและซับซ้อน ซึ่งปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์แบบยึดติดผิว (Surface Mount Device: SMD) ที่มีขนาดของตัวอุปกรณ์เล็กลงเรื่อย ๆ จนแทบมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น โดยเครื่องวัดแอลซีอาร์สามารถใช้วัดค่าต่าง ๆ ได้ เช่น ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance), ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance), ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance), ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้า (Current) เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.31 เครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR Meter) [65]

ที่มา: <https://th.rs-online.com/web/p/lcr-meters/1217581>

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. วัสดุและสารเคมี

- 1.1 Oxalic acid
- 1.2 Nitric acid (HNO_3)
- 1.3 Sodium Hydroxide (NaOH)
- 1.4 น้ำกลั่น
- 1.5 แลนทานัม Lanthanum (La^{3+}) ได้มาจากแร่โมนาไซด์ (Monazite)
- 1.6 ซัมมาเรียม Samarium (Sm^{3+}) ได้มาจากแร่โมนาไซด์ (Monazite)
- 1.7 นีโอดีเมียม Neodymium (Nd^{3+}) ได้มาจากแร่โมนาไซด์ (Monazite)
- 1.8 สารเฟอร์ริกไนเตรต (Ferric nitrate: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$)
- 1.9 Polydimethylsiloxane (PDMS)
- 1.10 Curing agent

2. อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง

ตาราง 5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	เครื่องมือ
1. ถังมือยาง	1. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
2. หน้ากากอนามัย	2. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)
3. ปีกเกอร์	3. เครื่องกวนสารเคมี (Hotplate magnet stirrer)
4. ขวดปรับปริมาตร	4. เตาอบ
5. กระบอกตวง	5. ปุ่มดูด-จ่ายสารละลายแบบรีดท่อ
6. หลอดหยด	6. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
7. กระดาษกรองเบอร์ 40, 41, 42 และ 43	7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
8. ถ้วยเผาอุณหภูมิสูง	8. เครื่อง X-ray diffractometer
9. ถังซีปล็อกขนาดต่าง ๆ	9. เครื่อง Infrared Spectroscopy
10. กระจกนาฬิกา	10. กล้อง Scanning electron microscope
11. ถาดพลาสติก	11. เครื่อง Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy

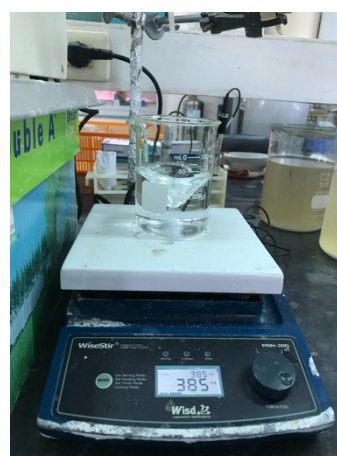
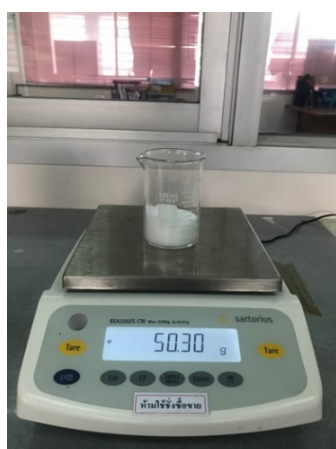
อุปกรณ์	เครื่องมือ
12. โกร่งบดสาร	12. เครื่อง Oscilloscope
13. ตะแกรง 45 ไมครอน (Sieving)	13. เครื่อง Digital Multimeters
14. เส้นลวดทองแดง	
15. สติ๊กเกอร์ทองแดง	
16. แคปตอนเทป (Kapton tape)	
17. กรวยกรองบูชเนอร์	
18. ขวดลดความดัน	

3. ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ

3.1 การเตรียม Oxalic acid 10%

3.1.1 ทำการนำสาร Oxalic acid ไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง โดยชั่งในปริมาณ 50 กรัม

3.1.2 ละลาย Oxalic acid ในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องกวนสาร และทยอยเติม Oxalic เพื่อให้ละลาย หลังจากนั้นนำใส่ขวดปรับปริมาตร โดยปริมาณน้ำกลั่นในบีกเกอร์ต้องน้อยกว่า ปริมาณขวดปรับปริมาตร แสดงดังภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนการเตรียม Oxalic acid 10%

3.2 การตกตะกอนแลนทานัม (Lanthanum Oxide: La_2O_3), ซัมมาเรียม (Samarium Oxide: Sm_2O_3) และ นีโอดีเมียม (Neodymium Oxide: Nd_2O_3)

3.2.1 ทำการกรอง La^{3+} เพื่อนำสิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งสกปรกออก

3.2.2 เตรียม La^{3+} ตามปริมาณที่ต้องการโดยใช้กระบอกตวง แล้วนำไปใส่ปิกร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร

3.2.3 ตวง Oxalic acid 100 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวงแล้วนำไปใส่ปิกร์ 150 มิลลิลิตร เพื่อนำไปใช้ในการตกตะกอน La_2O_3

3.2.4 นำปิกร์ La^{3+} วางบนเครื่องกวนสาร เพื่อหยด Oxalic acid ลงในปิกร์ La^{3+} หลังจากนั้นเปิดปั๊มดูด-จ่ายสารละลายแบบรีดท็อหยด Oxalic acid 50 มิลลิลิตร

3.2.5 โดยการตกตะกอน Sm_2O_3 และ Nd_2O_3 มีวิธีการเช่นเดียวกับการตกตะกอน La_2O_3 ดังที่กล่าวมาข้างต้น

3.2.6 เมื่อหยด Oxalic acid ครบแล้ว นำปิกร์แลนทานัมออกซาเลต (Lanthanum oxalate : $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$), ซัมมาเรียมออกเลต (Samarium oxalate : $\text{Sm}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$) และนีโอดีเมียม (Neodymium oxalate : $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$) ที่ตกตะกอนแล้วปิดฝาทิ้งไว้ 1 คืน

3.3 การกรองแลนทานัม (Lanthanum Oxide : La_2O_3), ซัมมาเรียม (Samarium Oxide : Sm_2O_3) และ นีโอดีเมียม (Neodymium Oxide : Nd_2O_3)

3.3.1 นำ $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ ที่ผ่านการตกตะกอนทิ้งไว้ 1 คืน มากรองด้วยเครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum Pump) โดยจะเริ่มจากการนำกระดาษกรองเบอร์ 42 วางลงบนกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel Porcelain) และฉีดน้ำกลั่นเพื่อให้กระดาษกรองติดกับกรวยกรองบุชเนอร์

3.3.2 ทำการเท $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ ลงไปบนกรวยกรองบุชเนอร์ประมาณหนึ่ง แล้วทำการเปิดเครื่องทำสุญญากาศ เพื่อกรองสาร $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH ของ $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ ที่ล้างได้มีค่า pH เท่ากับน้ำกลั่น (~pH 5-6)

3.3.3 เมื่อล้าง $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ จนค่า pH เท่ากับน้ำกลั่น ให้ทำการเปลี่ยนกระดาษกรอง แล้วทำการเท $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ ต่อ เพื่อกรองสารและทำการล้างอีกรอบตั้งขั้นตอนข้างต้น จนกระทั่ง $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ หมดปิกร์

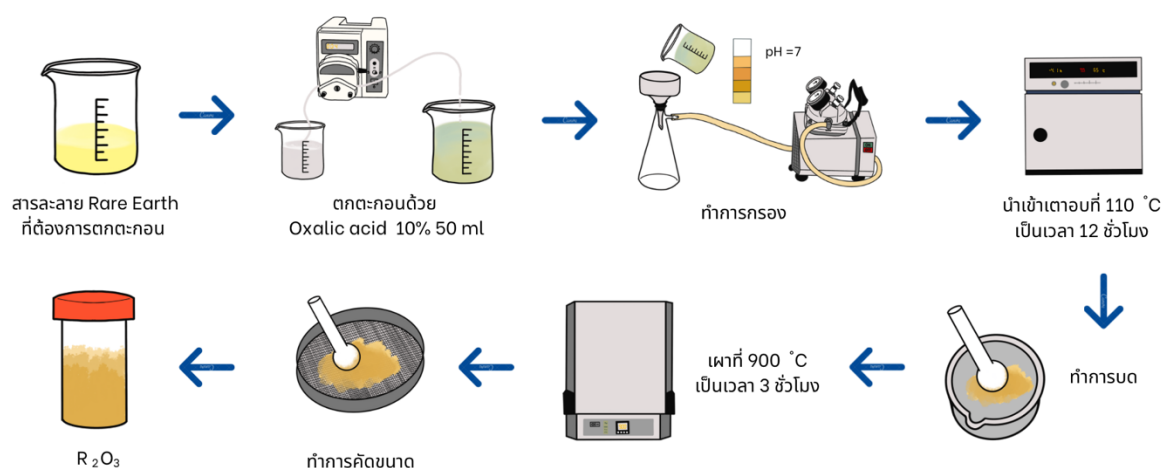
3.3.4 นำกระดาษกรอง $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.5 นำกระดาษกรองออกจากเตาอบ แล้วทำการชูดผง La_2O_3 ใส่ขวด เพื่อนำไปทำการ Calcined ต่อไป

3.3.6 ทำการ Calcined ผง La_2O_3 โดยนำไปใส่ถ้วยเผาอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.3.7 นำผง La_2O_3 ที่ได้จากการ Calcined มาทำการคัดขนาด (Sieving) 45 ไมครอน แล้วนำใส่ขวด

3.3.8 โดยการตกตะกอนและการกรอง Sm_2O_3 และ Nd_2O_3 มีวิธีการเช่นเดียวกับการตกตะกอนและการกรอง La_2O_3 ดังที่กล่าวไปข้างต้น แสดงดังภาพประกอบ 3.2



ภาพประกอบ 3.2 การเตรียมสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ

4. ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนที่โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ

4.1 การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH 6 M

4.1.1 ทำการนำสาร NaOH ไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง โดยชั่งในปริมาณ 24 กรัม

4.1.2 ละลาย NaOH ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องกวนสาร และทยอยเติม NaOH เพื่อให้ NaOH ละลาย หลังจากนั้นนำใส่ขวดปรับปริมาตร โดยปริมาณน้ำกลั่นในบีกเกอร์ต้องน้อยกว่าปริมาณขวดปรับปริมาตร

4.2 การตกตะกอนแลนทานัมเฟอไรต์ (Lanthanum Iron Oxide : LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอไรต์ (Samarium Iron Oxide : SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอไรต์ (Neodymium Iron Oxide : NdFeO_3)

4.2.1 นำสารเฟอร์ริกไนเตรต (Ferric nitrate : $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) ทำการละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วนำมา 25 ml (3 M) มาผสมกับสารแลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum oxide : La_2O_3) ที่ถูกทำละลายด้วย HNO_3 25 ml (0.2 M) เป็นเวลา 10 นาที

4.2.2 หลังจากนั้นค่อย ๆ เติมน้ำเย็นปริมาณ 400 ml ลงไป แล้วทำการคนต่อเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารละลายกับน้ำผสมกันจนเกิดความเสี่ยงต่อการตกตะกอนมากยิ่งขึ้น

4.2.3 ต่อมาทยอยเติมสารละลาย NaOH จนกระทั่งมีค่า pH เท่ากับ 9.2 - 9.4 เพื่อทำการตกตะกอน

4.2.4 โดยการตกตะกอน SmFeO_3 และ NdFeO_3 มีวิธีการเช่นเดียวกับการตกตะกอน LaFeO_3 ดังที่กล่าวมาข้างต้น แสดงดังภาพประกอบ 3.3

4.3 การกรองแลนทานัมเฟอไรต์ (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอไรต์ (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) และนีโอดิเมียมเฟอไรต์ (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3)

4.3.1 นำ LaFeO_3 ที่ผ่านการตกตะกอน มาทำการกรองด้วยเครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum Pump) โดยจะเริ่มจากการนำกระดาษกรอง วางลงบนกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel Porcelain) และฉีดยาล้างเพื่อให้กระดาษกรองติดกับกรวยกรองบุชเนอร์

4.3.2 ทำการเท LaFeO_3 ลงไปบนกรวยกรองบุชเนอร์ประมาณหนึ่ง แล้วทำการเปิดเครื่องทำสุญญากาศ เพื่อกรองสาร LaFeO_3 จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH ของ LaFeO_3 ที่ล้างได้ มีค่า pH เท่ากับ 7

4.3.3 เมื่อล้าง LaFeO_3 จนค่า pH เท่ากับ 7 ให้ทำการเปลี่ยนกระดาษกรอง แล้วทำการเท LaFeO_3 ต่อ เพื่อกรองสารและทำการล้างอีกรอบดังขั้นตอนข้างต้น จนกระทั่ง LaFeO_3 หมดปึกเกอร์

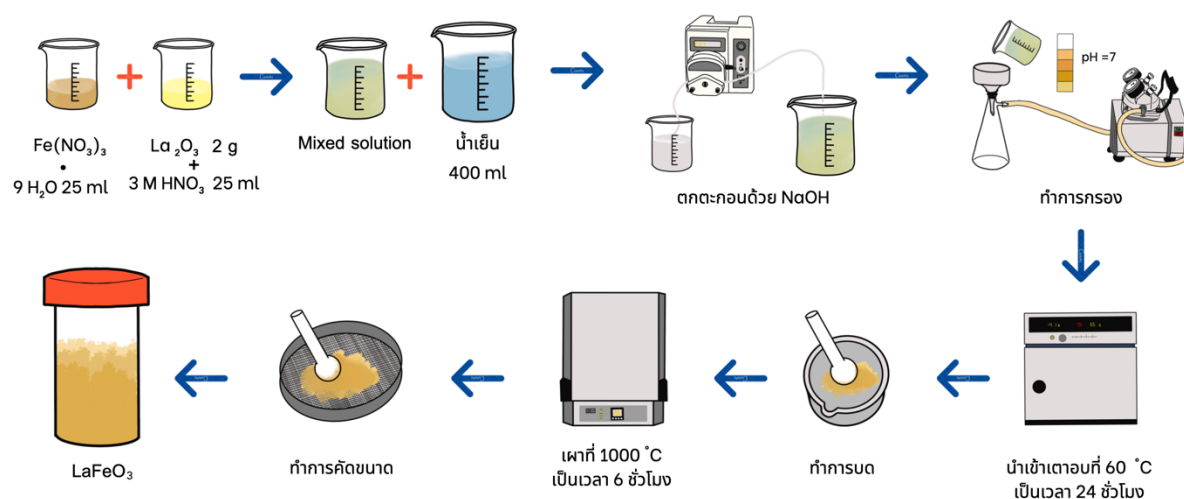
4.3.4 นำกระดาษกรอง LaFeO_3 เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.3.5 นำกระดาษกรองออกจากเตาอบ แล้วทำการชูดผง LaFeO_3 ใส่ขวด เพื่อนำไปทำการ Calcined ต่อไป

4.3.6 ทำการ Calcined ผง LaFeO_3 โดยนำเข้าถ้วยเผาอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4.3.7 นำผง LaFeO_3 ที่ได้จากการ Calcined มาทำการคัดขนาด (Sieving) 45 ไมครอน แล้วนำเข้าขวด

4.3.8 โดยการตกตะกอนและการกรอง SmFeO_3 และ NdFeO_3 มีวิธีการเช่นเดียวกับการตกตะกอนและการกรอง LaFeO_3 ดังที่กล่าวมาข้างต้น แสดงดังภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 3.3 การเตรียมสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบของ LaFeO_3

5. วิธีการทำคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริก และ PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลด้วยกระบวนการหล่อแบบ

5.1 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) เติมด้วย Rare Earth oxide และ Rare Earth Perovskite Oxide

- โดย PDMS ถูกเติมด้วย R_2O_3 และ RFeO_3 ที่ได้จากการ calcined

5.1.1 ชั่ง PDMS ตามสัดส่วนที่ต้องการใส่ปิกเจอร์ โดยมีเงื่อนไขดังตาราง 6 และตาราง 7

ตาราง 6 PDMS/Rare Earth Oxide composites

Dope (% wt)	PDMS (g)	Curing agent (g)	All wt (g)	RMO_3 (g)
0.5	11.3	1.1	12.4	0.0620
2.5	11.3	1.1	12.4	0.3100
5	11.3	1.1	12.4	0.6200
10	11.3	1.1	12.4	1.2400

*R = La/ Sm/ Nd

ตาราง 7 PDMS/Rare Earth Perovskite Oxide

Dope (% wt)	PDMS (g)	Curing agent (g)	All wt (g)	RMO ₃ (g)
0.5	11.3	1.1	12.4	0.0620
2.5	11.3	1.1	12.4	0.3100
5	11.3	1.1	12.4	0.6200
10	11.3	1.1	12.4	1.2400

*R = La/ Sm/ Nd , M = Fe/ Cr

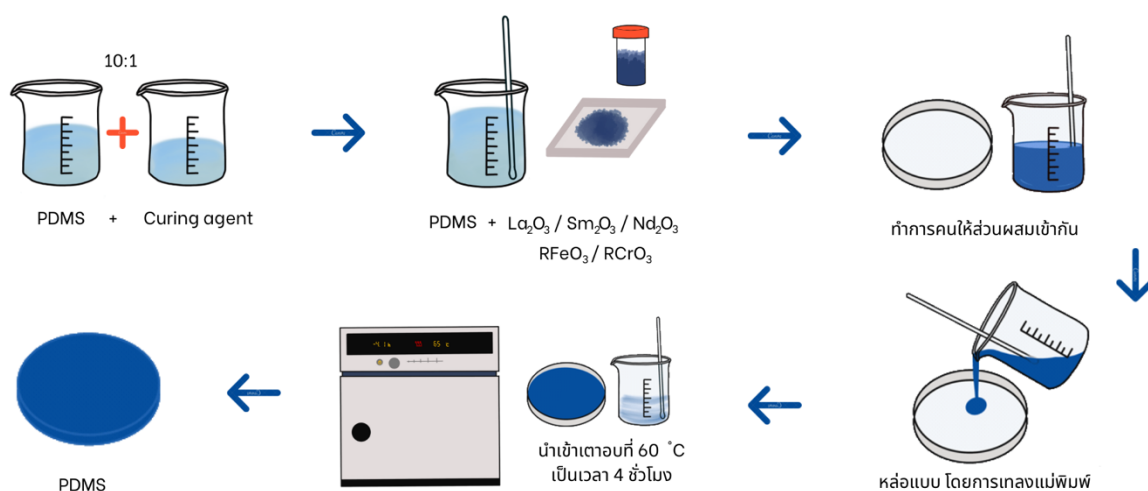
5.1.2 กด Tare แล้วทำการใส่ Curing agent ตามสัดส่วนที่ต้องการในปิกเกอร์ PDMS

5.1.3 ทำการคน PDMS และ Curing agent ให้ผสมเข้าด้วย ในขั้นตอนนี้จะต้องค่อย ๆ คน เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศใน PDMS + Curing agent

5.1.4 ชั่งผง Rare earth oxide หรือ Rare Earth perovskite oxide ตัวที่ต้องการเติม ตามสัดส่วนดังตาราง 6 และตาราง 7 จากนั้นเติมลงใน PDMS + Curing agent โดยทยอยใส่ผงพร้อมกับคนจนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันเป็นเวลา 15 นาที

5.1.5 นำ PDMS ที่เติมด้วยผงแล้วไปขึ้นรูป โดยวิธีการหล่อแบบ

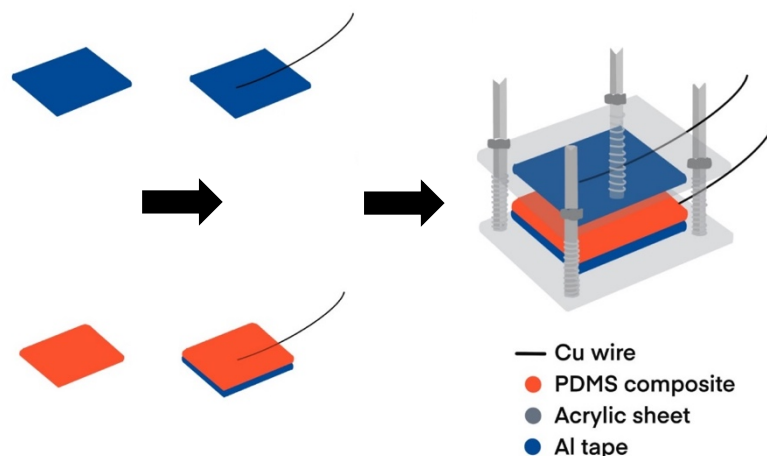
5.1.6 นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำ PDMS มาแกะออกจากแบบ



ภาพประกอบ 3.4 การขึ้นรูป PDMS ที่ถูกเติมด้วย Rare earth oxide หรือ Rare Earth perovskite oxide

6. การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator)

การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator : TENG) แบบสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode) จะประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดที่มีประจุแตกต่างกัน คือ ชนิดที่เป็นประจุบวกและชนิดที่เป็นประจุลบ โดยในอุปกรณ์ฝั่งหนึ่งจะเป็นบวก และอีกฝั่งหนึ่งจะเป็นลบ จากนั้นจะนำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยในงานนี้จะใช้แผ่นฟิล์ม PDMS composite ที่เติมสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนเป็นวัสดุลบ โดยใช้เป็นชั้น charge-generating layer ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นที่สัมผัสกับอีกวัสดุหนึ่ง แล้วติดด้วยอลูมิเนียมเทปที่ด้านล่างเพื่อใช้เป็นขั้วและเป็นชั้น charge-collecting layer เพื่อทำหน้าที่ในการพาประจุ จากนั้นติดด้วยลวดทองแดงเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟ และหลังจากนั้นนำไปประกอบกับฝั่งที่เป็นบวก โดยจะใช้เป็นอลูมิเนียมเทปที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและเป็นตัวพาประจุ แสดงดังภาพประกอบ 3.8



ภาพประกอบ 3.5 แสดงการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก

7. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาค และพื้นผิวของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) และการใช้ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ทำโดยการติด Carbon tape บนแท่นวางตัวอย่าง จากนั้นตัดชิ้นงานตัวอย่างวางบน Carbon tape ตามแนว Cross section เพื่อนำไปตรวจสอบ

7.2 กล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM)

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน เพื่อวิเคราะห์ตรวจสอบการกระจายตัวของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) ทำโดยการตัดชิ้นงานตัวอย่างของ PDMS Composite เป็นขนาด 1x1 เซนติเมตร เพื่อนำไปตรวจสอบ

7.3 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี เพื่อวิเคราะห์ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี พันธะ หรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) ซึ่งเตรียมโดยการตัดชิ้นงานตัวอย่างของ PDMS และ PDMS Composite เป็นขนาด 1x1 เซนติเมตร เพื่อนำไปตรวจสอบ

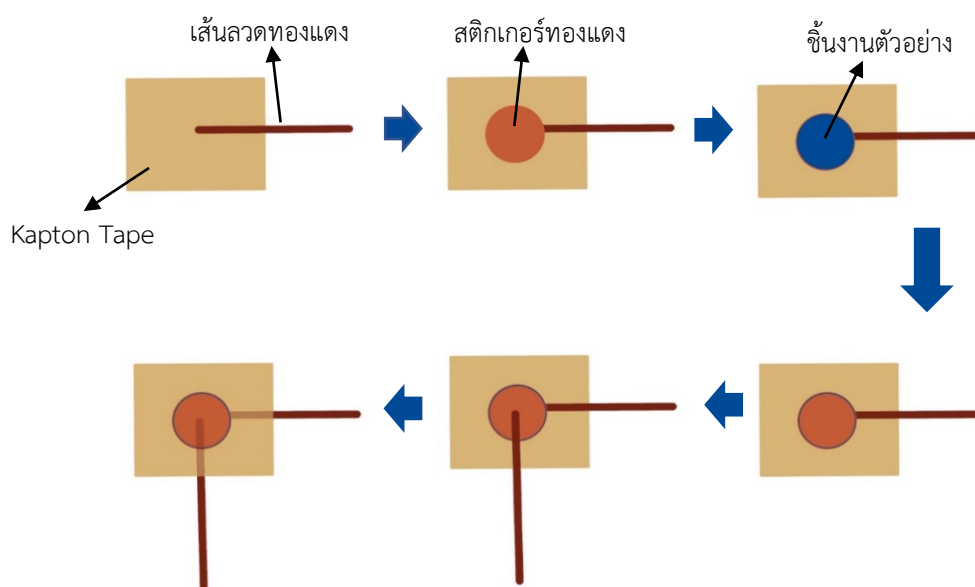
7.4 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ความเป็นผลึก ความบริสุทธิ์ของเฟส และเอกลักษณ์เฉพาะของเฟส ในงานนี้ได้มีการตรวจวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อน โดยเตรียมสารตัวอย่างปริมาณ 5 กรัม แผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) ทำโดยการตัดชิ้นงานตัวอย่างของ PDMS และ PDMS Composite เป็นขนาด 1x1 เซนติเมตร เพื่อนำไปตรวจสอบ

7.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

โดยจะทำการตรวจวัดค่าคงที่และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ของแผ่นฟิล์ม PDMS ที่ถูกเติมด้วยสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานดังนี้

1. เริ่มจากการทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง โดยทำการตัดให้มีลักษณะเป็นแผ่นกลม และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และมีความหนาประมาณ 0.2 มิลลิเมตร
2. ตัดแคปตอนเทป (Kapton Tape) แล้วทำการวางเส้นลวดทองแดงลงไปในบนแคปตอนเทป หลังจากนั้นนำสติกเกอร์ทองแดงวางให้อยู่ตรงกึ่งกลางของแคปตอนเทป
3. วางชิ้นงานตัวอย่าง และสติกเกอร์ทองแดง ตามลำดับ หลังจากนั้นนำเส้นลวดทองแดงวางในแนวตั้งฉากกับเส้นลวดด้านล่าง สุดท้ายนำแคปตอนเทปวางลงมาเป็นชั้นสุดท้าย แสดงดังภาพประกอบ 3.8



ภาพประกอบ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน เพื่อนำไปตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

7.6 การตรวจสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อตรวจสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output power) ทำโดยการตัดชิ้นงานตัวอย่างของ แผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) เป็นขนาด 3x3 เซนติเมตร เพื่อนำไปตรวจสอบ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) โดยการเติมเฟสกระจายไดอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอล ได้แก่ สารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ชนิด R_2O_3 และ $RFeO_3$ เมื่อ R คือ แลนทานัม (La), ซัมมาเรียม (Sm) และนีโอดีเมียม (Nd) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt และขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) โดยจะทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) วิเคราะห์ลักษณะทางกายของแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) ตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคในแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนด้วยกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM) และตรวจวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กทริก และค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power)

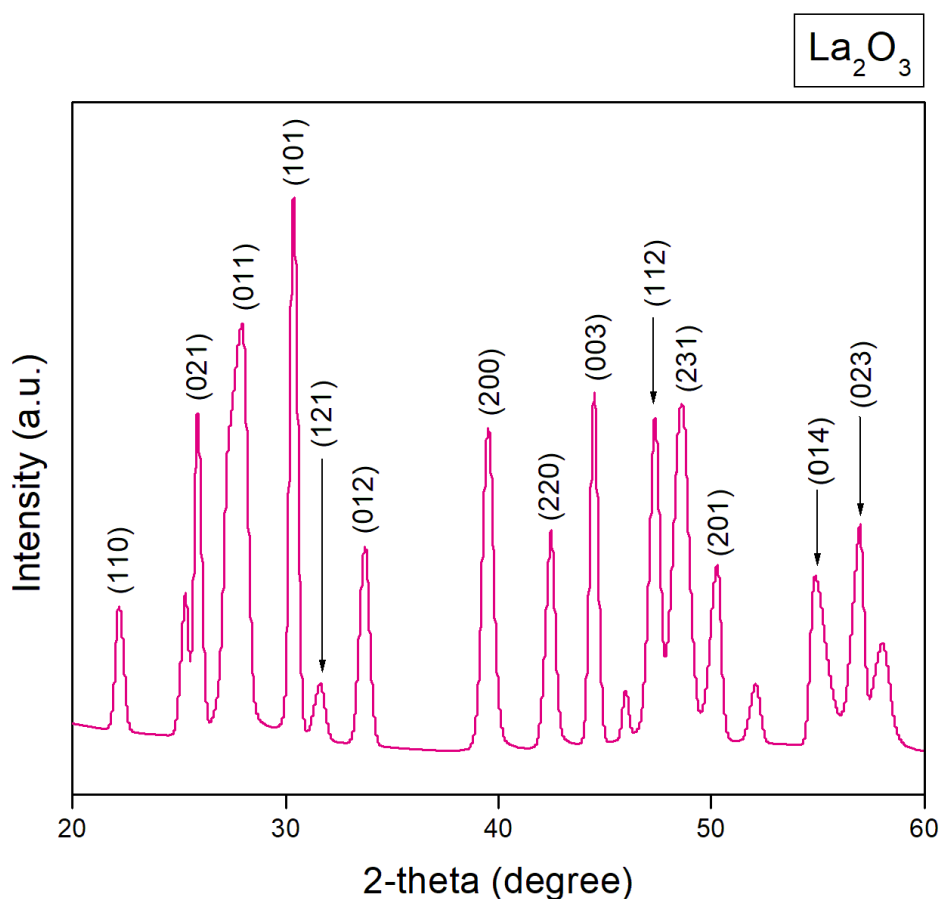
1. ผลการวิเคราะห์ของผงผลึกออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Oxide) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

1.1 ผลการวิเคราะห์ของผงผลึกออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Oxide) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

1.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของผงผลึกแลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum Oxide: La_2O_3)

จากการตรวจสอบผงผลึกแลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum Oxide: La_2O_3) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ของผงผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.1 พบว่ามีจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 22.19, 25.91, 27.94, 30.38, 31.69, 33.69, 39.48, 42.52, 44.5, 47.36, 48.58, 50.29, 54.88 และ 57.04 แทนระนาบของ (110), (021), (011), (101), (121), (012), (200), (220), (003), (112), (231), (201), (014) และ (023) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากงานวิจัยของ S. Karthikeyan และ M.

Selvapandiyan [66] ที่ทำการสังเคราะห์ผงผลึกของแลนทานัมออกไซด์ โดยตรงกับไฟล์มาตรฐาน หมายเลขที่ 50-0602 ที่มีโครงสร้างแบบ โมโนคลินิก (Monoclinic structure) $a \neq b \neq c$ โดยมีค่า lattice parameter $a = 7.7530$, $b = 16.9126$ และ $c = 9.2085$ Å ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกแลนทานัมออกไซด์

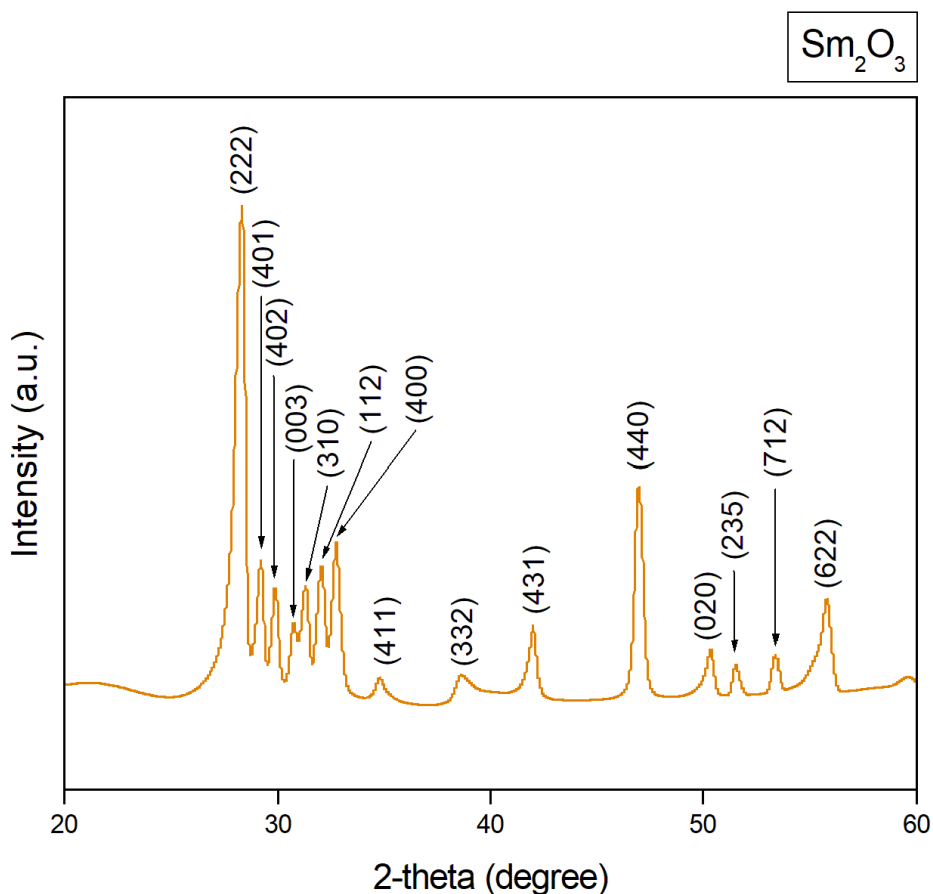


ภาพประกอบ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก La_2O_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม

1.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของผงผลึกซึมาเรียมออกไซด์ (Samarium Oxide: Sm_2O_3)

จากการตรวจสอบผงผลึกซึมาเรียมออกไซด์ (Samarium Oxide: Sm_2O_3) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ของผงผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.2 พบว่ามีจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 28.38 , 29.20 , 29.84 , 30.75 , 31.32 , 32.04 , 32.77 , 34.77 , 38.61 , 42.01 , 46.98 , 50.34 , 51.56 , 53.41 และ 55.78 แทน

ระนาบของ (222), (401), (402), (003), (310), (112), (400), (411), (332), (431), (440), (020), (235), (712) และ (622) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากงานวิจัยของ Sheng Jiang และคณะ [67] ที่ทำการสังเคราะห์ผงผลึกของซึมาเรียมออกไซด์ โดยมีโครงสร้างแบบคิวบิกผสมกับโมโนคลินิก (Cubic + Monoclinic structure) ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกซึมาเรียมออกไซด์

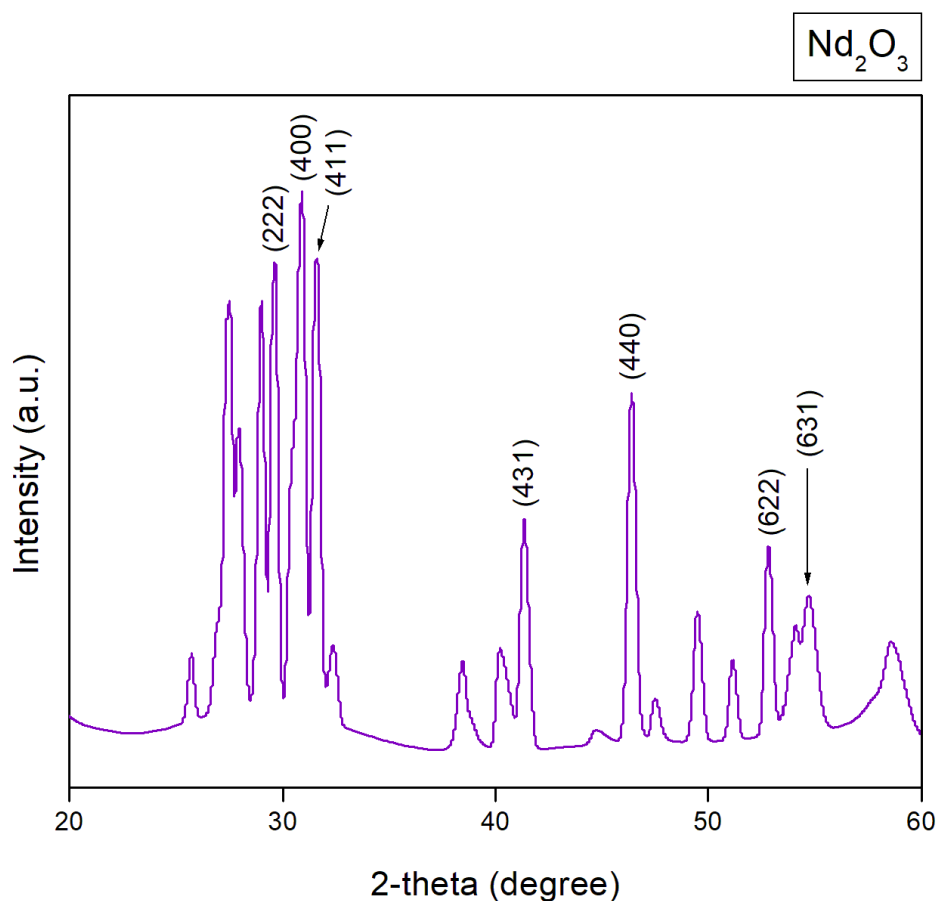


ภาพประกอบ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก Sm_2O_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม

1.1.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของผงผลึกนีโอดีเมียมออกไซด์ (Neodymium Oxide: Nd_2O_3)

จากการตรวจสอบผงผลึกนีโอดีเมียมออกไซด์ (Neodymium Oxide: Nd_2O_3) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ของผงผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.3 พบว่ามีจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 29.61° , 30.89° , 31.60° ,

41.38, 46.43, 52.83 และ 54.72 แทนระนาบของ (222), (400), (411), (431), (440), (622), และ (631) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากงานวิจัยของ S.V. Chavan และคณะ [68] ที่ทำการสังเคราะห์ผงผลึกของนีโอดีเมียมออกไซด์ โดยมีโครงสร้างแบบโมโนคลินิก (Monoclinic structure) $a \neq b \neq c$ โดยมีค่า lattice parameter $a = 11.3952$, $b = 10.2941$ และ $c = 8.3545$ Å ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกนีโอดีเมียมออกไซด์

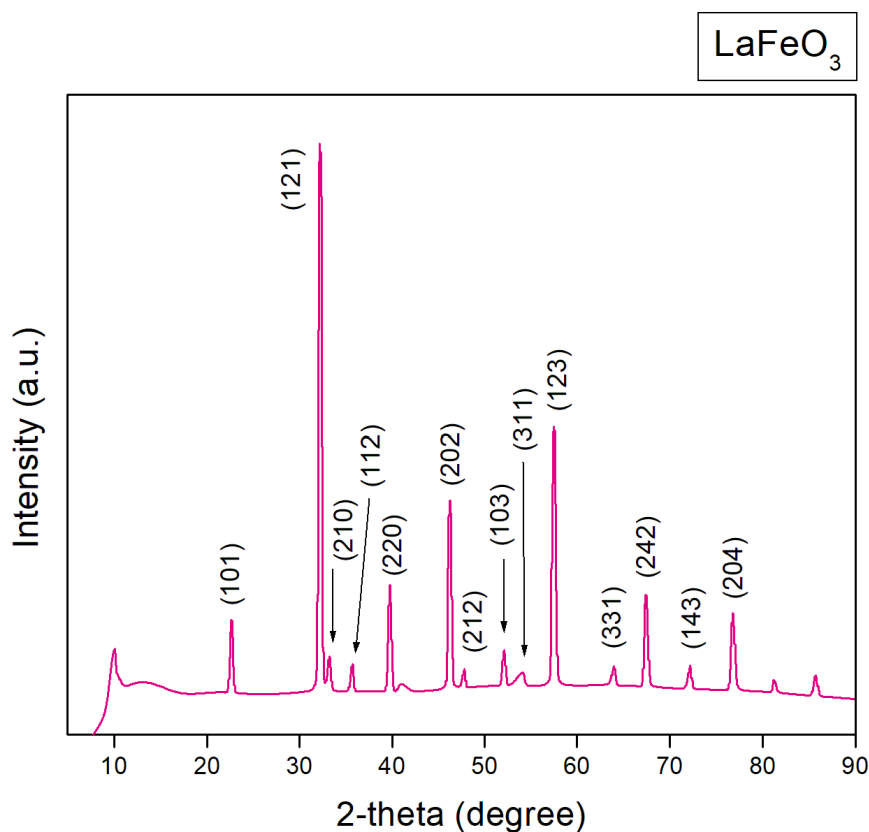


ภาพประกอบ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก Nd_2O_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม

1.2 ผลการวิเคราะห์ของผงผลึกออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

1.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของผงผลึกแลนทานัมเฟอไรต์ (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3)

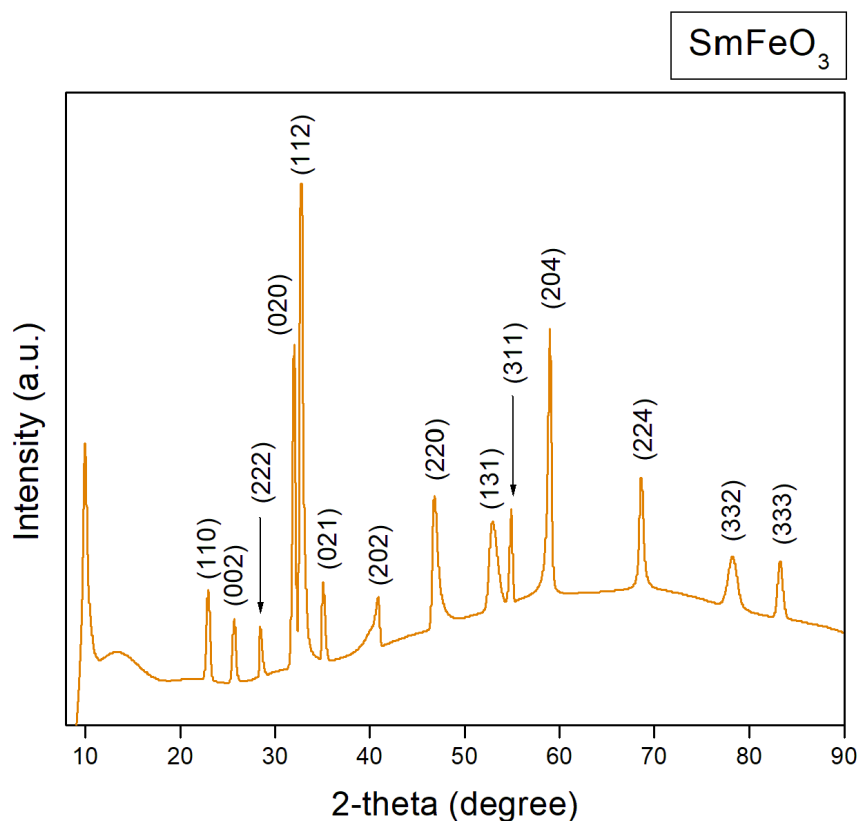
จากการตรวจสอบผงผลึกแลนทานัมเฟอไรต์ (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และเผาที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ของผงผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.4 พบว่ามีจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ $22.64, 32.20, 33.22, 35.70, 39.71, 46.23, 47.79, 52.10, 54.12, 57.51, 63.98, 67.42, 72.20$ และ 76.73 แทนระนาบของ (101), (121), (210), (112), (220), (202), (212), (103), (311), (123), (331), (242), (143) และ (204) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากงานวิจัยของ Patricia M. Pimentel และคณะ [69] ที่ทำการสังเคราะห์ผงผลึกของนีแลนทานัมเฟอไรต์ โดยตรงกับไฟล์มาตรฐานหมายเลขที่ 37-1493 ที่มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic structure) $a \neq b \neq c$ โดยมีค่า lattice parameter $a = 5.4345$, $b = 7.7848$ และ $c = 5.5080 \text{ \AA}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกแลนทานัมเฟอไรต์



ภาพประกอบ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก LaFeO_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม

1.2.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของผงผลึกซึ้มาเรียมเฟอร์ไรต์ (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3)

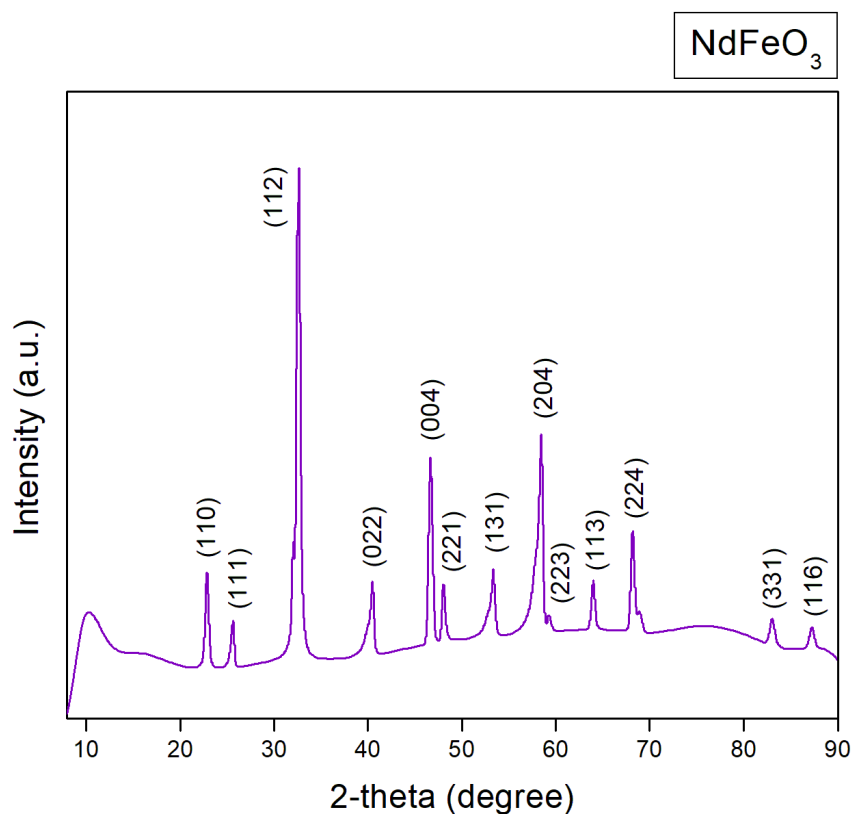
จากการตรวจสอบผงผลึกซึ้มาเรียมเฟอร์ไรต์ (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และเผาที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ของผงผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.5 พบว่ามีจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ $23.90, 25.68, 28.40, 31.98, 32.75, 35.05, 40.93, 46.83, 52.95, 54.89, 59.02, 68.56, 78.20$ และ 83.25 แทนระนาบของ $(110), (002), (222), (020), (112), (021), (202), (220), (131), (311), (204), (224), (332)$ และ (333) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากงานวิจัยของ Xin Han และคณะ [70] ที่ทำการสังเคราะห์ผงผลึกของซึ้มาเรียมเฟอร์ไรต์ โดยตรงกับไฟล์มาตรฐานหมายเลขที่ 01-074-1474 ที่มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic structure) $a \neq b \neq c$ โดยมีค่า lattice parameter $a = 5.5903$, $b = 5.8488$ และ $c = 7.8609\text{ \AA}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกซึ้มาเรียมเฟอร์ไรต์



ภาพประกอบ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก SmFeO_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม

1.2.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของผงผลึกนีโอดีเมียมเฟอไรต์ (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3)

จากการตรวจสอบผงผลึกนีโอดีเมียมเฟอไรต์ (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และเผาที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ของผงผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.6 พบว่ามีจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ $22.80, 25.59, 32.71, 40.48, 46.65, 48.02, 53.39, 58.51, 59.29, 64.02, 68.23, 83.03$ และ 87.24 เทนระนาบของ (110), (111), (112), (022), (004), (221), (131), (204), (223), (113), (224), (331) และ (116) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากงานวิจัยของ Patrícia M. Pimentel และคณะ [69] ที่ทำการสังเคราะห์ผงผลึกของนีโอดีเมียมเฟอไรต์ โดยตรงกับไฟล์มาตรฐานหมายเลขที่ 01-074-1473 มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic structure) $a \neq b \neq c$ โดยมีค่า lattice parameter $a = 5.1887$, $b = 5.6318$ และ $c = 7.3724 \text{ \AA}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกนีโอดีเมียมเฟอไรต์



ภาพประกอบ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก NdFeO_3 โดยกระบวนการตกตะกอนร่วม

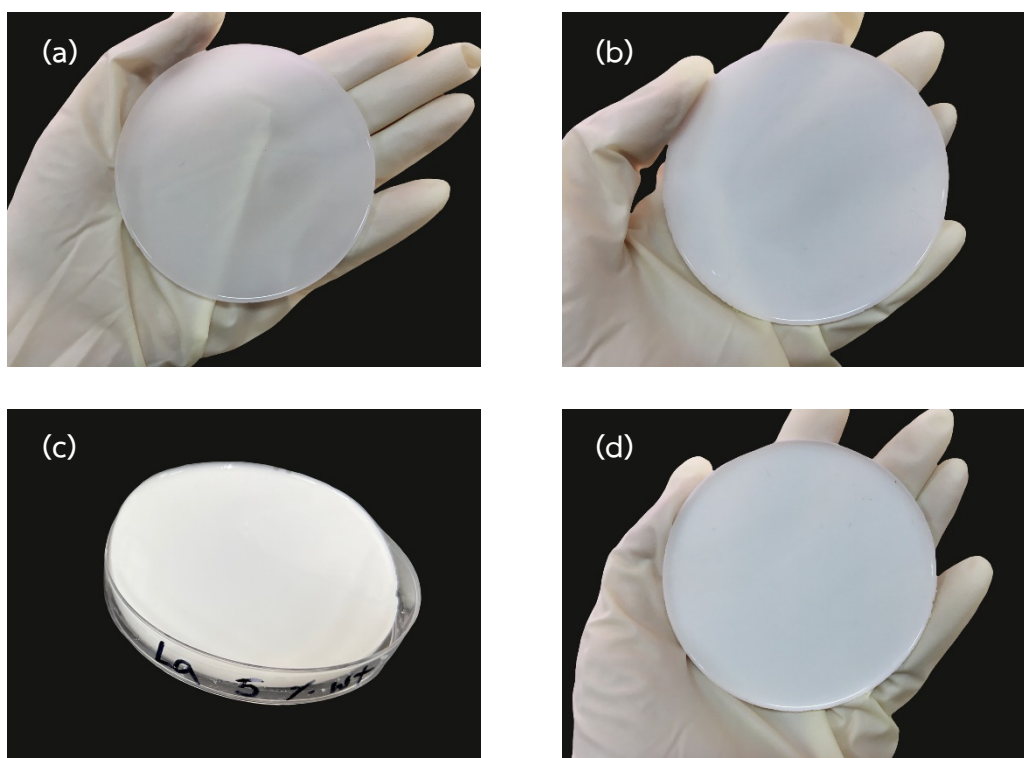
2. ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite)

2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) ที่เติมด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Oxide) ได้แก่ แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3), ซัมมาเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3) และนีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd_2O_3) และทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่ได้มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โดยพบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS ที่ได้มีลักษณะใส โปร่งแสง พื้นผิวเรียบ มีความยืดหยุ่น สามารถบิดงอได้ โดยมีความหนา 3.48 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) 8.5 เซนติเมตร และลักษณะของแผ่นฟิล์ม PDMS Composite แสดงดังตาราง 8, 9 และ 10

ตาราง 8 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย La_2O_3

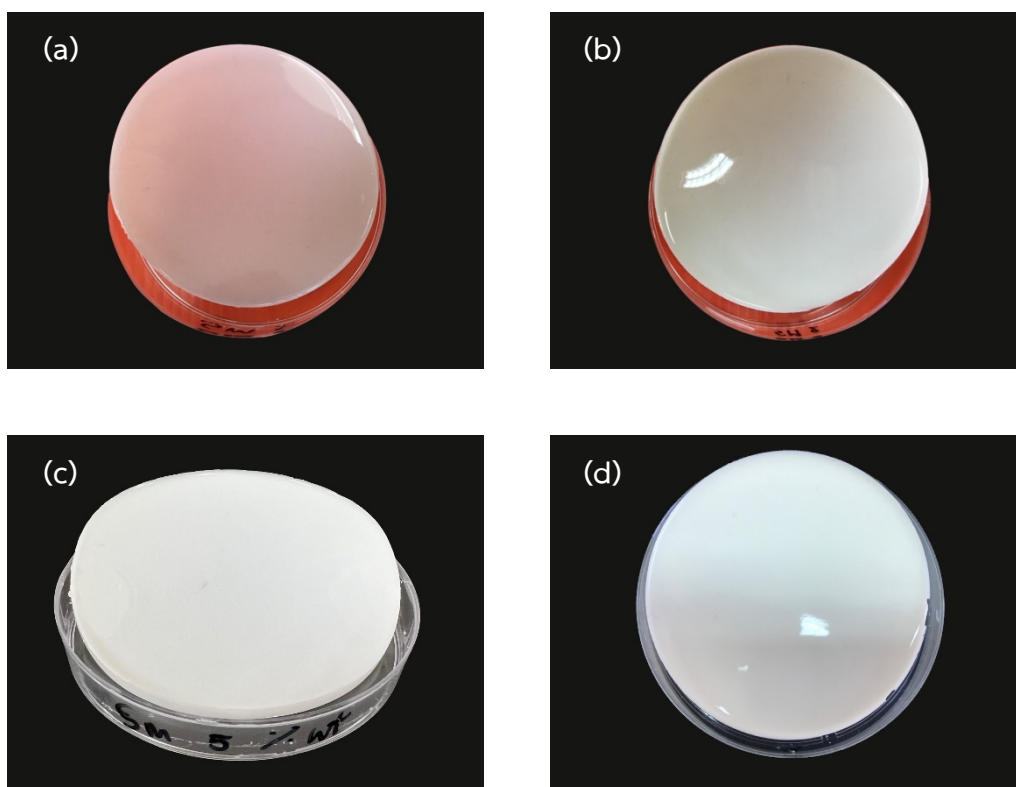
อัตราส่วนการเติม (% wt)	สี	ความ โปร่งแสง	พื้นผิว	ความ ยืดหยุ่น	ความ หนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)
0.5	ขาว	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.051	-	8.5
2.5	ขาว	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.045	-	8.5
5	ขาว	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.9	12.062	8.5
10	ขาว	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.038	12.837	8.5



ภาพประกอบ 4.7 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย La_2O_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ

ตาราง 9 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Sm_2O_3

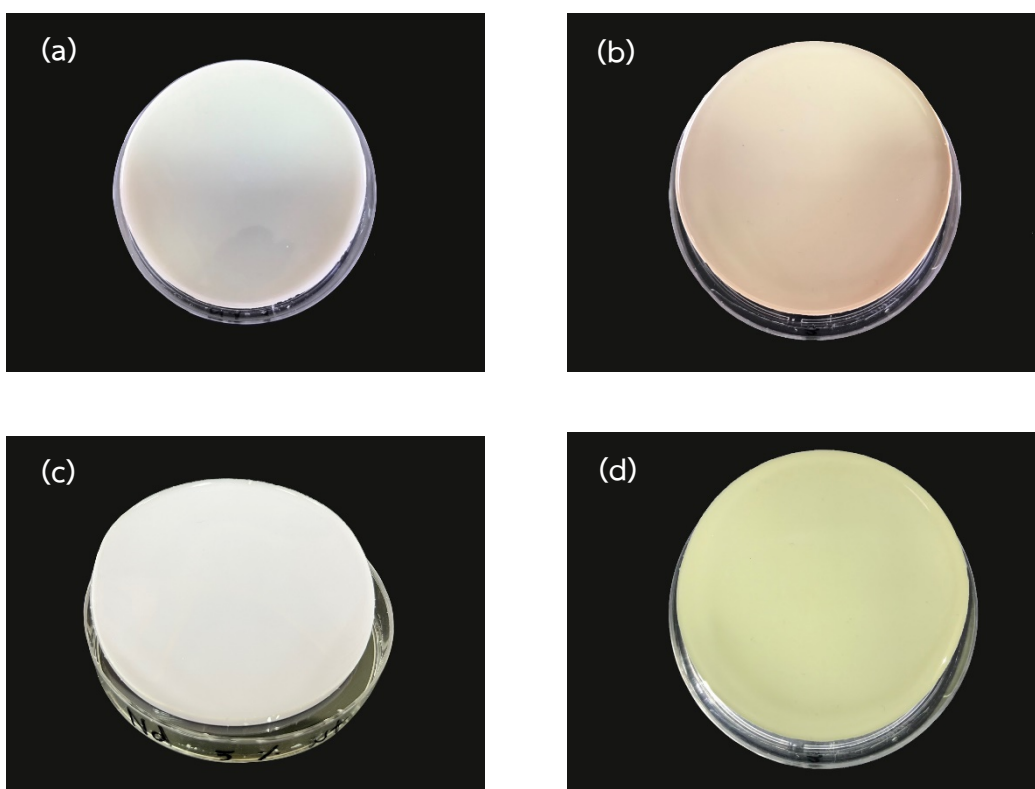
อัตราส่วนการ เติม (% wt)	สี	ความ โปร่งแสง	พื้นผิว	ความ ยืดหยุ่น	ความ หนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)
0.5	ขาว	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.009	11.494	8.5
2.5	ขาว	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.995	11.873	8.5
5	ขาว	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.9	12.381	8.5
10	เหลือง	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.315	12.907	8.5



ภาพประกอบ 4.8 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Sm_2O_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ

ตาราง 10 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Nd_2O_3

อัตราส่วนการ เติม (% wt)	สี	ความ โปร่งแสง	พื้นผิว	ความ ยืดหยุ่น	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)
0.5	ขาว	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.416	11.668	8.5
2.5	เขียวขี้ม้า	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.086	11.938	8.5
5	ม่วง	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.95	12.319	8.5
10	เขียวขี้ม้า	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.080	12.996	8.5



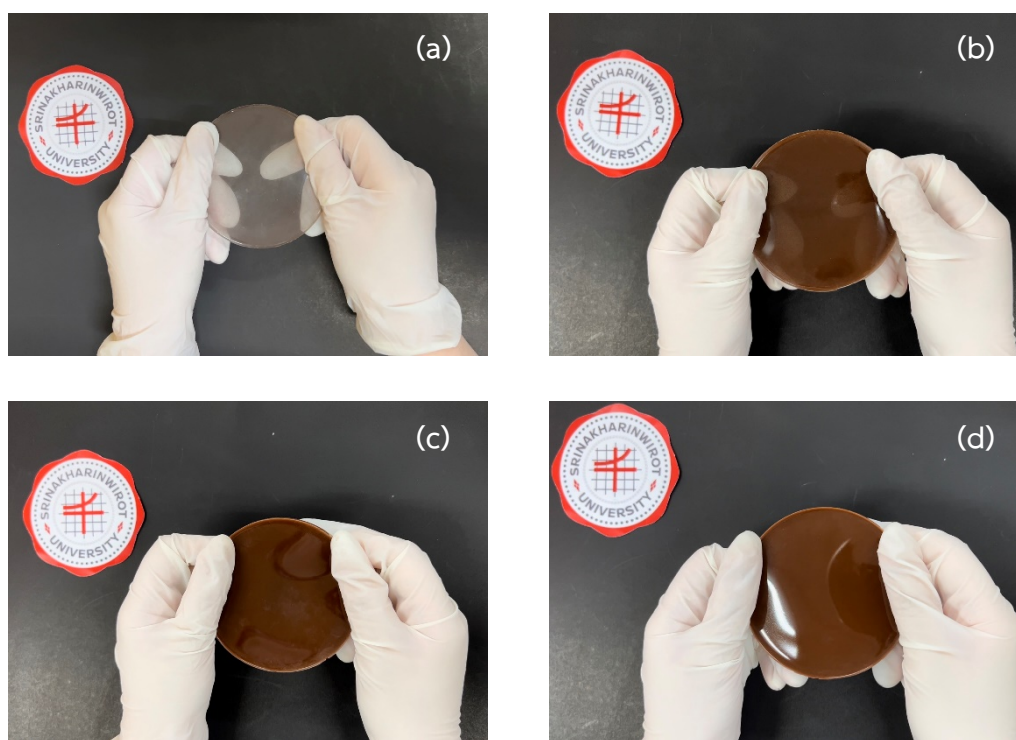
ภาพประกอบ 4.9 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Nd_2O_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ

2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide)

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) ที่เติมด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide) ได้แก่ แลนทานัมเฟอเรต (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอเรต (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3) และทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่ได้มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โดยลักษณะของแผ่นฟิล์ม PDMS Composite แสดงดังตาราง 11, 12 และ 13

ตาราง 11 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย LaFeO_3

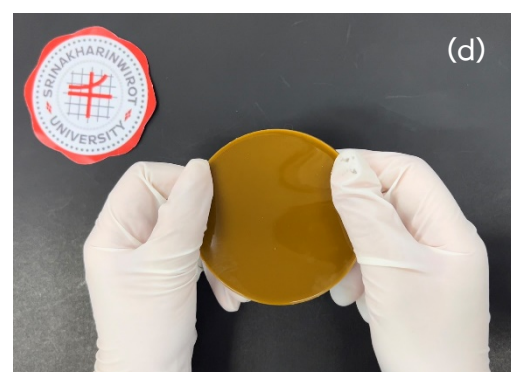
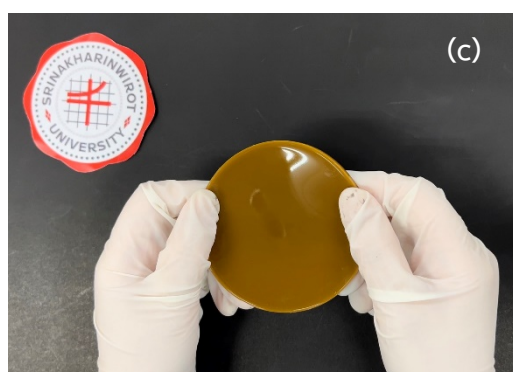
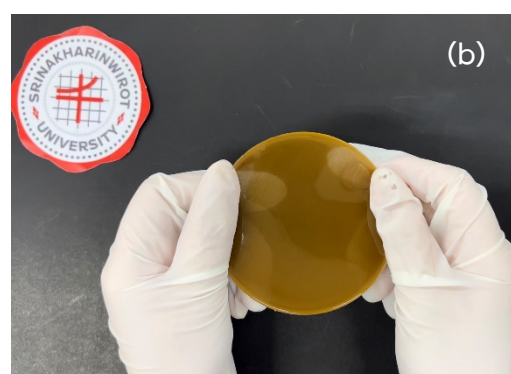
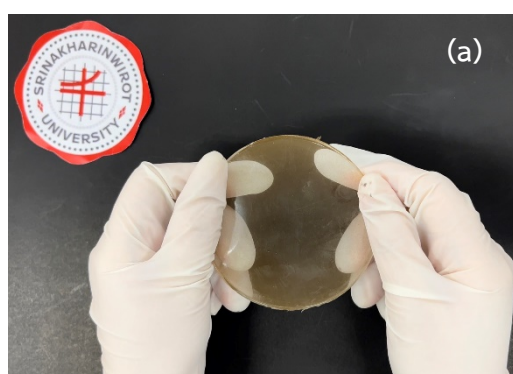
อัตราส่วนการ เติม (% wt)	สี	ความ โปร่งแสง	พื้นผิว	ความ ยืดหยุ่น	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)
0.5	น้ำตาล	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2	11.668	8.5
2.5	น้ำตาล	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.9	11.866	8.5
5	น้ำตาล	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.937	12.179	8.5
10	น้ำตาล	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.925	12.968	8.5



ภาพประกอบ 4.10 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย LaFeO_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ

ตาราง 12 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย SmFeO_3

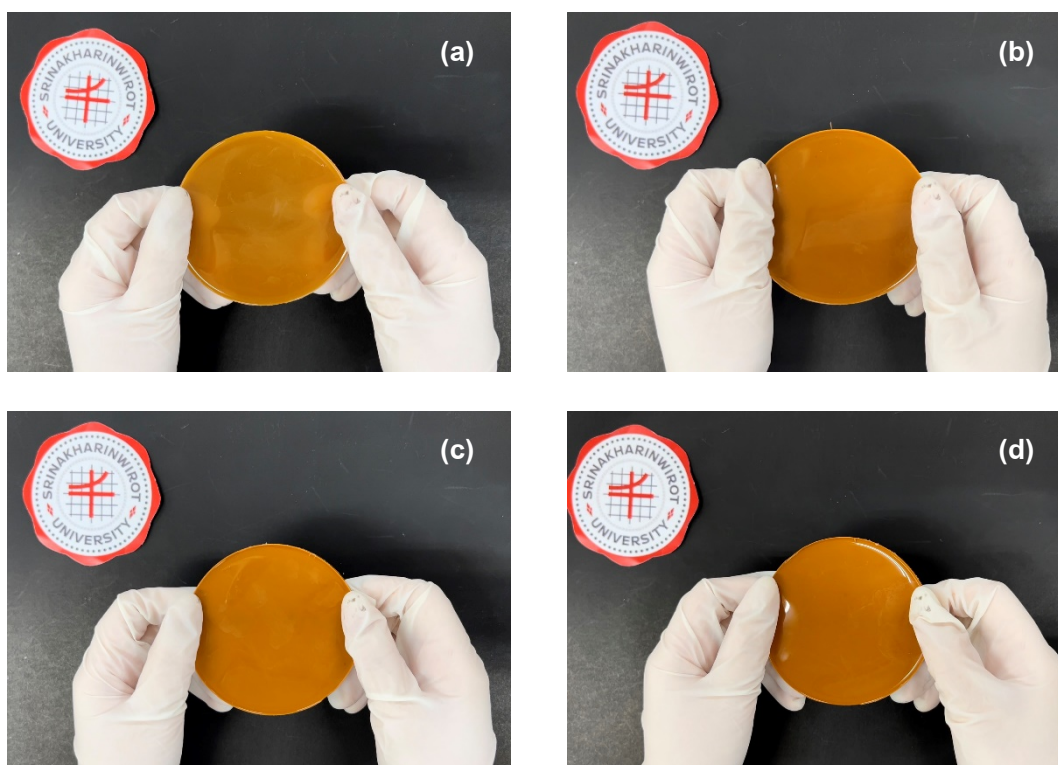
อัตราส่วน การเติม (% wt)	สี	ความ โปร่งแสง	พื้นผิว	ความ ยืดหยุ่น	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)
0.5	น้ำตาลเขี้ยว	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.938	11.595	8.5
2.5	น้ำตาลเขี้ยว	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.913	11.871	8.5
5	น้ำตาลเขี้ยว	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.95	12.364	8.5
10	น้ำตาลเขี้ยว	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	1.875	12.629	8.5



ภาพประกอบ 4.11 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย SmFeO_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ

ตาราง 13 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย NdFeO_3

อัตราส่วนการ เติม (% wt)	สี	ความ โปร่งแสง	พื้นผิว	ความ ยืดหยุ่น	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)
0.5	น้ำตาลส้ม	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2	11.440	8.5
2.5	น้ำตาลส้ม	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.05	11.831	8.5
5	น้ำตาลส้ม	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.325	12.325	8.5
10	น้ำตาลส้ม	ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่น	2.138	12.744	8.5

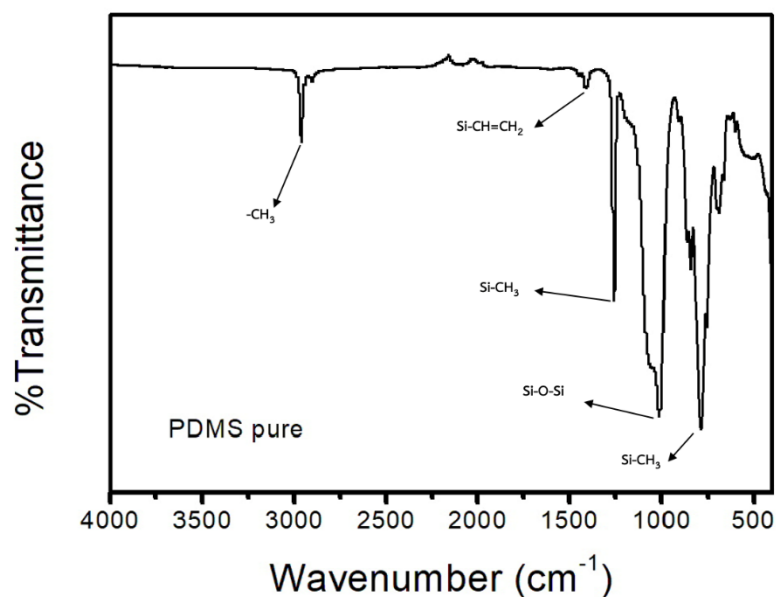


ภาพประกอบ 4.12 แผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย NdFeO_3 ที่อัตราส่วน (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt (c) 5 % wt และ (d) 10 % wt ตามลำดับ

3. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนบริสุทธิ์ (PDMS pure)

จากการนำแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซนบริสุทธิ์ (PDMS pure) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ ตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $4000-400\text{ cm}^{-1}$ แสดงตามภาพประกอบ 4.13 ปรากฏพิกการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 2970 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ -CH_3 group และพิกการดูดกลืนที่ 1440 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-CH=CH_2 group และพิกการดูดกลืนที่ 1260 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบหดงอสมมาตร (Symmetric bending) ของพันธะ Si-CH_3 group และพิกการดูดกลืนที่ 1000 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-O-Si group และพิกการดูดกลืนที่ 810 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด ของพันธะ Si-CH_3 group ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 14 จากการวิเคราะห์แผ่นฟิล์ม PDMS pure ที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบพบว่าแผ่นฟิล์มมีความบริสุทธิ์ เนื่องจากปรากฏพิกการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันสอดคล้องกับพิกการดูดกลืนจากข้อมูลงานวิจัยของ Stafie และคณะ [71] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ PDMS แสดงภาพประกอบดังภาคผนวก จึงสามารถยืนยันได้ว่า PDMS pure ที่ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม PDMS ไม่พบหมู่ฟังก์ชันของเฟสอื่นเจือปน



ภาพประกอบ 4.13 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS pure

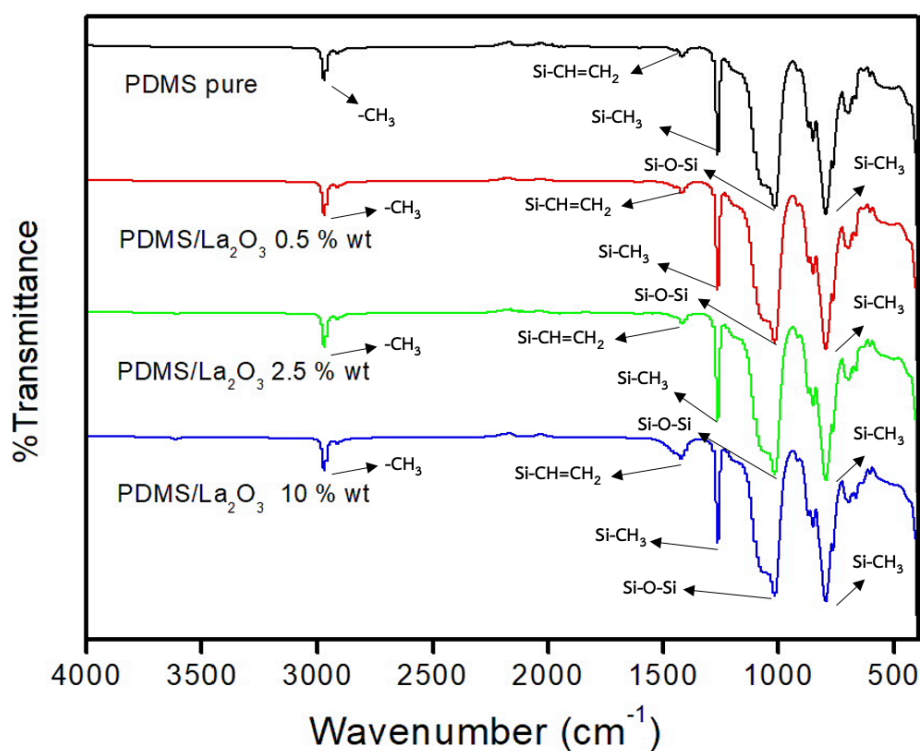
ตาราง 14 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแผ่นฟิล์ม PDMS pure

Wavenumber (cm ⁻¹)	Vibration type	Functional group
2970	Stretching	-CH ₃ group
1440	Stretching	Si-CH=CH ₂ group
1260	Symmetric bending	Si-CH ₃ group
1000	Stretching	Si-O-Si group
810	Stretching	Si-CH ₃ group

3.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ของ แผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ (Rare Earth Oxide)

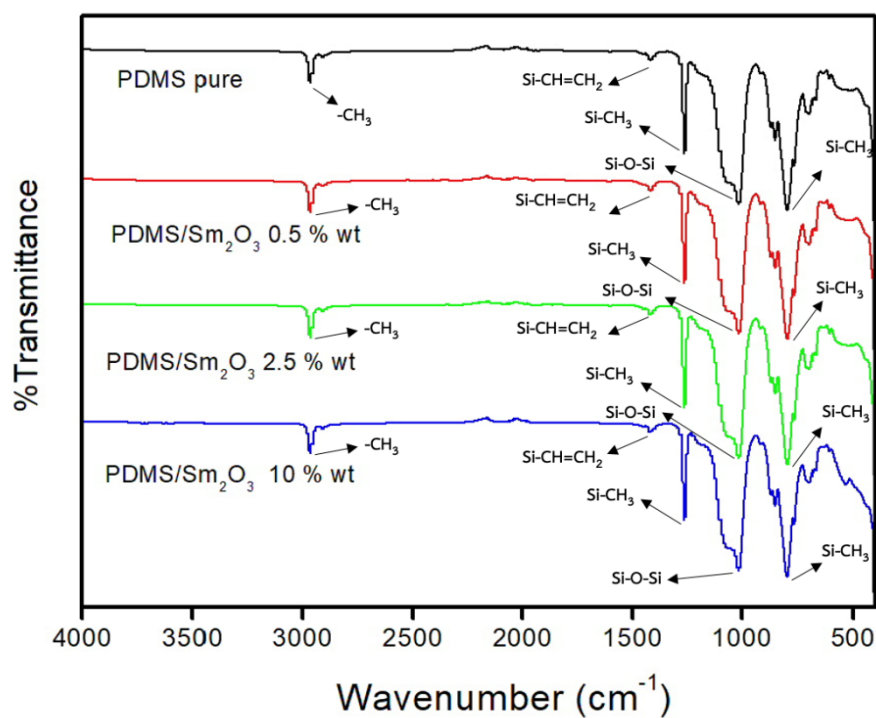
จากการนำแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum Oxide: La₂O₃), ซัมมาเรียมออกไซด์ (Samarium Oxide: Sm₂O₃) และนีโอดิเมียมออกไซด์ (Neodymium Oxide: Nd₂O₃) ตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)

โดยแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบแลนทานัมออกไซด์ (PDMS/La₂O₃) จะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5 และ 10 % wt ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 4.14 โดยตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 4000-400 cm⁻¹ ปรากฏพีกการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 2970 cm⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ -CH₃ group และพีกการดูดกลืนที่ 1440 cm⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-CH=CH₂ group และพีกการดูดกลืนที่ 1260 cm⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบหดอสมมาตร (Symmetric bending) ของพันธะ Si-CH₃ group และพีกการดูดกลืนที่ 1000 cm⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-O-Si group และพีกการดูดกลืนที่ 810 cm⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด ของพันธะ Si-CH₃ group ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 15 จากผลการวิเคราะห์แผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะปรากฏพีกการสั่นของพันธะระหว่างพันธะโลหะ (Metallic) กับออกไซด์ ไม่พบหมู่ฟังก์ชันอื่น แต่จากการตรวจสอบพบว่าการสั่นของพันธะระหว่างพันธะโลหะกับออกไซด์ยังไม่ปรากฏพีก เนื่องจากระยะการดูดกลืนหรือช่วงเลขคลื่นของการดูดกลืนของพันธะอยู่ต่ำกว่าที่เครื่องมือจะตรวจสอบได้ และพีกลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์ม PDMS ที่เติม La₂O₃ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากแผ่นฟิล์ม PDMS pure จึงยืนยันได้ว่าเฟสหลักของแผ่นฟิล์ม PDMS composite ยังคงเป็น PDMS

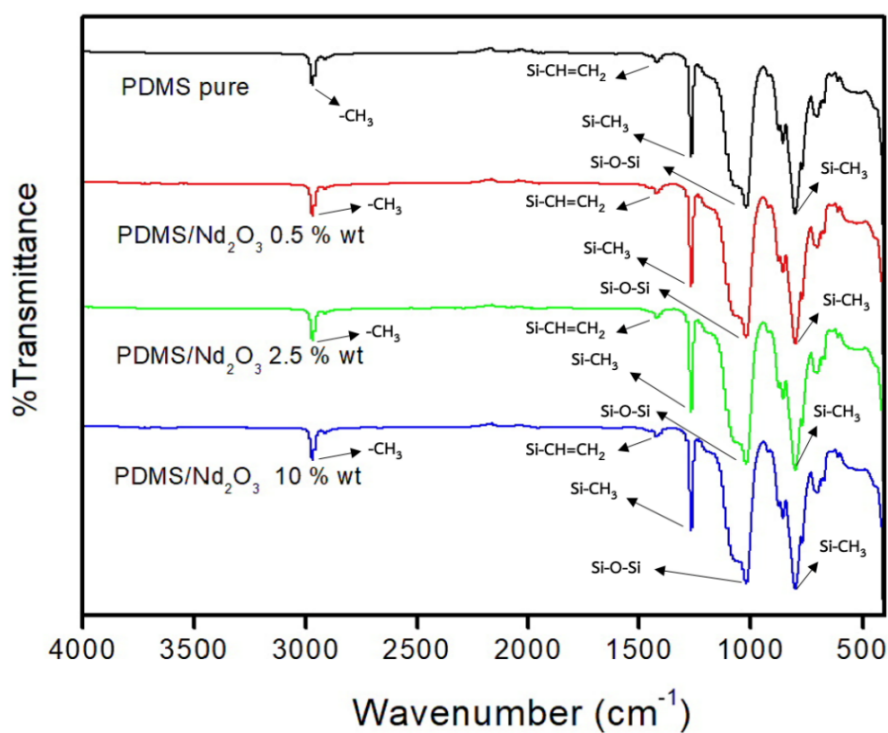


ภาพประกอบ 4.14 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃

และจากการนำแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบซัมาเรียมออกไซด์ (PDMS/Sm₂O₃) และฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ (PDMS/Nd₂O₃) มาตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 4000-400 cm⁻¹ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารประกอบที่ 0.5, 2.5 และ 10 % wt ตามลำดับ โดยแผ่นฟิล์ม PDMS/Sm₂O₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.15 และแผ่นฟิล์ม PDMS/Nd₂O₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.16



ภาพประกอบ 4.15 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/Sm₂O₃



ภาพประกอบ 4.16 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/Nd₂O₃

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS/ Sm_2O_3 และแผ่นฟิล์ม PDMS/ Nd_2O_3 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ไม่ปรากฏพีคการสั่นของพันธะอื่นๆ เนื่องจากระยะการดูดกลืนของพันธะอยู่ต่ำเกินไปกว่าที่เครื่องมือจะตรวจสอบได้เช่นกัน จึงยืนยันได้ว่าเฟสหลักของแผ่นฟิล์ม PDMS/ Sm_2O_3 และแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PDMS/ Nd_2O_3 ยังคงเป็น PDMS สามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการคอมโพสิตโดยการเติมเฟสไดอิเล็กทริกลงไป ไม่ปรากฏพีคการสั่นของพันธะอื่นๆ นอกจากพีคการสั่นของ PDMS เนื่องจากการดูดกลืนของพันธะอยู่ต่ำเกินไปกว่าที่เครื่องมือจะตรวจสอบได้ และตัวอย่างที่ทำการเติมเฟสไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ La_2O_3 , Sm_2O_3 และ Nd_2O_3 ยังคงเฟสหลักเป็น PDMS จึงต้องใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อตรวจสอบเพิ่มเติม

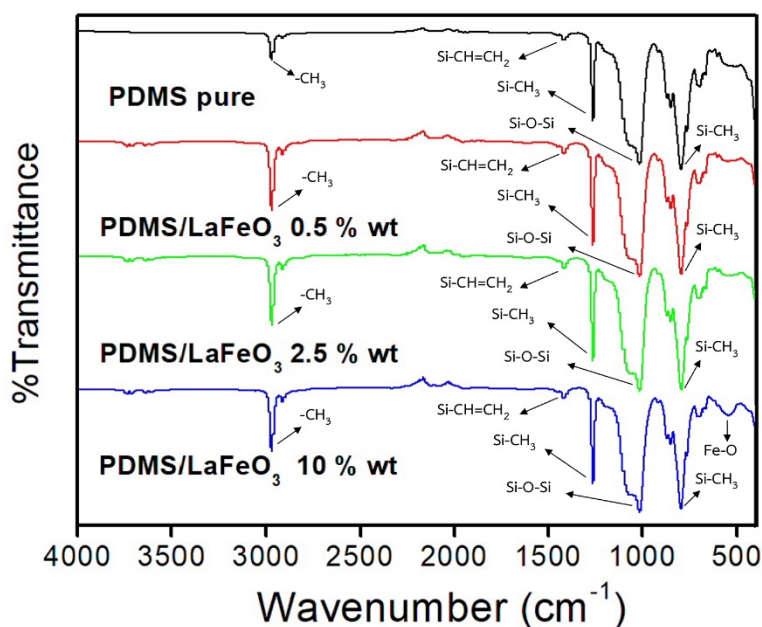
ตาราง 15 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบ La_2O_3 , Sm_2O_3 และ Nd_2O_3

Wavenumber (cm^{-1})	Vibration type	Functional group
2970	Stretching	$-\text{CH}_3$ group
1440	Stretching	$\text{Si}-\text{CH}=\text{CH}_2$ group
1260	Symmetric bending	$\text{Si}-\text{CH}_3$ group
1000	Stretching	$\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ group
810	Stretching	$\text{Si}-\text{CH}_3$ group

3.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide)

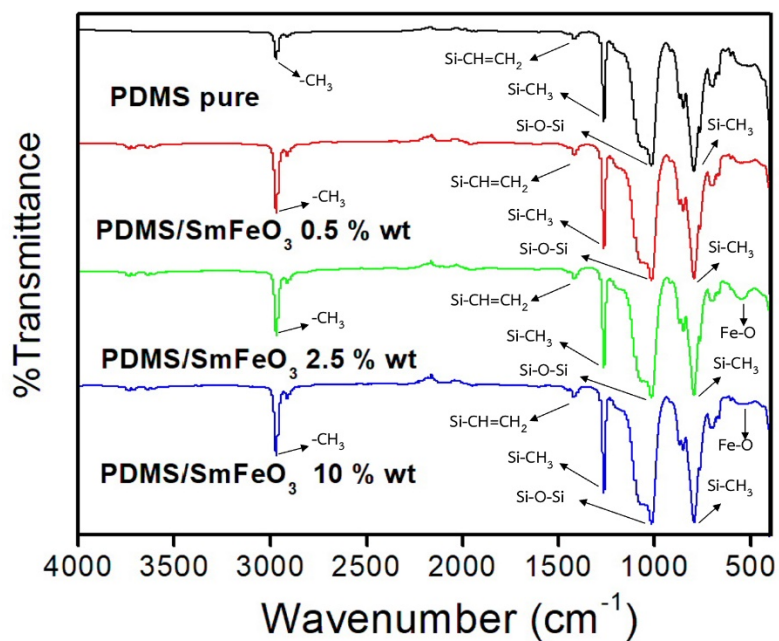
จากการนำแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แลนทานัมเฟอร์ไรต์ (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอร์ไรต์ (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) และนีโอดิเมียมเฟอร์ไรต์ (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3) ตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) โดยแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบแลนทานัมเฟอร์ไรต์ (PDMS/ LaFeO_3) จะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5 และ 10 % wt ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 4.17 โดยตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 2970 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด

(Stretching) ของพันธะ -CH_3 group และพีคการดูดกลืนที่ 1440 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-CH=CH_2 group และพีคการดูดกลืนที่ 1260 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบหดอสมมาตร (Symmetric bending) ของพันธะ Si-CH_3 group และพีคการดูดกลืนที่ 1000 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-O-Si group และพีคการดูดกลืนที่ 810 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-CH_3 group และพีคการดูดกลืนที่ 550 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Fe oxide ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 16 ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลพบว่าเฟสหลักยังคงเป็น PDMS เช่นเดียวกับ PDMS composite กับ วัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามในการเติม LaFeO_3 ปรากฏพีคการดูดกลืน perovskite ของ Fe oxide จึงสามารถยืนยันการทำคอมโพสิตได้

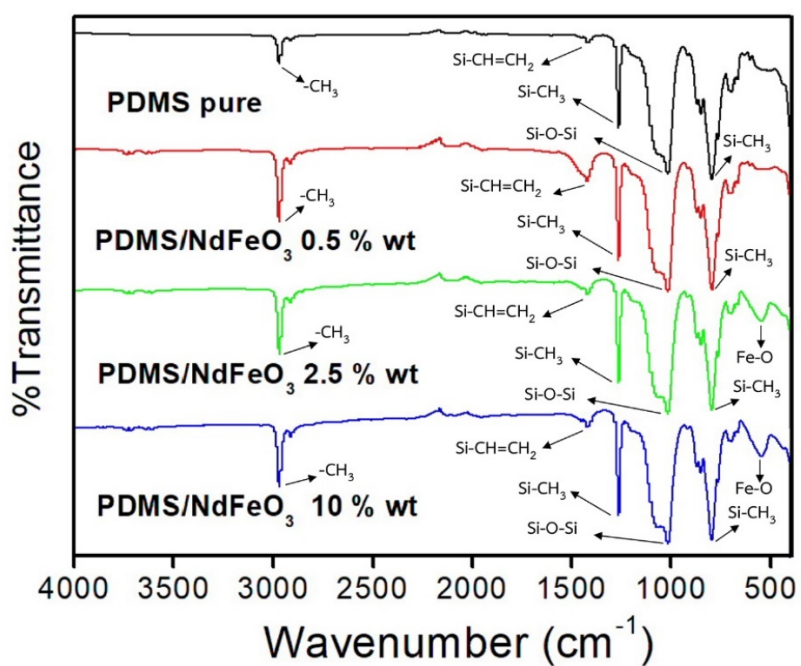


ภาพประกอบ 4.17 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO₃

และจากการนำแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบซึ่มมาเรียมเฟอร์เรต (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) และฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบนีโอดีเมียมเฟอร์เรต (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3) มาตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารประกอบที่ 0.5, 2.5 และ 10 % wt ตามลำดับ โดยแผ่นฟิล์ม PDMS/ SmFeO_3 แสดงดังภาพประกอบ 4.18 และแผ่นฟิล์ม PDMS/ NdFeO_3 แสดงดังภาพประกอบ 4.19



ภาพประกอบ 4.18 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO₃



ภาพประกอบ 4.19 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO₃

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO₃ และแผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO₃ พบว่าเฟสหลักยังคงเป็น PDMS เช่นเดียวกับ PDMS composite กับ วัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ และ PDMS/LaFeO₃ แต่อย่างไรก็ตามใน PDMS/SmFeO₃ และ PDMS/NdFeO₃ ปรากฏพีคการดูดกลืน perovskite ของ Fe oxide เช่นเดียวกัน จึงสามารถยืนยันการทำคอมโพสิตระหว่าง PDMS ที่เติมด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบได้ในเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

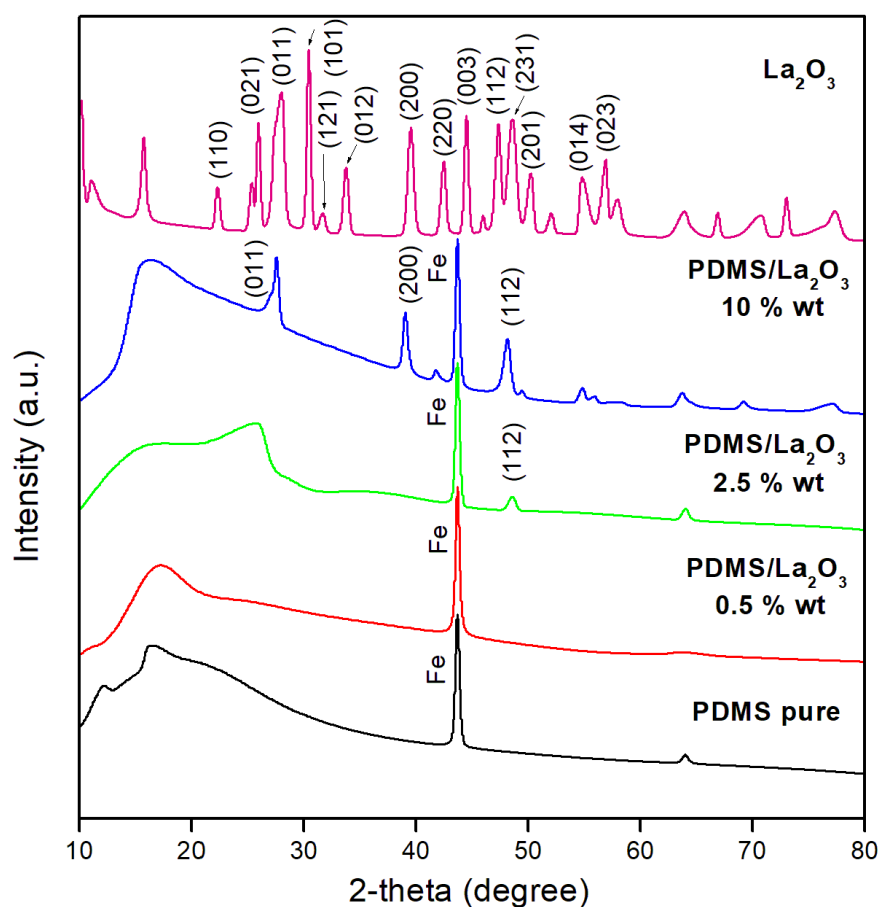
ตาราง 16 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบ LaFeO₃, SmFeO₃ และ NdFeO₃

Wavenumber (cm ⁻¹)	Vibration type	Functional group
2970	Stretching	-CH ₃ group
1440	Stretching	Si-CH=CH ₂ group
1260	Symmetric bending	Si-CH ₃ group
1000	Stretching	Si-O-Si group
810	Stretching	Si-CH ₃ group
550	Stretching	Fe oxide

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

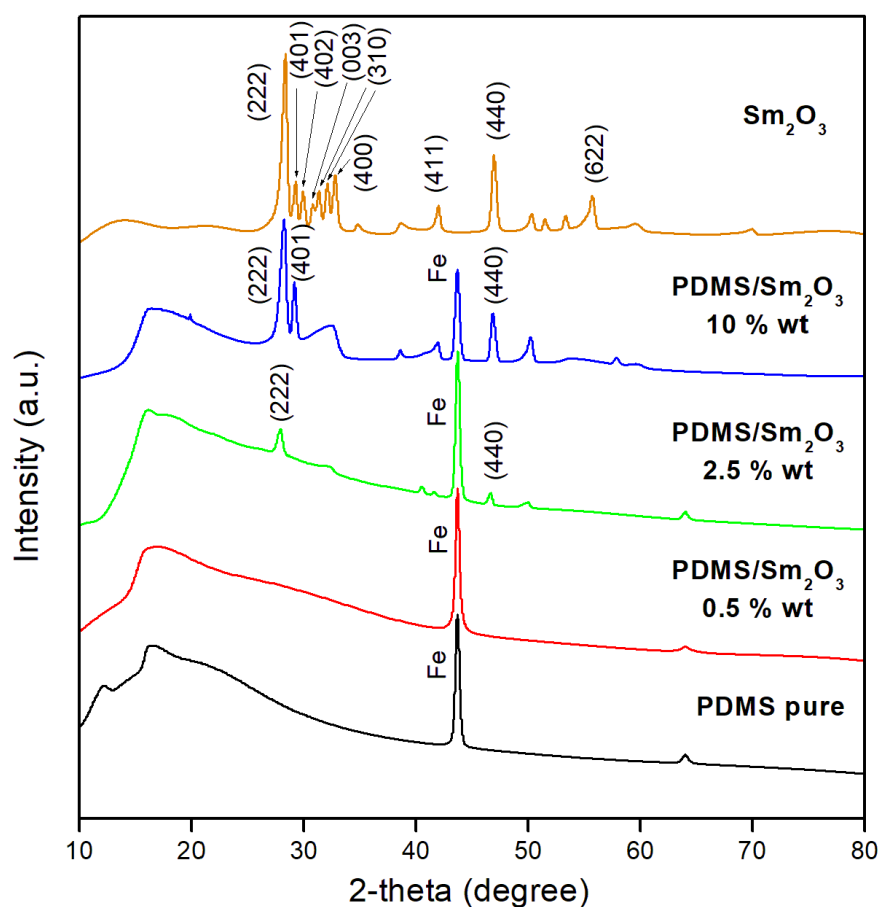
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Oxide)

จากการนำแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS Composite) ที่เติมสารประกอบแลนทานัมออกไซด์ (PDMS/La₂O₃) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt ตามลำดับ ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ และตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.20 ปรากฏพีคของ Fe เนื่องจากเป็นแผ่นรองที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่าง และจากการวิเคราะห์พบว่า PDMS pure พบ broad พีค บริเวณองศาที่ 12-22 ซึ่งเป็นพีคของ amorphous PDMS และเมื่อปริมาณการเติมสารประกอบแลนทานัมออกไซด์ (La₂O₃) เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน 2.5 % wt จะปรากฏจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 48.65 แทนระนาบของ (112) และที่อัตราส่วน 10 % wt ปรากฏจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 27.49, 39.06 และ 48.23 แทนระนาบ (011), (200) และ (112) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ La₂O₃ จึงสามารถยืนยันการทำคอมโพสิตระหว่าง PDMS ที่เติมด้วย La₂O₃ ได้



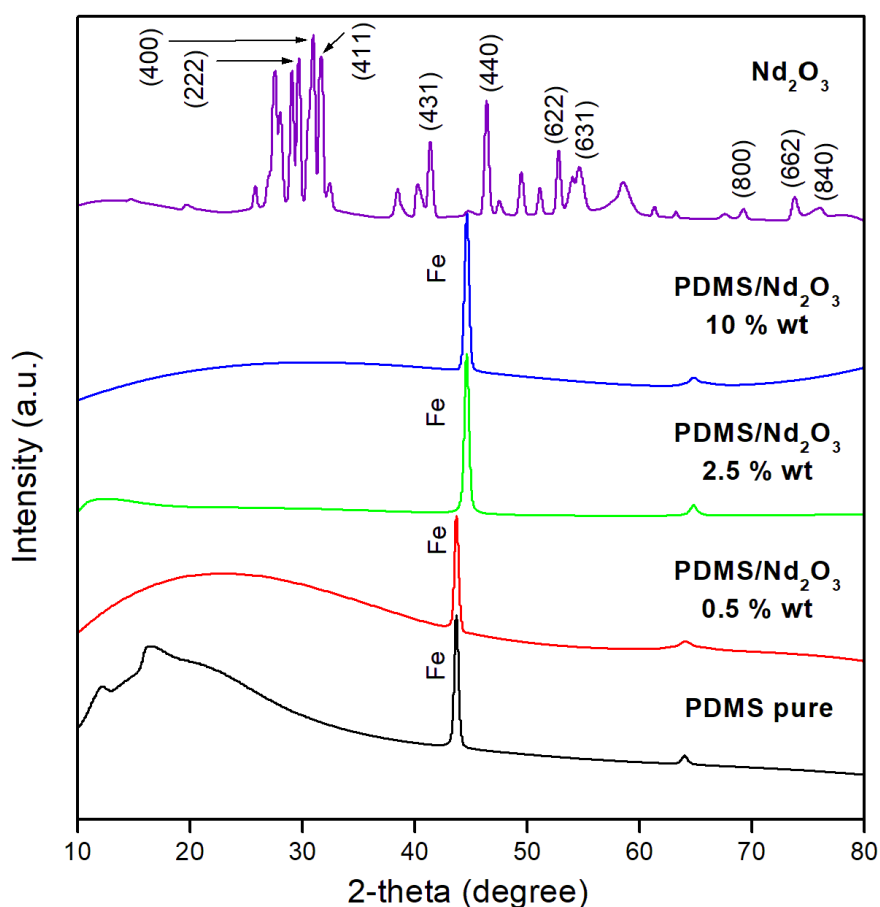
ภาพประกอบ 4.20 แสดงพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นฟิล์ม PDMS/ La_2O_3

และจากการนำแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบซึมาเรียมออกไซด์ ($\text{PDMS}/\text{Sm}_2\text{O}_3$) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt ตามลำดับ ตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อระบุโครงสร้างผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.21 ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของสารประกอบ Sm_2O_3 เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเมื่อปริมาณการเติมสารประกอบซึมาเรียมออกไซด์ ($\text{PDMS}/\text{Sm}_2\text{O}_3$) เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน 2.5 % wt จะปรากฏจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 27.85 และ 46.66 เทนระนาบของ (222) และ (440) และที่อัตราส่วน 10 % wt จะปรากฏจุดเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 28.20, 29.08 และ 46.88 เทนระนาบของ (222), (401) และ (440) ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ Sm_2O_3 ซึ่งแสดงให้เห็นความสำเร็จในการทำคอมโพสิตระหว่าง PDMS ที่เติมด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์



ภาพประกอบ 4.21 แสดงผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นฟิล์ม $\text{PDMS}/\text{Sm}_2\text{O}_3$

และจากการนำแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ ($\text{PDMS}/\text{Nd}_2\text{O}_3$) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt ตามลำดับ ตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อระบุโครงสร้างผลึก แสดงดังภาพประกอบ 4.22 พบว่าไม่ปรากฏผลการเลี้ยวเบนของสารประกอบของ Nd_2O_3 เกิดขึ้น เนื่องจาก Substrate ที่ใช้เป็นเหล็ก (Fe) จึงมีความเข้มข้น (Intensity) สูง และในการทำ PDMS Composite เฟสหลักที่จะพบ คือ PDMS ซึ่งมีโครงสร้างอสัณฐาน จึงพบ broad พีคขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อปริมาณ Nd_2O_3 น้อย และความเป็นผลึกต่ำ จึงทำให้ไม่พบพีคของ Nd_2O_3



ภาพประกอบ 4.22 แสดงผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นฟิล์ม $\text{PDMS/Nd}_2\text{O}_3$

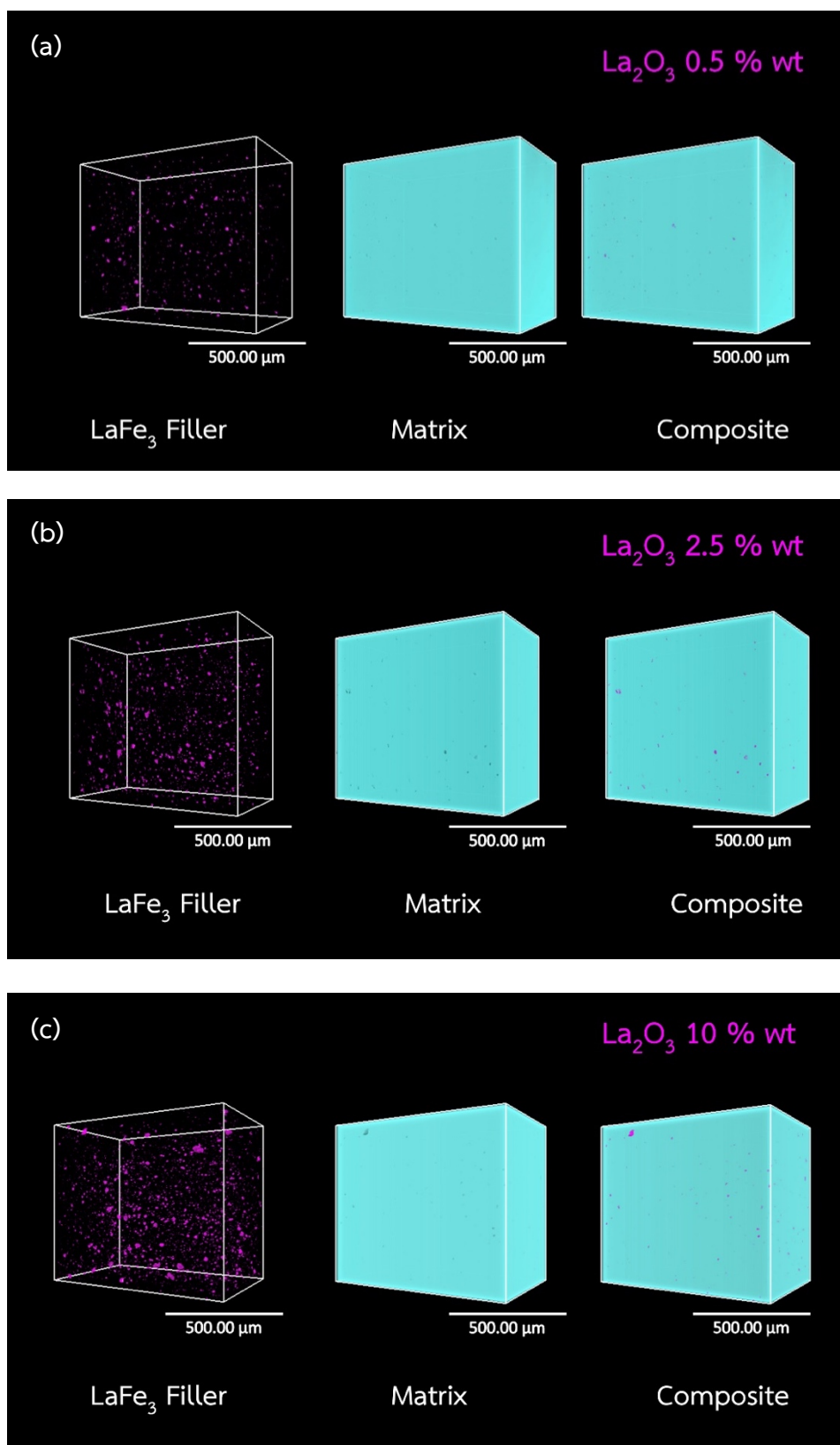
5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM)

การตรวจสอบแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM) เพื่อใช้ในการสร้างภาพสามมิติของการกระจายตัวของเฟสกระจายในตัวอย่างหรือในเมทริกพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Matrix PDMS) ซึ่งจะเห็นการกระจายตัวของเฟสกระจายในเนื้อของ PDMS หลังจากนั้นนำไปเข้าโปรแกรมที่สามารถแยกเฟสได้อย่างชัดเจน เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคว่าอยู่ส่วนใดใน PDMS Composite และเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของเฟสกระจายที่เติมลงใน PDMS Composite

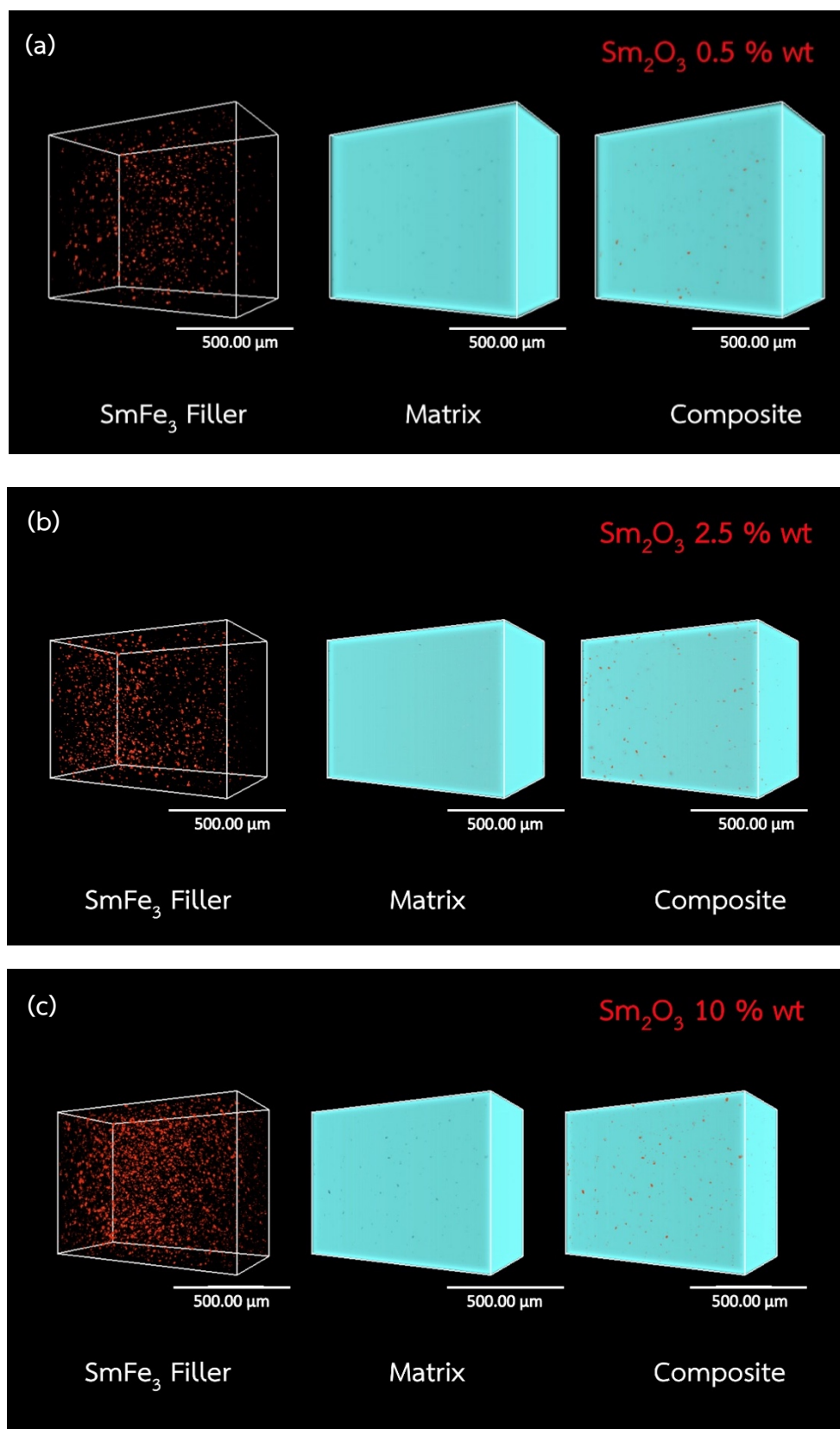
5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดออกไซด์กลุ่มสารประกอบออกไซด์ (Rare Earth Oxide)

จากการตรวจสอบ PDMS Composite ที่เติมด้วยกลุ่มของ Rare Earth Oxide ได้แก่ PDMS Composite ที่เติมด้วยแลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.23 โดยแลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) ที่อัตราส่วน 0.5 % wt ผลที่ได้พบว่าภาพทางขวามือแสดงการ composite ที่ประกอบไปด้วยเฟสสีฟ้าคือ Matrix PDMS และเฟสกระจายสีชมพูคือ La_2O_3 แสดงดังภาพประกอบ 4.23 (a) ซึ่งจากภาพจะเห็นการกระจายตัวของ La_2O_3 ในเนื้อของ PDMS โดยภาพกลางแยกเป็นเมทริกอย่างเดี่ยว จะเห็นเมทริกมีลักษณะเป็นเนื้อแน่นอยู่ในคอมโพสิตและเม็ดสีชมพูจะแสดงให้เห็นถึงเฟสกระจายแลนทานัมออกไซด์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณของตัวอย่าง และเมื่อทำการตรวจสอบ XTM ในตัวอย่างที่เพิ่มอัตราส่วนแลนทานัมออกไซด์จาก 0.5 เป็น 2.5 และ 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.23 (b) และ (c) แสดงให้เห็นการกระจายตัวของเฟสกระจายหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่มากขึ้น โดยที่อัตราส่วน 2.5 % wt มีการกระจายตัวที่ดี หลังจากนั้นที่อัตราส่วน 10 % wt จะเกิดการเกาะกลุ่มเล็กน้อยและมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น จึงสรุปได้ว่าปริมาณฟิลเลอร์ (Filler) สัมพันธ์กับการเติมเฟสกระจายที่อัตราส่วน 0.5 2.5 และ 10 % wt

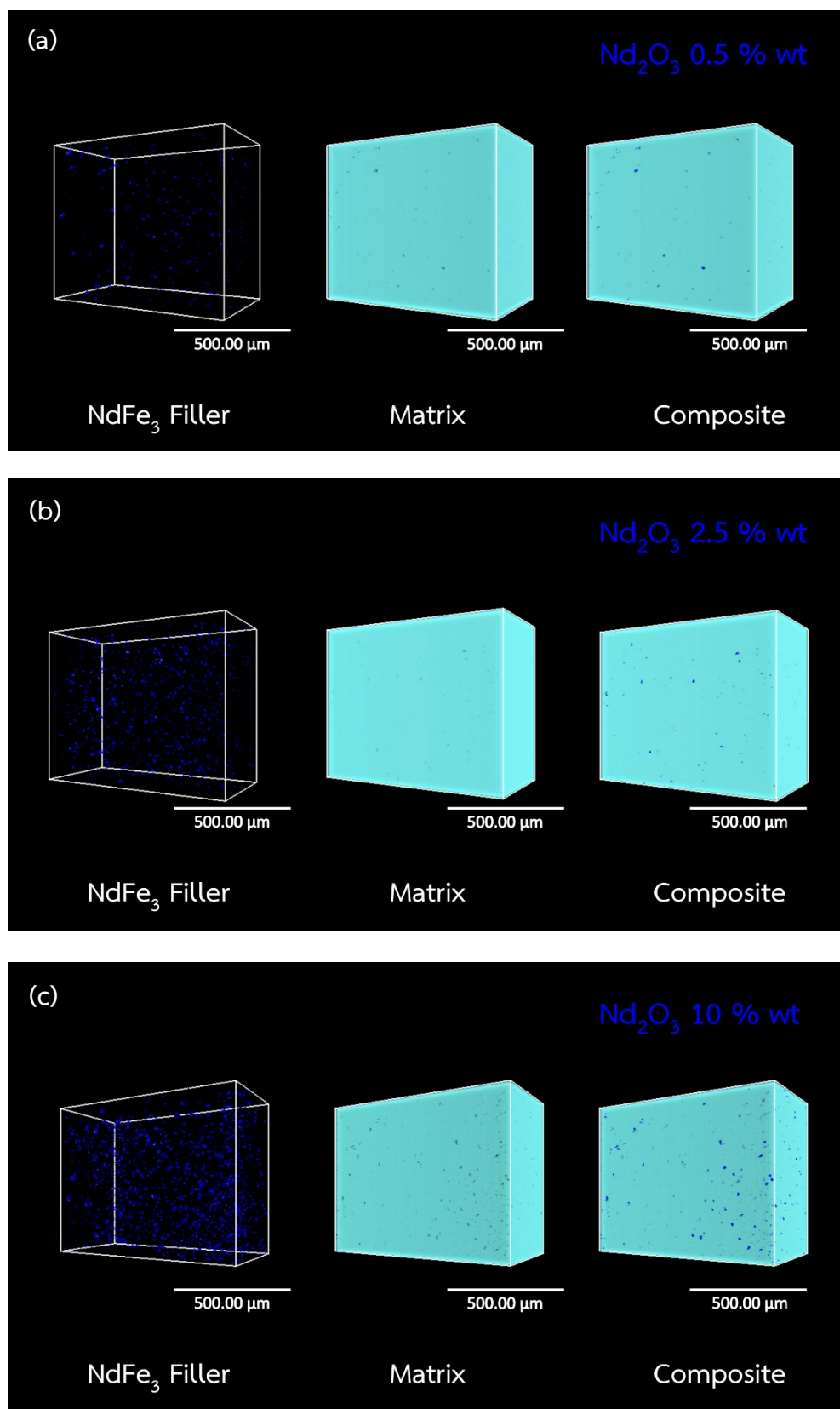
และผลตรวจสอบ XTM ในแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วยซังมาเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.24 และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วยนีโอดีเมียออกไซด์ (Nd_2O_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.25 ผลที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกัน นั่นคือสามารถแยกเฟสกระจายออกจากเมทริกได้จากโปรแกรม และเมื่อปริมาณการเติมเฟสกระจายที่เพิ่มขึ้นปริมาณ Filler ที่พบในภาพ XTM ที่ได้จากภาพสามมิติเทอร์โมกราฟี (Thermographic) แสดงให้เห็นลักษณะที่เป็นไปในทางเดียวกัน



ภาพประกอบ 4.23 แสดงภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย La_2O_3 ที่ (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.24 แสดงภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Sm_2O_3 ที่ (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ

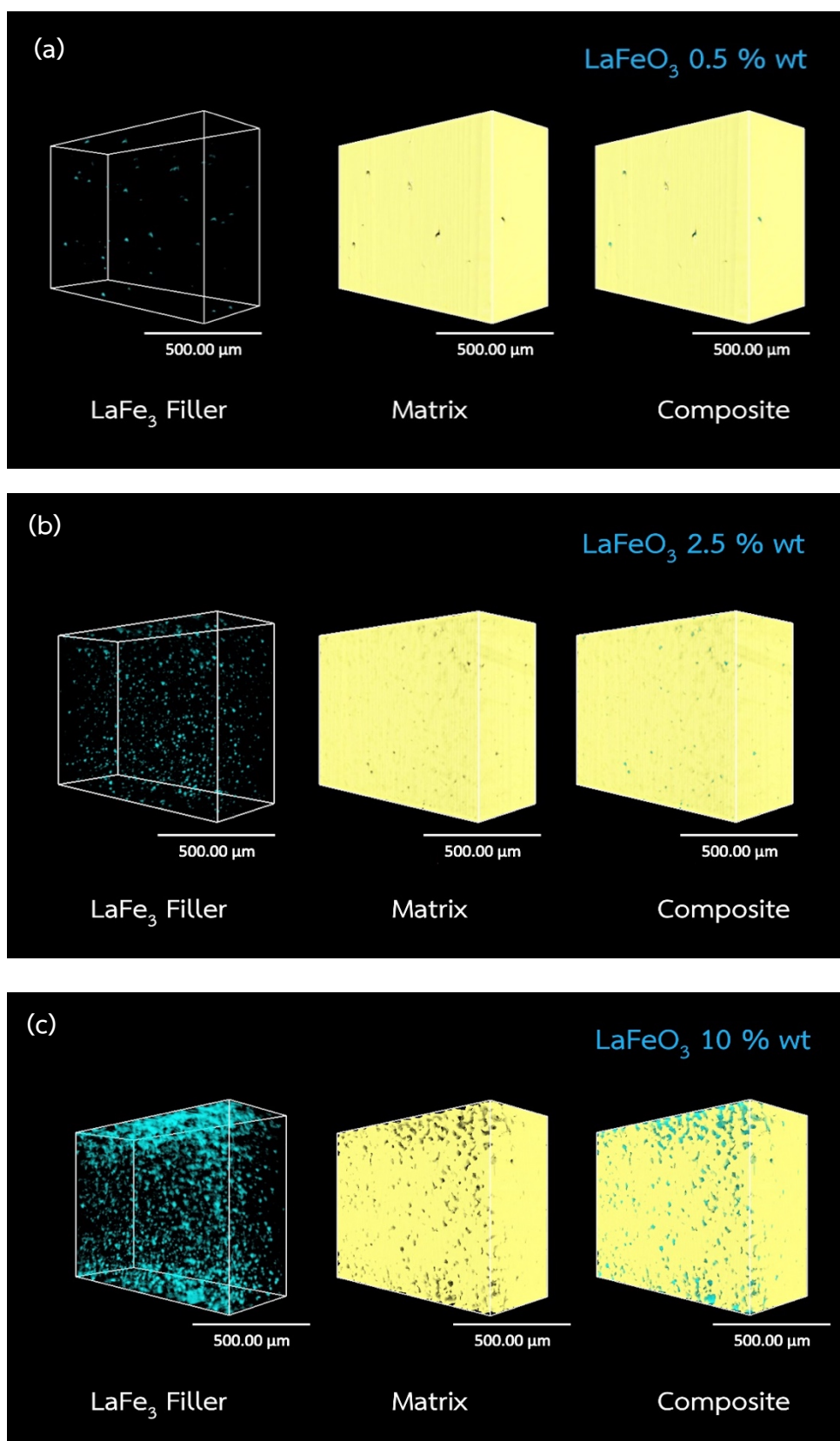


ภาพประกอบ 4.25 แสดงภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย Nd_2O_3 ที่ (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ

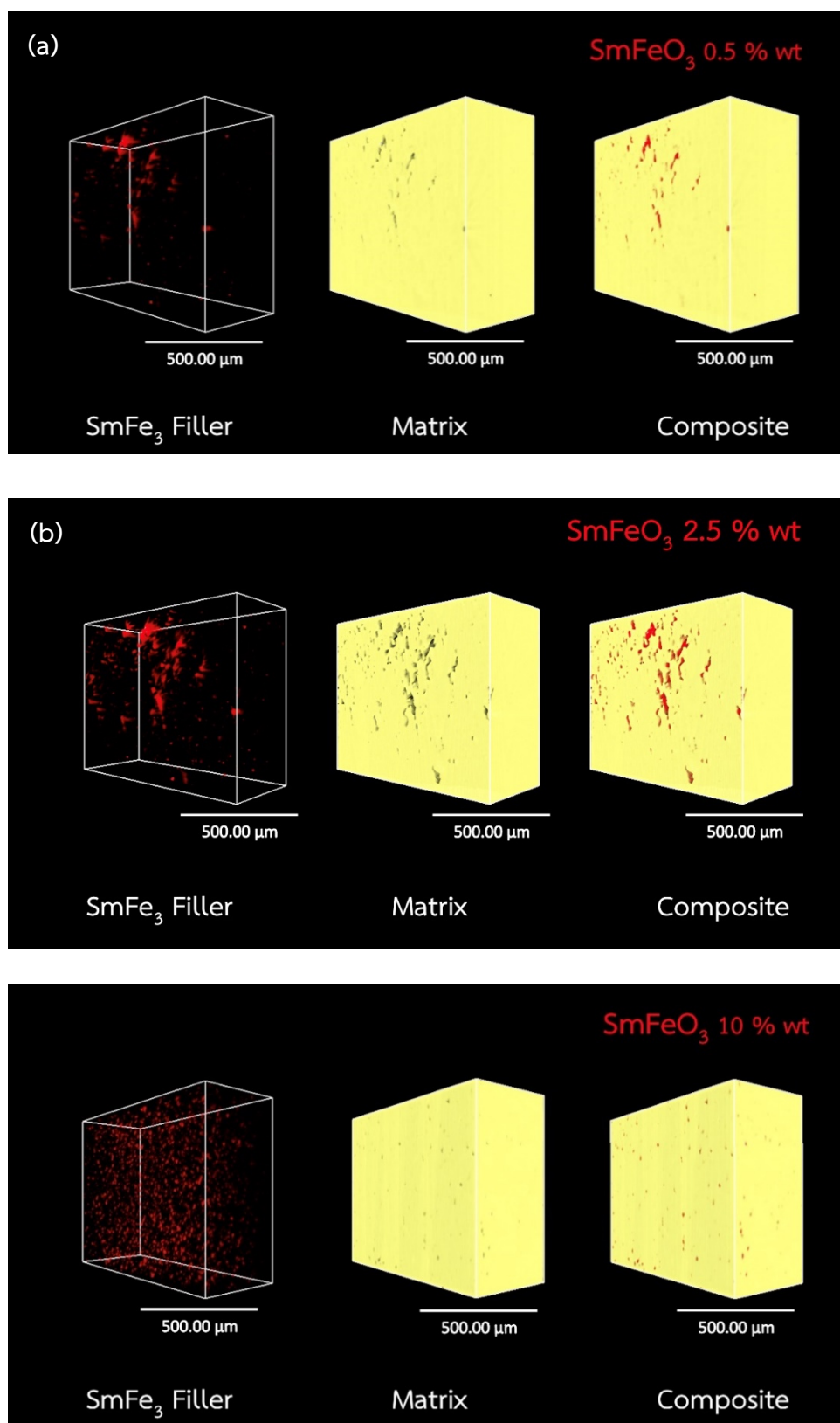
5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) กับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide)

จากการตรวจสอบ PDMS Composite ที่เติมด้วยกลุ่มของ Rare Earth Perovskite Oxide ได้แก่ PDMS Composite ที่เติมด้วยแลนทานัมเฟอเรต (LaFeO_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.26 ผลที่ได้สอดคล้องกับ PDMS Composite ที่เติมด้วยกลุ่มของ Rare Earth Oxide นั่นคืออัตราส่วนที่มากขึ้นหรือปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการกระจายของเฟสกระจายใน PDMS Composite โดยจะพบว่าเมื่อปริมาณ LaFeO_3 เพิ่มขึ้นจาก 0.5, 2.5 มาเป็น 10 % wt จะพบการกระจายตัวของเฟส Filler เริ่มหนาแน่นมากขึ้น และเริ่มมีการเกาะกลุ่มเมื่อปริมาณของ LaFeO_3 เพิ่มขึ้น สังเกตได้จากการเกาะกลุ่มกันอย่างชัดเจนในช่วงบนและล่างของภาพ Filler

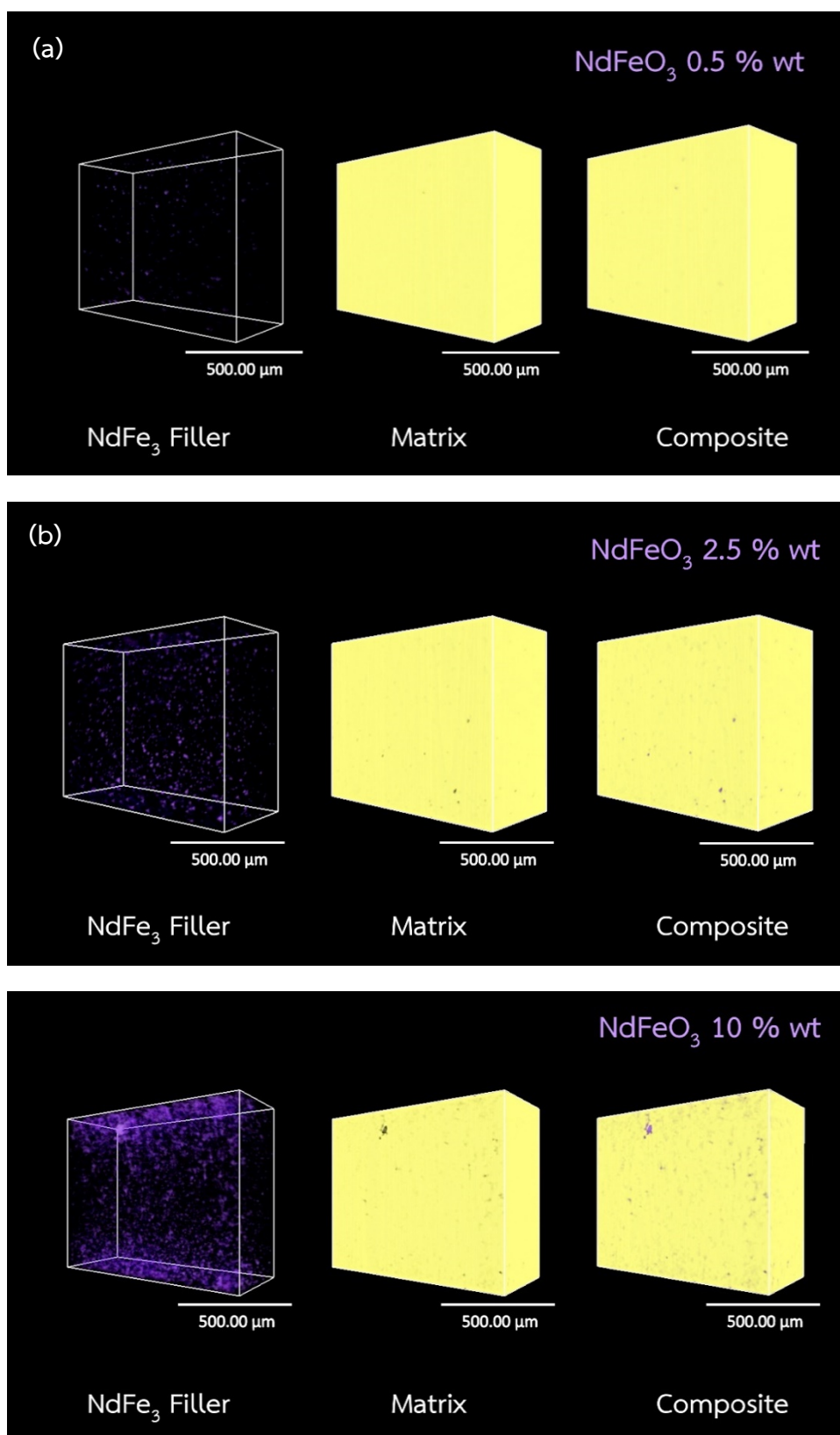
และผลตรวจสอบ XTM ในแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วยซัสมาเรียมเฟอเรต (SmFeO_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.27 และ PDMS Composite ที่เติมด้วยนีโอดีเมียมเฟอเรต (NdFeO_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.28 ผลที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกัน นั่นคือสามารถแยกเฟสกระจายออกจากเมทริกได้จากโปรแกรมและเมื่อปริมาณการเติมเฟสกระจายที่เพิ่มขึ้นปริมาณ Filler ที่พบในภาพ XTM ที่ได้จากภาพสามมิติเทอร์โมกราฟฟี (Thermographic) แสดงให้เห็นลักษณะที่เป็นไปในทางเดียวกัน ซึ่งคือพบการเกาะกลุ่มกันได้อย่างชัดเจนเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 4.26 แสดงภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย LaFeO₃ ที่ (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ



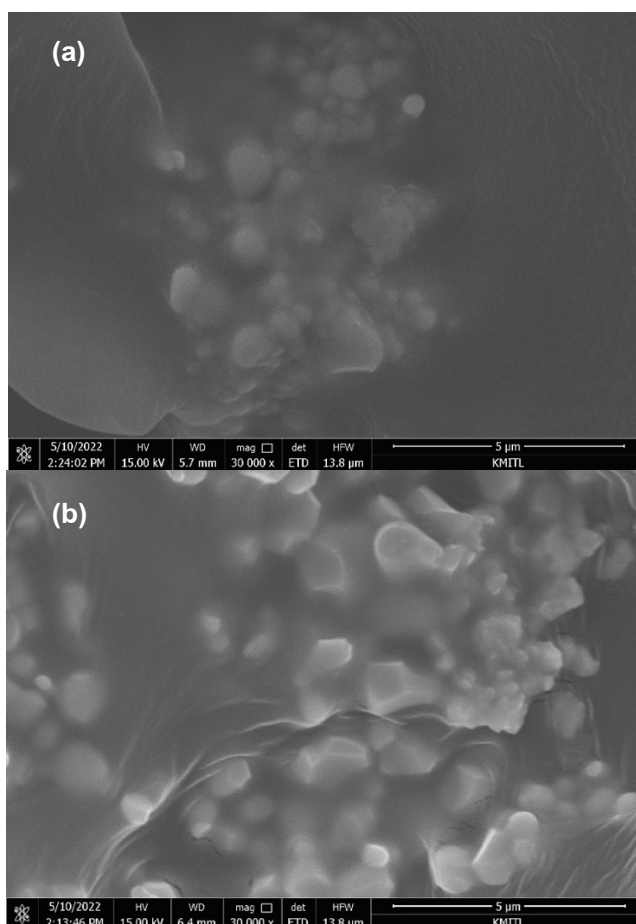
ภาพประกอบ 4.27 แสดงภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย SmFeO_3 ที่ (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.28 แสดงภาพถ่ายแผ่นฟิล์ม PDMS Composite ที่เติมด้วย NdFeO_3 ที่ (a) 0.5 % wt (b) 2.5 % wt และ 10 % wt ตามลำดับ

6. เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

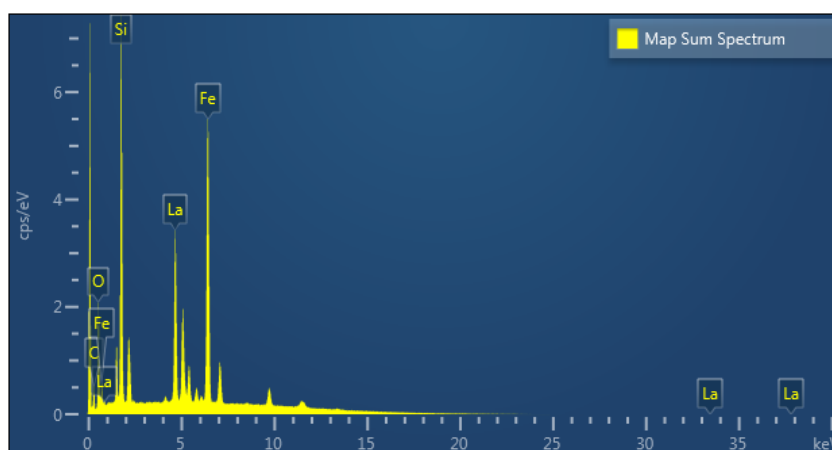
จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แบบภาพตัดขวาง (Cross section) ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เติมด้วยแลนทานัมเฟอเรต (PDMS/LaFeO₃) ที่อัตราส่วน 2.5 % wt และ 10 % wt ที่กำลังขยาย 30000 เท่า แสดงดังภาพประกอบ 4.29 พบว่า PDMS/LaFeO₃ 2.5 % wt และ 10 % wt มีอนุภาคของแลนทานัมเฟอเรตแทรกตัวอยู่ในเนื้อเมทริกของ PDMS โดยไม่สามารถหาขนาดที่แน่นอนได้ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดและรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและมีการเกาะกลุ่มกัน แต่อย่างไรก็ตาม สามารถอนุมานอนุภาคจะมีขนาดเล็กที่สุดอยู่ในช่วง 200 nm - 1 μ m และที่กำลังขยายเดียวกัน PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 % wt มีปริมาณของ Filler อยู่ต่ำกว่า PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt อย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS เพื่อยืนยันผลึกที่แทรกตัวอยู่ในเมทริก โดยใช้เทคนิคนี้เพื่อยืนยันธาตุองค์ประกอบ



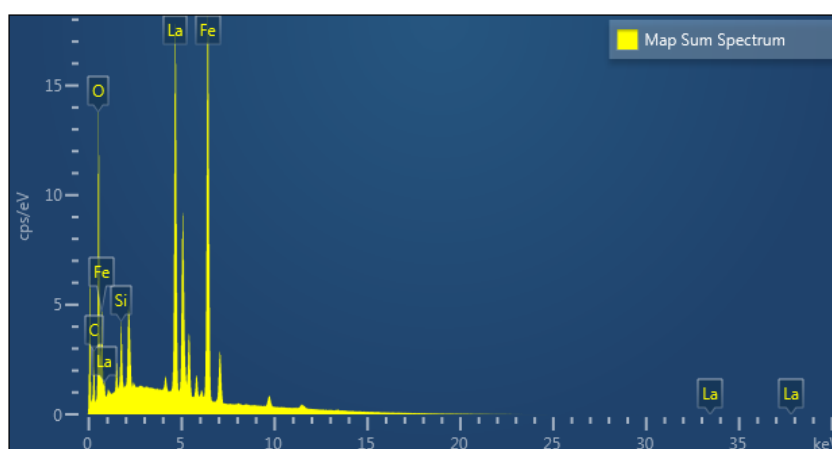
ภาพประกอบ 4.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PDMS/LaFeO₃ (a) 2.5 % wt (b) 10 % wt

6.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรเมตรีรังสีแบบการกระจายพลังงาน Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีด้วย สเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยสามารถวิเคราะห์แบบเชิงคุณภาพ เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างธาตุต่างๆ และวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพื่อทราบปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีมีอัตราส่วนที่เปอร์เซ็นต์ โดยผลการวิเคราะห์แบบเชิงคุณภาพของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 และ 10 % wt ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 4.30 และภาพประกอบ 4.31 ตามลำดับ ผลที่ได้พบองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอน (Si), คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ PDMS ที่ปนอยู่กับธาตุองค์ประกอบแลนทานัม (La), ไอรอน (Fe) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นสัดส่วนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแลนทานัมเฟอเรต และสามารถยืนยันผลึกที่แทรกอยู่ในเมทริก และธาตุองค์ประกอบของการทำคอมโพสิตได้



ภาพประกอบ 4.30 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเชิงคุณภาพของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 % wt



ภาพประกอบ 4.31 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเชิงคุณภาพของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt

ผลการวิเคราะห์แบบเชิงปริมาณของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 และ 10 % wt โดยสามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ 2 รูปแบบ คือแบบ Element % และแบบ Compound % เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 % wt แสดงดังตาราง 17 ผลที่ได้พบว่ามีปริมาณซิลิกอน (Si) อยู่ 17.99 % wt มีปริมาณคาร์บอน (C) อยู่ 11.08 % wt มีปริมาณออกซิเจน (O) อยู่ 12.36 % wt มีปริมาณแลนทานัม (La) อยู่ 27.84 % wt และปริมาณไอรอน (Fe) อยู่ 30.73 % wt และเมื่อ PDMS/LaFeO₃ เพิ่มอัตราส่วนการเติมเป็น 10 % wt แสดงดังตาราง 18 ผลที่ได้พบว่ามีปริมาณซิลิกอน (Si) อยู่ 2.32 % wt มีปริมาณคาร์บอน (C) อยู่ 10.72 % wt และมีปริมาณออกซิเจน (O) อยู่ 18.67 % wt มีปริมาณแลนทานัม (La) อยู่ 39.27 % wt และปริมาณไอรอน (Fe) อยู่ 29.02 % wt ซึ่งผลที่ได้สามารถบ่งบอกถึงอัตราส่วนการเติมที่มากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณของธาตุองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นตาม

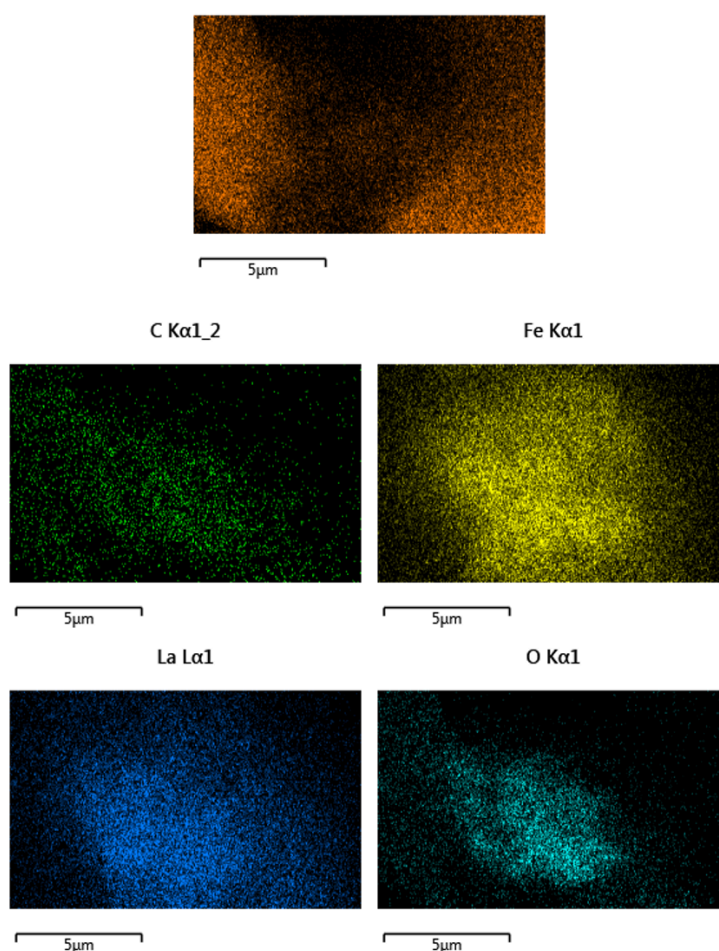
ตาราง 17 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 % wt

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	% wt	% wt Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard
Si	K series	6.79	0.05377	17.99	0.13	20.75	SiO ₂	Yes
C	K series	1.20	0.01203	11.08	0.39	29.90	C Vit	Yes
O	K series	6.49	0.02335	12.36	0.18	25.04	SiO ₂	Yes
La	L series	18.24	0.16367	27.84	0.20	6.49	LaB ₆	Yes
Fe	K series	17.57	0.17570	30.73	0.20	17.83	Fe	Yes
Total:				100		100		

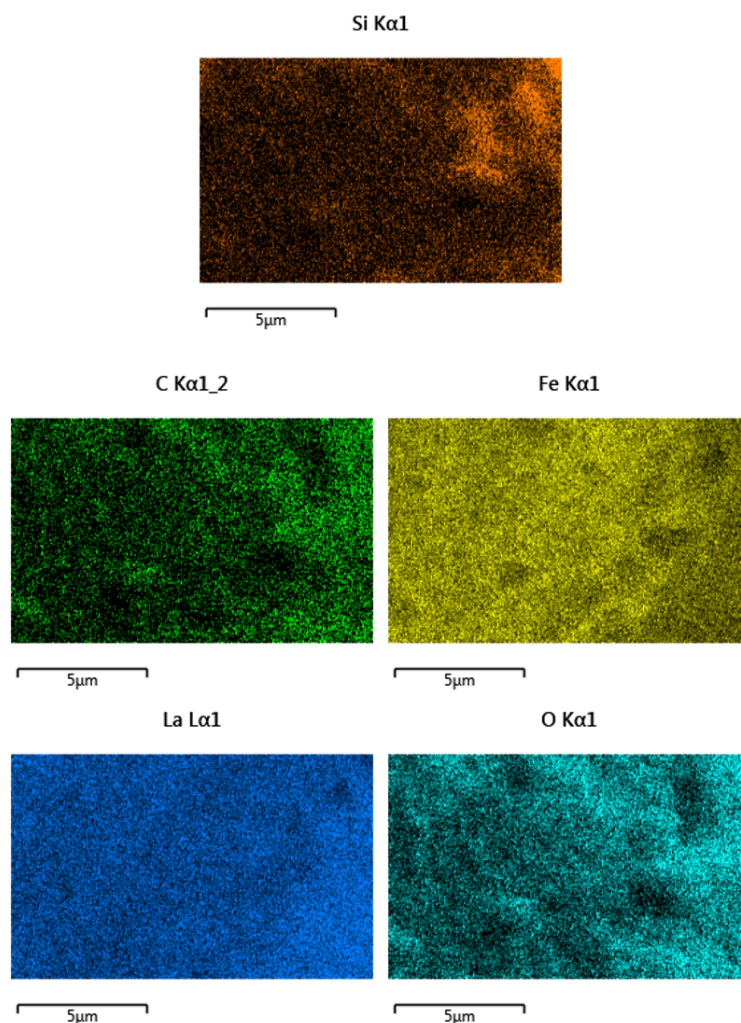
ตาราง 18 วิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ Element % ของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	% wt	% wt Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard
Si	K series	2.74	0.02173	2.32	0.03	2.81	SiO ₂	Yes
C	K series	6.39	0.06393	10.72	0.15	30.31	C Vit	Yes
O	K series	46.23	0.15555	18.67	0.09	39.63	SiO ₂	Yes
La	L series	93.41	0.83813	39.27	0.10	9.60	LaB ₆	Yes
Fe	K series	57.91	0.57915	29.02	0.08	17.65	Fe	Yes
Total:				100		100		

และวิเคราะห์ด้วยการทำ Speed mapping เพื่อดูการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบของ PDMS/LaFeO₃ ที่กำลังขยาย 5 μm ผลที่ได้พบว่า PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 % wt พบธาตุองค์ประกอบต่าง ๆ ทั้งซิลิกอน (Si), คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), แลนทานัม (La) และไอรอน (Fe) มีการกระจายตัวและมีการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กถึง 45 μm จึงเกิดการเกาะกลุ่มกันในผลึกเป็นอย่างมากแสดงดังภาพประกอบ 4.32 โดยที่ (a) ซิลิกอน (Si) มีสีส้ม, (b) คาร์บอน (C) มีสีเขียว, (c) ออกซิเจน (O) มีสีฟ้า, (d) แลนทานัม (La) มีสีน้ำเงิน และ (e) ไอรอน (Fe) มีสีเหลือง และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการเติม PDMS/LaFeO₃ เป็น 10 % wt จะพบการกระจายตัวและการเกาะกลุ่มที่มากยิ่งขึ้นตามปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 4.33 โดยที่ (a) ซิลิกอน (Si) มีสีส้ม, (b) คาร์บอน (C) มีสีเขียว, (c) ออกซิเจน (O) มีสีฟ้า, (d) แลนทานัม (La) มีสีน้ำเงิน และ (e) ไอรอน (Fe) มีสีเหลือง จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด จึงยืนยันได้ว่า PDMS/LaFeO₃ ที่มีอัตราส่วน 2.5 % wt และ 10 % wt มีการกระจายตัวของแลนทานัมเฟอร์ไรต์ในผลึกของ PDMS



ภาพประกอบ 4.32 แสดงการกระจายตัวของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 2.5 % wt แต่ละธาตุองค์ประกอบในผลึกของ PDMS



ภาพประกอบ 4.33 แสดงการกระจายตัวของ PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt แต่ละธาตุองค์ประกอบในผลึกของ PDMS

7. ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์มคอมโพลีไมด์เมทิลไซลอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

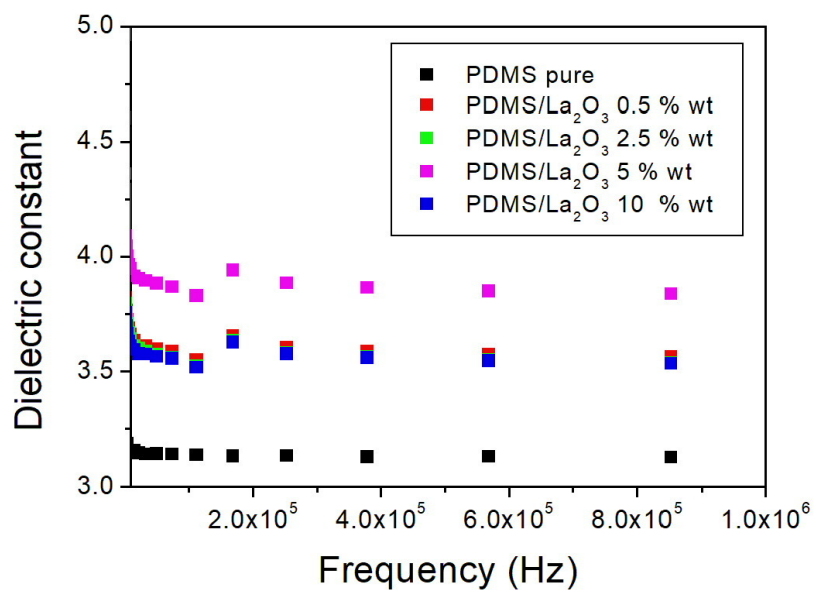
จากผลการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์มคอมโพลีไมด์เมทิลไซลอกเซนที่เติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth oxide) ได้แก่ แลนทานัมออกไซด์ (La₂O₃), ซัมมาเรียมออกไซด์ (Sm₂O₃) และนีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd₂O₃) และเติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite oxide) ได้แก่ แลนทานัมเฟอเรต (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO₃), ซัมมาเรียมเฟอเรต (Samarium Iron Oxide: SmFeO₃) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (Neodymium Iron Oxide: NdFeO₃) ด้วยเครื่องวัดแอลซีอาร์ (LCR

Meter) โดยวัดที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 25 °C ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Frequency) ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเติมสารประกอบที่ 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt ในช่วงความถี่ 10 Hz – 1 kHz

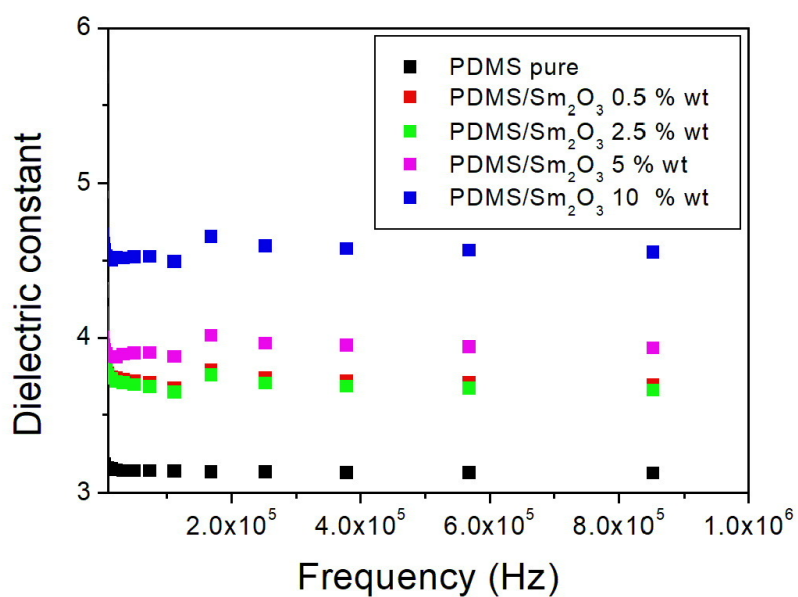
7.1 แผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth oxide)

จากผลการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth oxide) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS pure) และแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติม Rare Earth oxide ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt พบว่า PDMS pure มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.14 ถึง 3.15 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

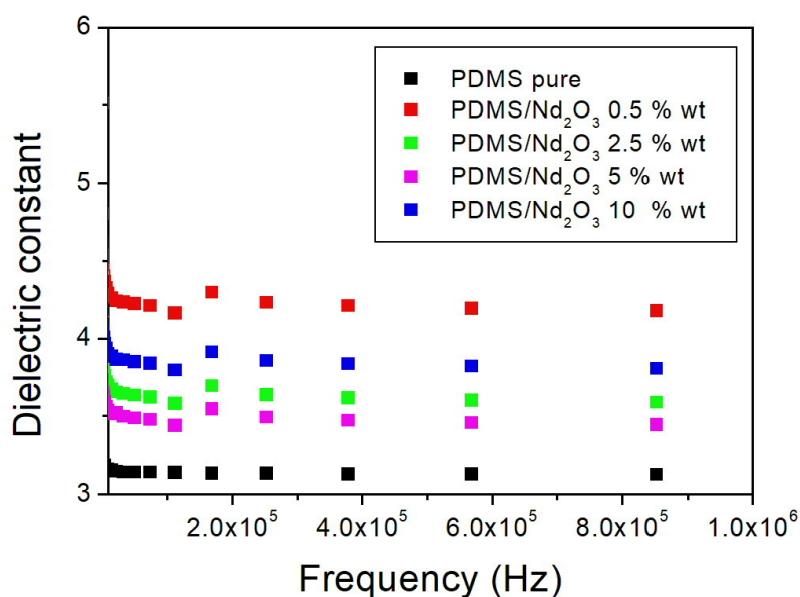
โดยแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมสารประกอบแลนทานัมออกไซด์ (PDMS/La₂O₃) แสดงดังภาพประกอบ 4.34 พบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃ 5 % wt มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ในช่วง 3.84 ถึง 3.91 และเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเติมสารประกอบอื่นๆ พบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃ 10 % wt มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.53 ถึง 3.59 แผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมสารประกอบซังมาเรียมเฟอเรต (PDMS/Sm₂O₃) แสดงดังภาพประกอบ 4.35 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ Sm₂O₃ 10 % wt มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ในช่วง 4.50 ถึง 4.55 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการเติมสารประกอบ Sm₂O₃ 2.5 % wt มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเติมสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งอยู่ในช่วง 3.66 ถึง 3.77 และมีค่าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมสารประกอบนีโอติเมียมออกไซด์ (PDMS/Nd₂O₃) แสดงดังภาพประกอบ 4.36 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ Nd₂O₃ 0.5 % wt มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ในช่วง 4.18 ถึง 4.26 และมีค่าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการเติมสารประกอบ Nd₂O₃ 5 % wt มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเติมสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งอยู่ในช่วง 3.44 ถึง 3.53 และมีค่าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

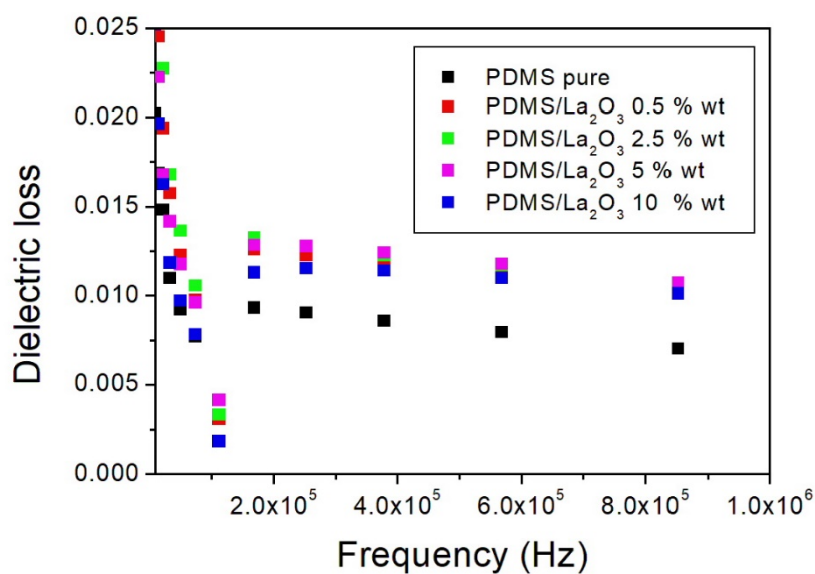


ภาพประกอบ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/Sm₂O₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

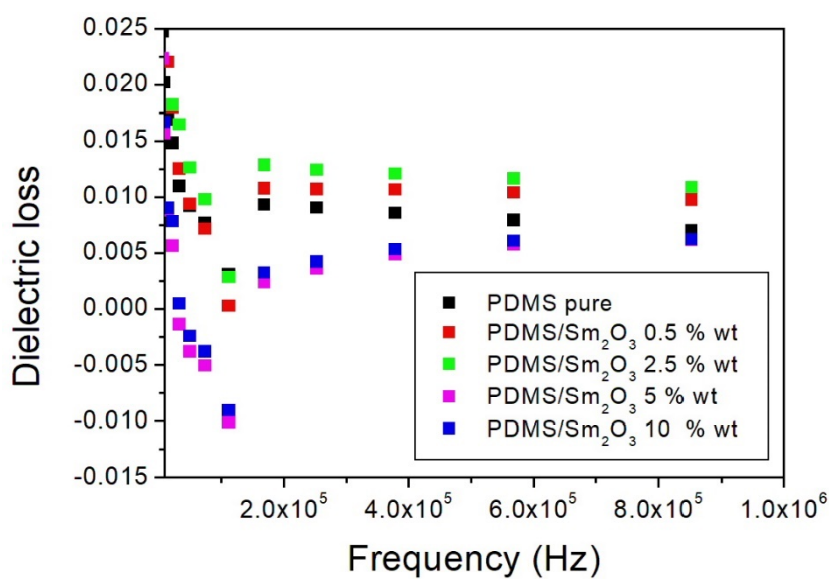


ภาพประกอบ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/Nd₂O₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

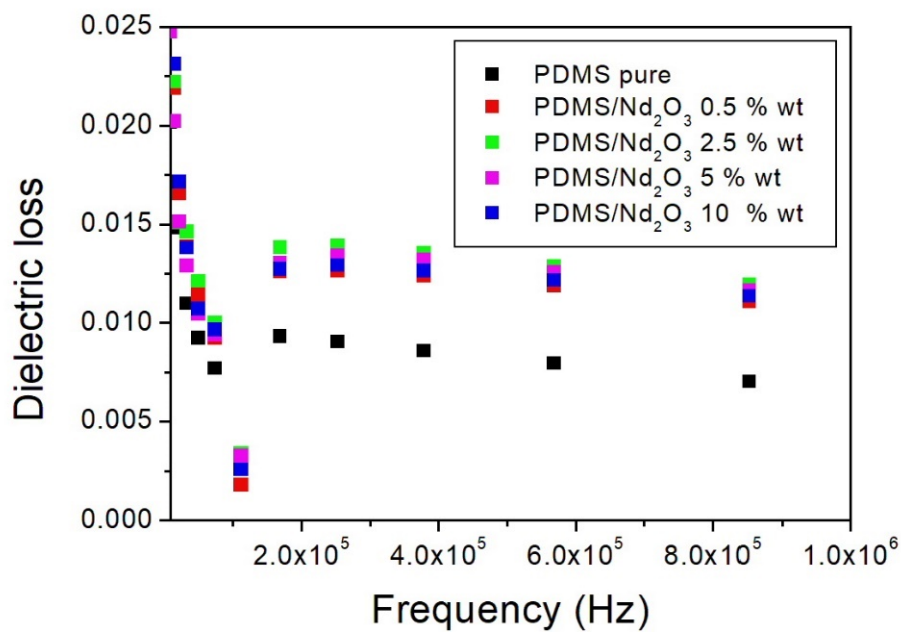
นอกจากนี้ทำการตรวจสอบวัดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของ PDMS pure และแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เติม Rare Earth oxide ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5 และ 10 % wt พบว่า PDMS pure มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.009 และแผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.37 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ La₂O₃ 10 % wt มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ อยู่ในช่วง 0.010 ถึง 0.011 และแผ่นฟิล์ม PDMS/Sm₂O₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.38 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ Sm₂O₃ 5 % wt มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ อยู่ในช่วง 0.002 ถึง 0.005 และแผ่นฟิล์ม PDMS/Nd₂O₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.39 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ Nd₂O₃ 0.5 % wt มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ อยู่ในช่วง 0.011 ถึง 0.012 ซึ่งแผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃, แผ่นฟิล์ม PDMS/Nd₂O₃ และแผ่นฟิล์ม PDMS/Sm₂O₃ จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/La₂O₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน



ภาพประกอบ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/Sm₂O₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน



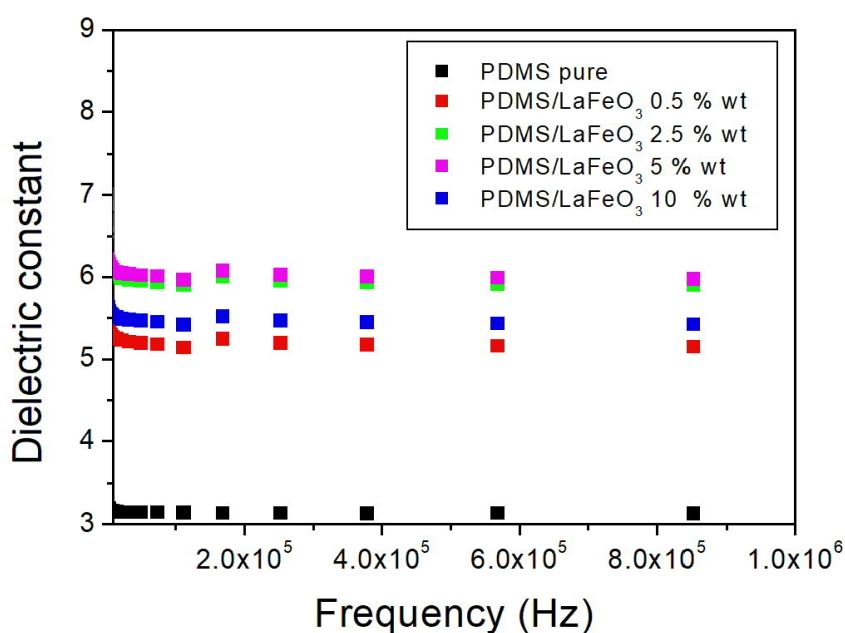
ภาพประกอบ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/Nd₂O₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

7.2 แผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite oxide)

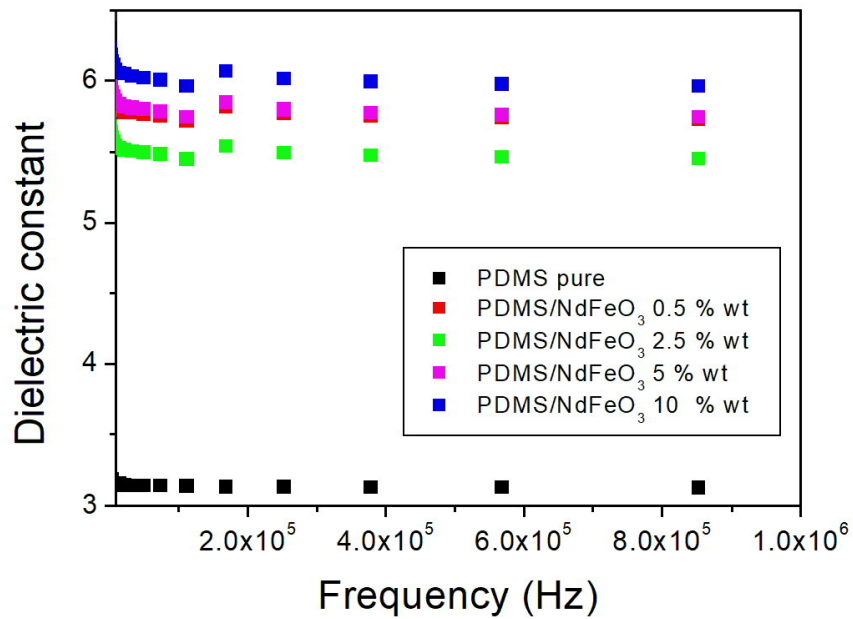
จากผลการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมด้วยกลุ่มสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS pure) และแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติม Rare Earth perovskite oxide ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt พบว่า PDMS pure มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.14 ถึง 3.15 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ

โดยแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมสารประกอบแลนทานัมเฟอเรต (PDMS/LaFeO₃) แสดงดังภาพประกอบ 4.40 พบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO₃ 5 % wt มีค่าคงที่ได้อิเล็กตริกสูงสุดอยู่ในช่วง 5.98 ถึง 6.06 และมีค่าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการเติมสารประกอบ LaFeO₃ 0.5 % wt มีค่าคงที่ได้อิเล็กตริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเติมสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งอยู่ในช่วง 5.15 ถึง 5.24 และแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เติมสารประกอบซัมาเรียมเฟอเรต (PDMS/SmFeO₃) แสดงดังภาพประกอบ 4.41 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ SmFeO₃ 10 % wt มีค่าคงที่ได้อิเล็กตริกสูงสุดอยู่ในช่วง 5.83 ถึง 5.91 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการเติมสารประกอบ SmFeO₃ 5 % wt มีค่าคงที่ได้อิเล็กตริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเติมสารประกอบอื่น ๆ ซึ่ง

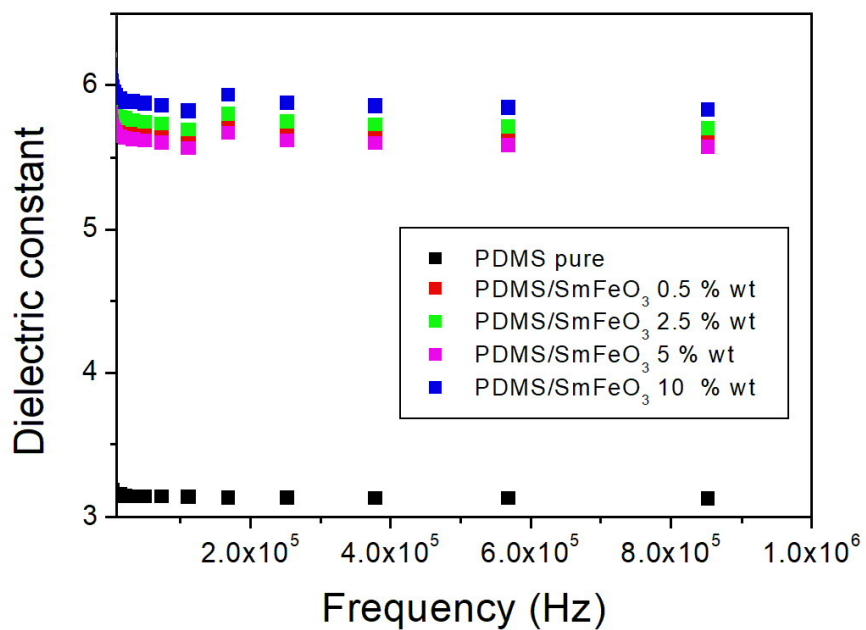
อยู่ในช่วง 5.73 ถึง 5.66 และแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เติมสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ (PDMS/NdFeO₃) แสดงดังภาพประกอบ 4.42 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ NdFeO₃ 10 % wt มีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสูงสุดอยู่ในช่วง 5.96 ถึง 6.05 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการเติมสารประกอบ NdFeO₃ 2.5 % wt มีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเติมสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งอยู่ในช่วง 5.45 ถึง 5.52 ซึ่งแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO₃, แผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO₃ และแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO₃ จะมีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้อิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

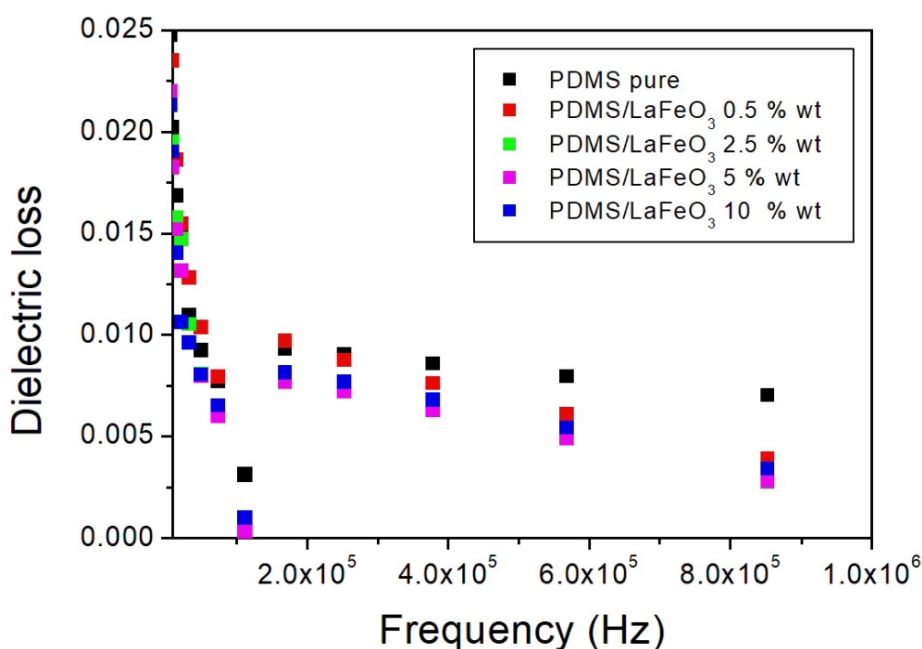


ภาพประกอบ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

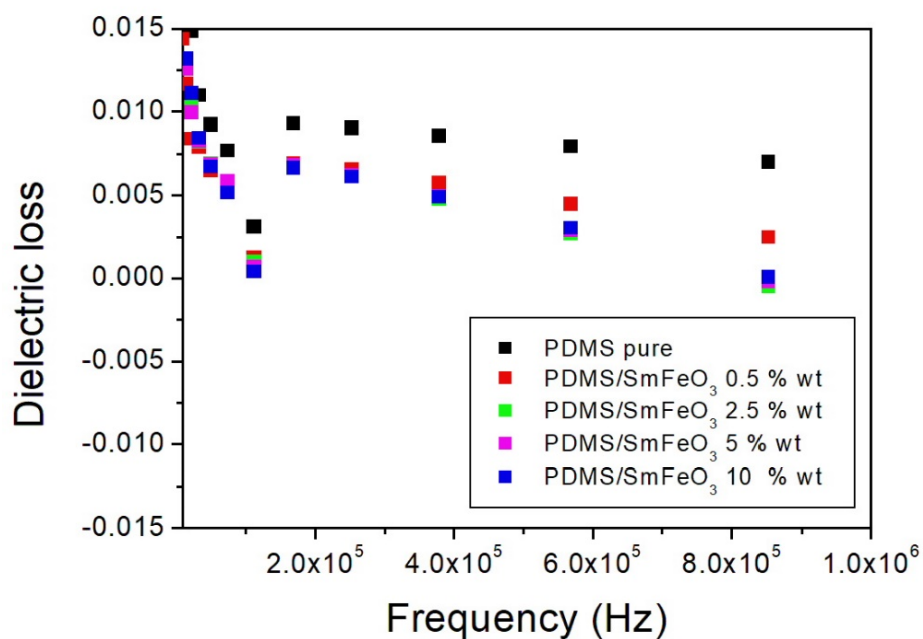


ภาพประกอบ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

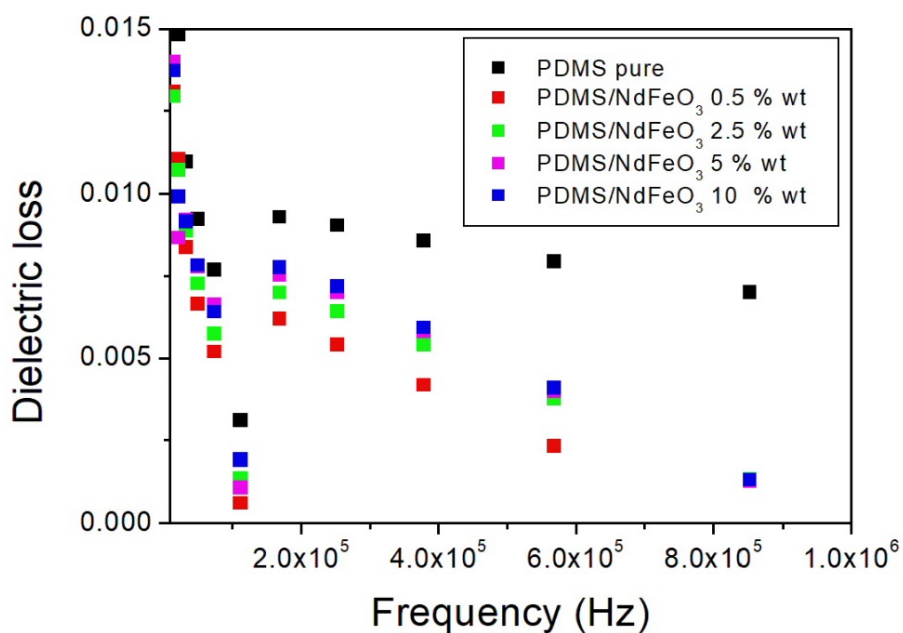
นอกจากนี้ทำการตรวจสอบวัดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของ PDMS pure และแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เติม Rare Earth oxide ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5 และ 10 % wt พบว่า PDMS pure มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.015 และแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.43 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ LaFeO₃ 5 % wt มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ อยู่ในช่วง 0.002 ถึง 0.008 และแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.44 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ SmFeO₃ 2.5 % wt มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ อยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.011 และแผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO₃ แสดงดังภาพประกอบ 4.45 พบว่าอัตราส่วนการเติมสารประกอบ NdFeO₃ 0.5 % wt มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ อยู่ในช่วง 0.002 ถึง 0.006



ภาพประกอบ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน



ภาพประกอบ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/SmFeO₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน



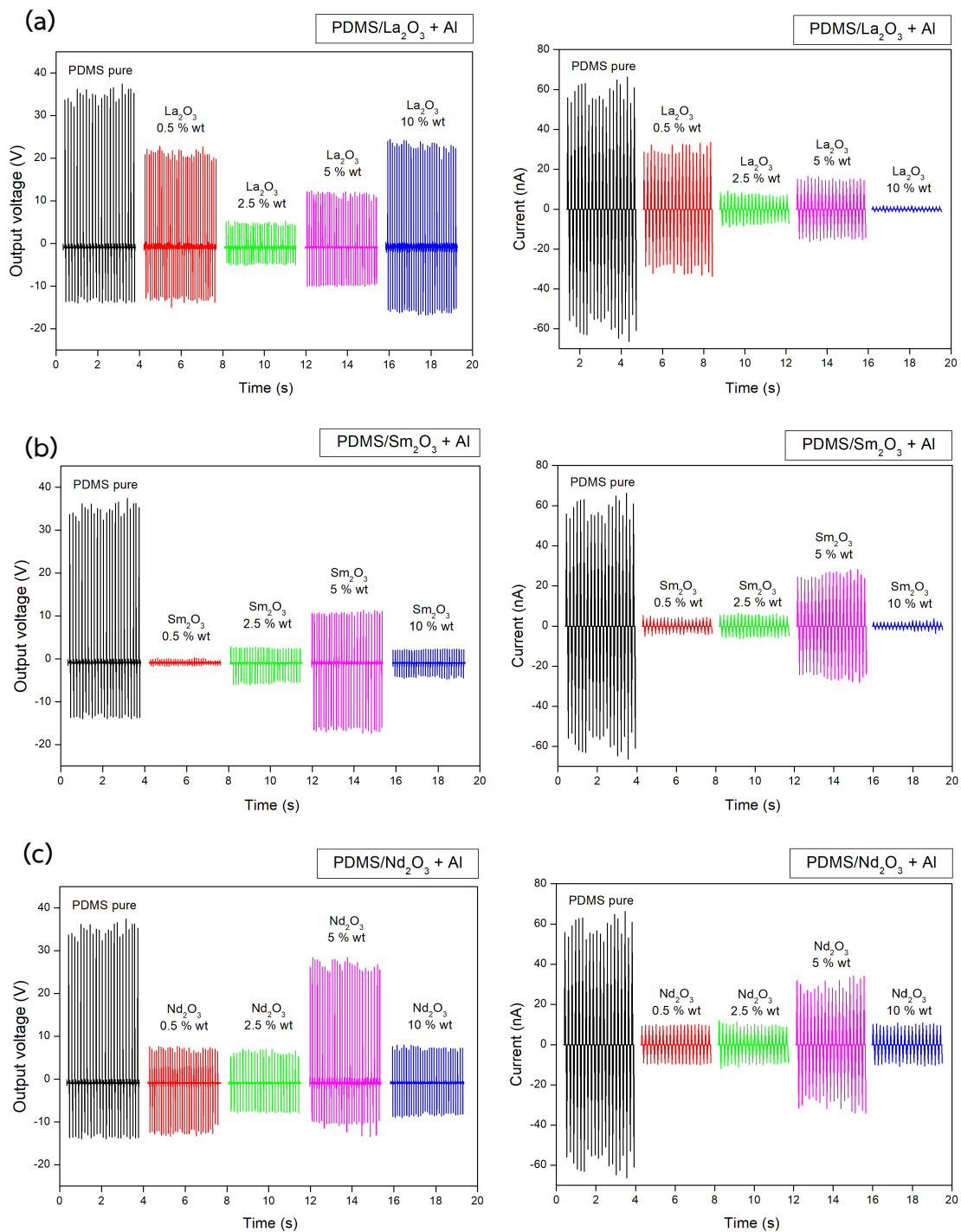
ภาพประกอบ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม PDMS/NdFeO₃ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

8. ผลการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

การศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) ด้วยอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) ภายใต้ประเภทการสัมผัสแบบตึงฉีก (Contact-separation mode) ซึ่งแผ่นอลูมิเนียม (Aluminium tape: Al) และเทพลอน (Polytetrafluoroethylene: PTFE) ถูกนำมาเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) แผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) ที่เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Oxide) ได้แก่ แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3), ซัมมาเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3) และนีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd_2O_3) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) ที่เติมด้วยสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide) ได้แก่ แลนทานัมเฟอเรต (LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอเรต (SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (NdFeO_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าสองอย่างคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออก ซึ่งได้ทำการนำ PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบไปติดกับแผ่นอลูมิเนียมและเทพลอน

8.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum Oxide: La_2O_3), ซัมมาเรียมออกไซด์ (Samarium Oxide: Sm_2O_3) และนีโอดีเมียม ออกไซด์ (Neodymium Oxide: Nd_2O_3)

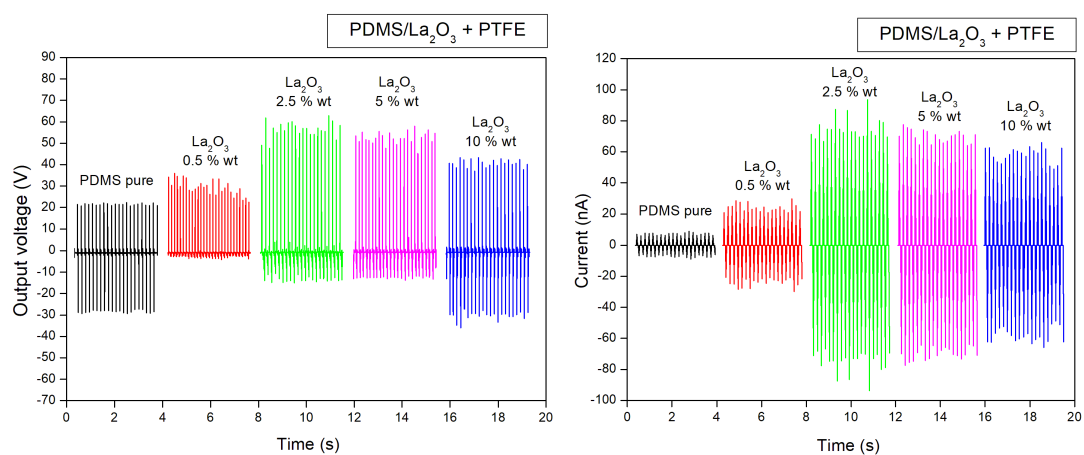
จากภาพประกอบ 4.46 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ติดกับแผ่นอลูมิเนียม พบว่า PDMS pure ที่ถูกติดกับอลูมิเนียมมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 37.45 V และ 66.2 nA ซึ่งจากการทำคอมโพสิตโดยการเติม La_2O_3 , Sm_2O_3 และ Nd_2O_3 ลงไปในแผ่นฟิล์ม PDMS พบว่าเมื่อนำไปติดกับอลูมิเนียมเทปมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกค่าลดลง



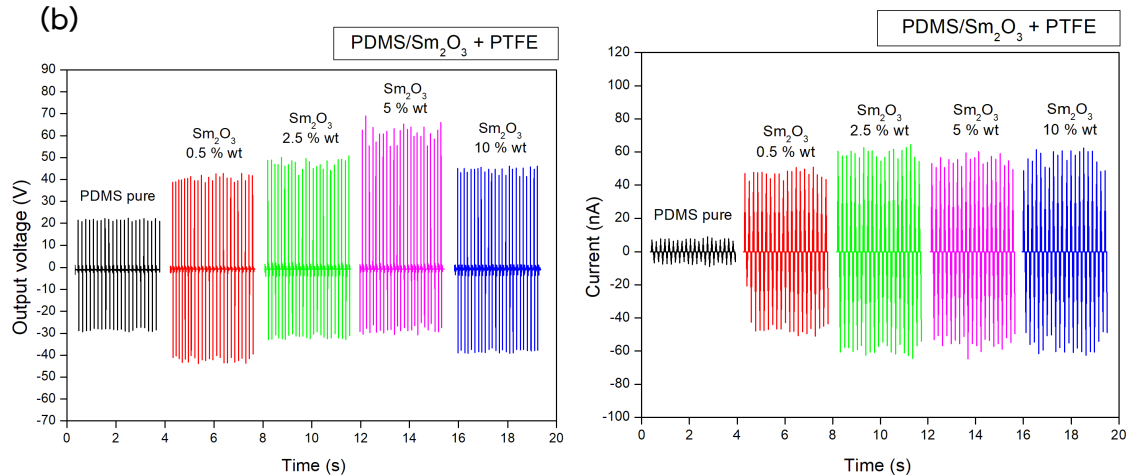
ภาพประกอบ 4.46 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ติดกับแผ่นอลูมิเนียม (a) PDMS/La₂O₃ (b) PDMS/Sm₂O₃ และ (c) PDMS/Nd₂O₃

และจากภาพประกอบ 4.47 ได้ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับเทพลอน ผลที่ได้พบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS pure ที่ถูกดีกับเทพลอนมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 30 V และ 8.89 nA ซึ่งจากการทำคอมโพสิตโดยการเติม La_2O_3 , Sm_2O_3 และ Nd_2O_3 ลงไปในแผ่นฟิล์ม PDMS พบว่าเมื่อนำไปดีเทปราคาแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงขึ้น ภาพประกอบ 4.47 (a) เมื่อเติม La_2O_3 เพิ่มสูงขึ้นเป็น 2.5 wt% ได้ค่า ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 63.18 V และ 93.4 nA (b) ได้ทำการเติม Sm_2O_3 เพิ่มสูงขึ้นจนถึง 5 wt% จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 68 V และ 66.4 nA และ (c) ได้ทำการเติม Nd_2O_3 เพิ่มสูงขึ้นจนถึง 10 wt% จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด มีค่าอยู่ที่ 64.85 V และ 73.3 nA ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่าแผ่นฟิล์ม PDMS pure ที่ดีกับเทพลอน งานวิจัยนี้จึงเลือกนำแผ่นฟิล์ม PDMS ที่เติมสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบไปดีกับเทพลอน

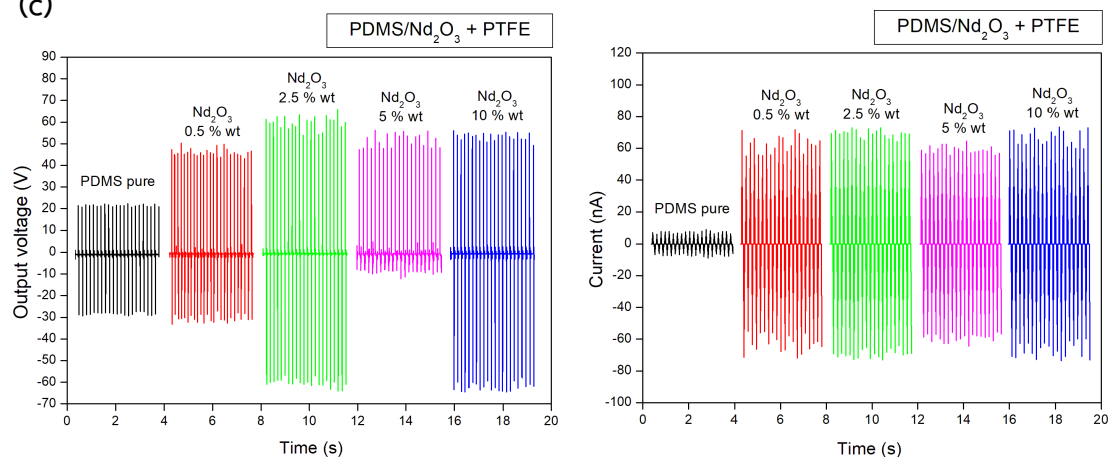
(a)



(b)



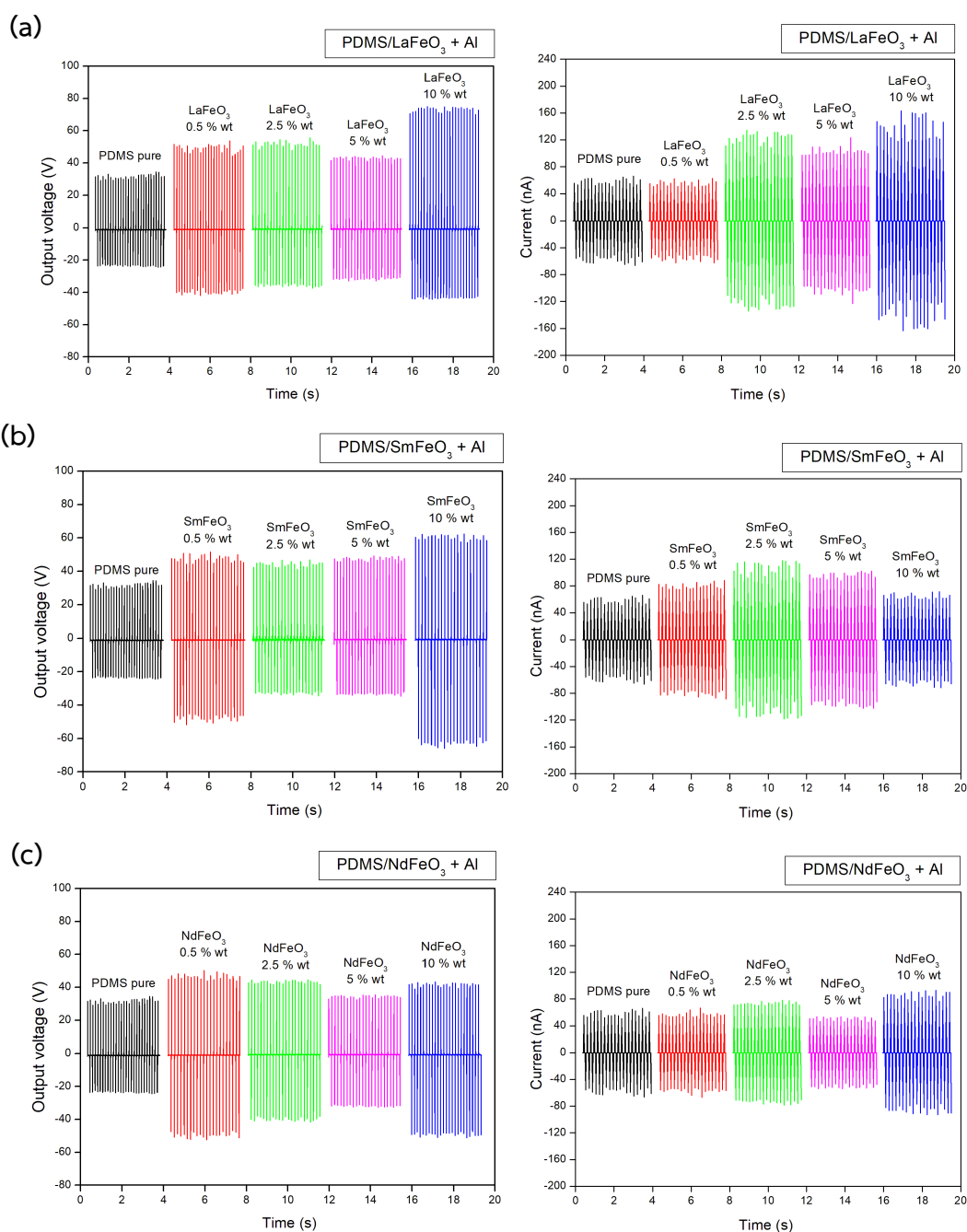
(c)



ภาพประกอบ 4.47 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ติดกับเทปลอน (a) PDMS/La₂O₃ (b) PDMS/Sm₂O₃ และ (c) PDMS/Nd₂O₃

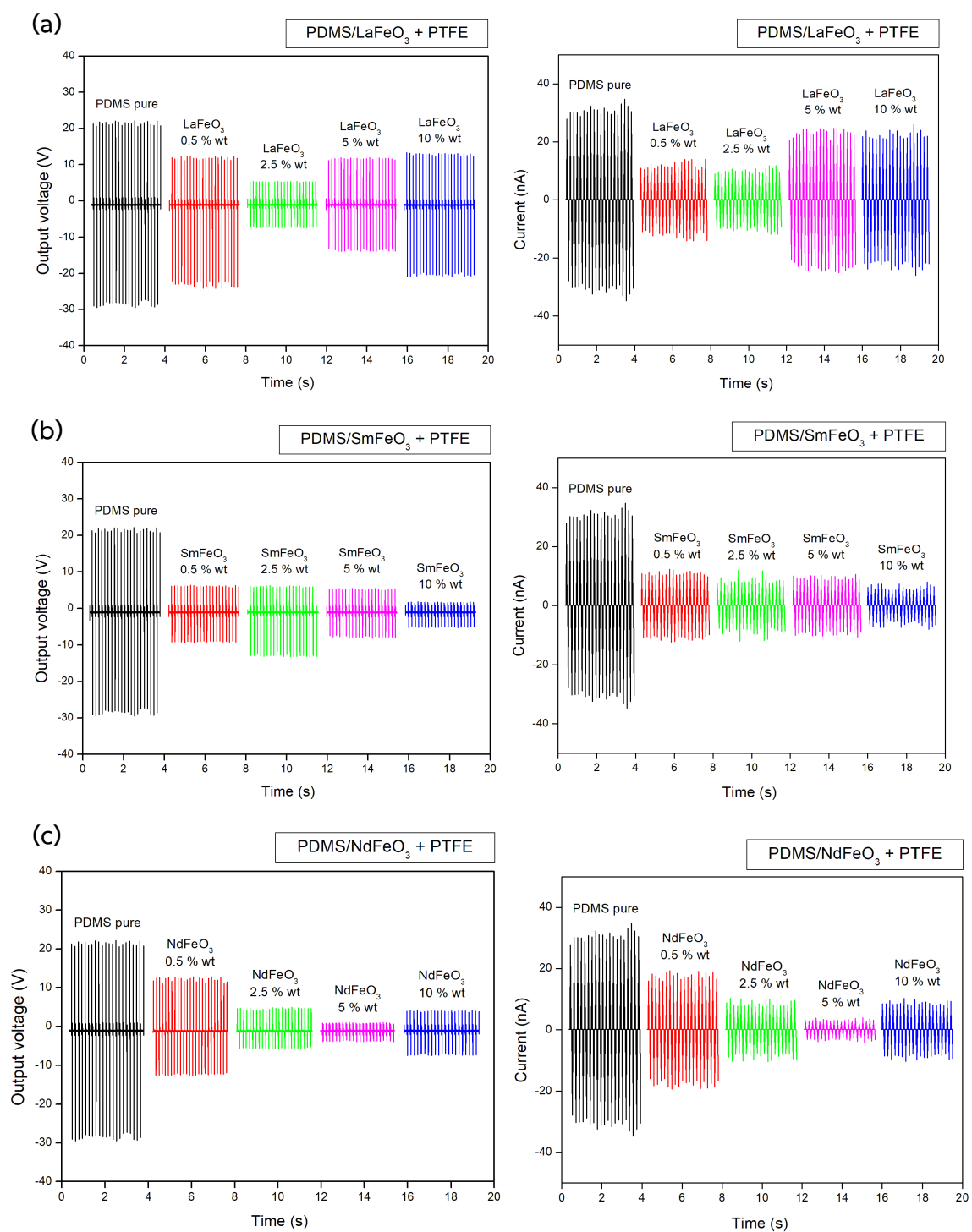
8.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแลนทานัมเฟอเรต (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอเรต (Samarium Iron Oxide: SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (Neodymium Iron Oxide: NdFeO_3)

จากภาพประกอบ 4.48 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟ สไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับแผ่นอลูมิเนียม พบว่า PDMS pure ที่ถูกติดกับแผ่นอลูมิเนียมมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 34 V และ 65 nA ซึ่งจากการทำคอมโพสิตโดยการเติมแลนทานัมเฟอเรต (LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอเรต (SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (NdFeO_3) ลงไปใน PDMS ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5 และ 10 % wt พบว่าเมื่อนำไปติดแผ่นอลูมิเนียม ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงขึ้น ภาพประกอบ 4.48 (a) เมื่อเติม LaFeO_3 เพิ่มสูงขึ้นเป็น 10 wt% ได้ค่า ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 75 V และ 164 nA (b) ได้ทำการเติม SmFeO_3 เพิ่มสูงขึ้นจนถึง 10 wt% จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดอยู่ที่ 67 V และที่ 2.5 % wt ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด 120 nA และ (c) ได้ทำการเติม NdFeO_3 เพิ่มสูงขึ้นจนถึง 0.5 wt% จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดอยู่ที่ 53 V และที่ 10 % wt ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุดมีค่าอยู่ที่ 95 nA ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่าแผ่นฟิล์ม PDMS pure



ภาพประกอบ 4.48 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ติดกับแผ่นอลูมิเนียม (a) PDMS/LaFeO₃ (b) PDMS/SmFeO₃ และ (c) PDMS/NdFeO₃

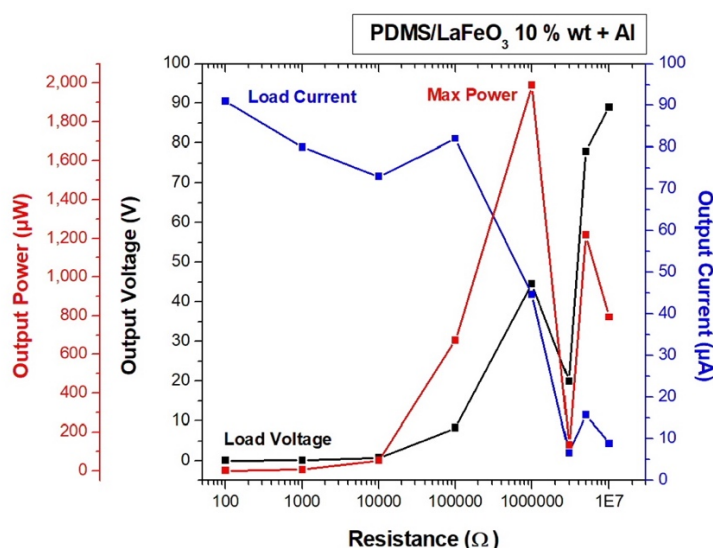
และจากภาพประกอบ 4.49 ได้ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อน โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับเทปลอน ผลที่ได้พบว่า PDMS pure ที่ถูกดีกับเทปลอนมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 30 V และ 35 nA จากการทำคอมโพสิตโดยการเติม LaFeO_3 , SmFeO_3 และ NdFeO_3 ลงไปในแผ่นฟิล์ม PDMS พบว่าเมื่อนำไปดีกับอลูมิเนียมเทปมีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกค่าลดลง ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าของแผ่นฟิล์ม PDMS pure ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงนำแผ่นฟิล์ม PDMS ที่เติมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบไปดีกับแผ่นอลูมิเนียม



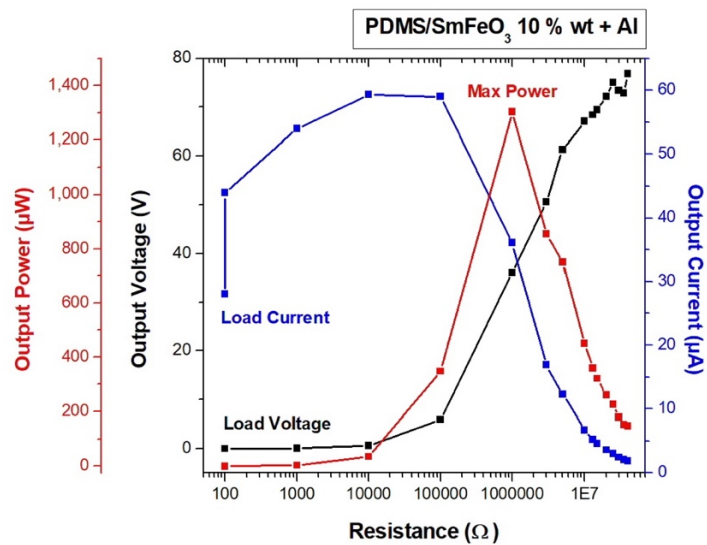
ภาพประกอบ 4.49 เป็นการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแผ่นฟิล์ม PDMS pure และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite เติมด้วยสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่ดีกับเทพลอน (a) PDMS/LaFeO₃ (b) PDMS/SmFeO₃ และ (c) PDMS/NdFeO₃

9. ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดเมทิลซิลอกเซน พิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

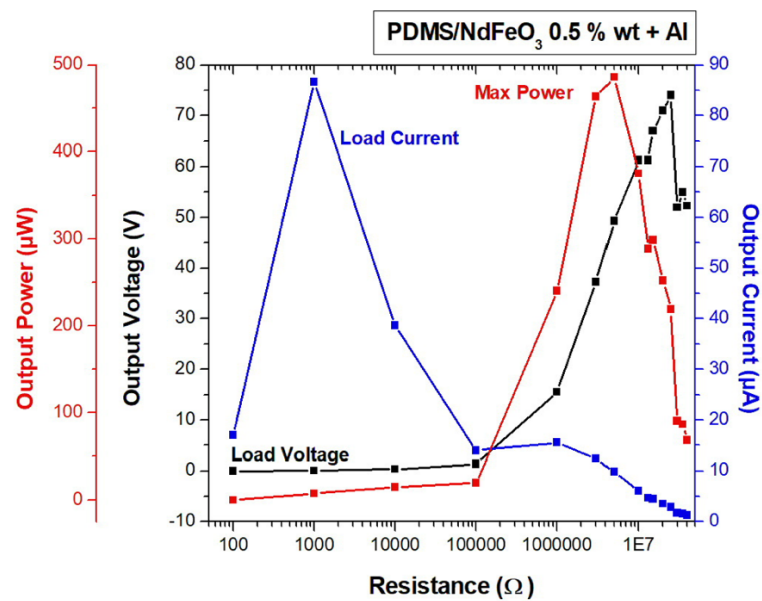
ผลจากการตรวจสอบความหนาแน่นของค่ากำลังไฟฟ้าขาออก ภายใต้เงื่อนไขของค่าความต้านทานที่ 100 1k 10k 100k 1M 3M 5M 10 M 15M 20M 25M 30M 35M และ 40M Ω ซึ่งได้ทำการทดสอบแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) ที่เติมด้วยสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide) ได้แก่ แลนทานัมเฟอเรต (LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอเรต (SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอเรต (NdFeO_3) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt โดยพบว่าตัวที่ให้ค่ามากที่สุดคือ PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.50 ที่ความต้านทาน 1M Ω จะมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมากที่สุดอยู่ที่ 1,990 μW และ PDMS/ SmFeO_3 ที่อัตราส่วน 10 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.51 ที่ความต้านทาน 1M Ω จะมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมากที่สุดอยู่ที่ 1,303 μW และ PDMS/ NdFeO_3 ที่อัตราส่วน 0.5 % wt แสดงดังภาพประกอบ 4.52 ที่ความต้านทาน 5M Ω จะมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมากที่สุดอยู่ที่ 486 μW โดย PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 10 % wt มีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุดที่ความต้านทาน 1M Ω จึงเลือกที่จะนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก มีความสัมพันธ์เป็นไปตามกฎของโอมห์ (Ohm's Law)



ภาพประกอบ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ความต้านทาน 1M Ω ของ PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 10 % wt



ภาพประกอบ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และ ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ความต้านทาน 1M Ω ของ PDMS/SmFeO₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt



ภาพประกอบ 4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และ ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ความต้านทาน 5M Ω ของ PDMS/NdFeO₃ ที่อัตราส่วน 0.5 % wt

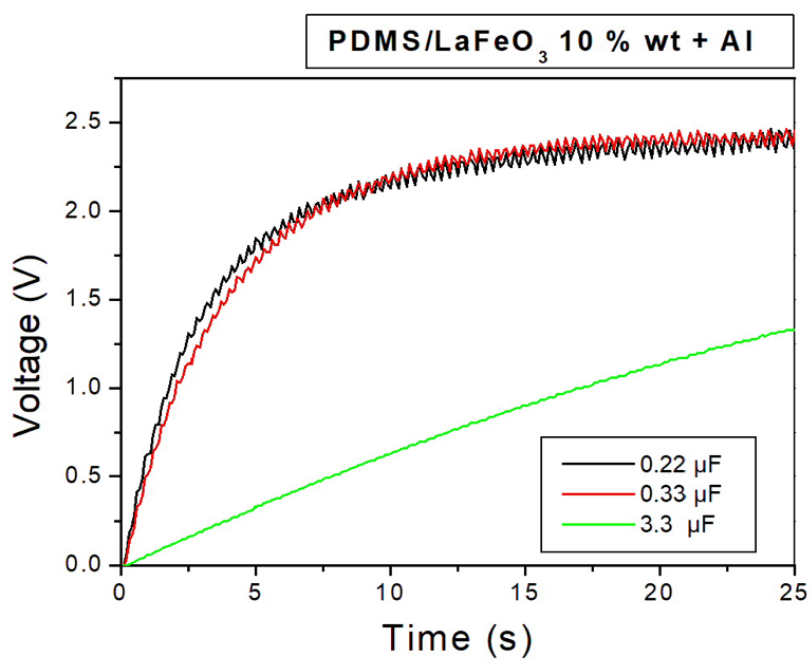
จากการศึกษาวิจัยที่ออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ โดย ใช้การทดสอบทางไฟฟ้าในรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก ที่มีการใช้วัสดุแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิล ซิลอกเซน (PDMS Composite) ที่เติมด้วยสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ (Rare Earth Perovskite Oxide) ได้แก่ แลนทานัมเฟอร์ไรต์ (LaFeO_3), ซัมมาเรียมเฟอร์ไรต์ (SmFeO_3) และนีโอดีเมียมเฟอร์ไรต์ (NdFeO_3) โดยศึกษาค่ากำลังไฟฟ้าขาออก พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของ งานวิจัยเราที่มีชั้นคู่สัมผัสที่ 1 เป็น PDMS/ LaFeO_3 ซึ่งแสดงสมบัติความเป็นลบ และใช้คู่วัสดุคู่ที่ 2 เป็น แผ่นอลูมิเนียมที่แสดงสมบัติความเป็นบวก โดยพบว่าให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับงานวิจัย อื่น แสดงดังตาราง 19

ตาราง 19 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของ PDMS ที่เติมด้วยแลนทานัมเฟอร์ไรต์ (LaFeO_3)

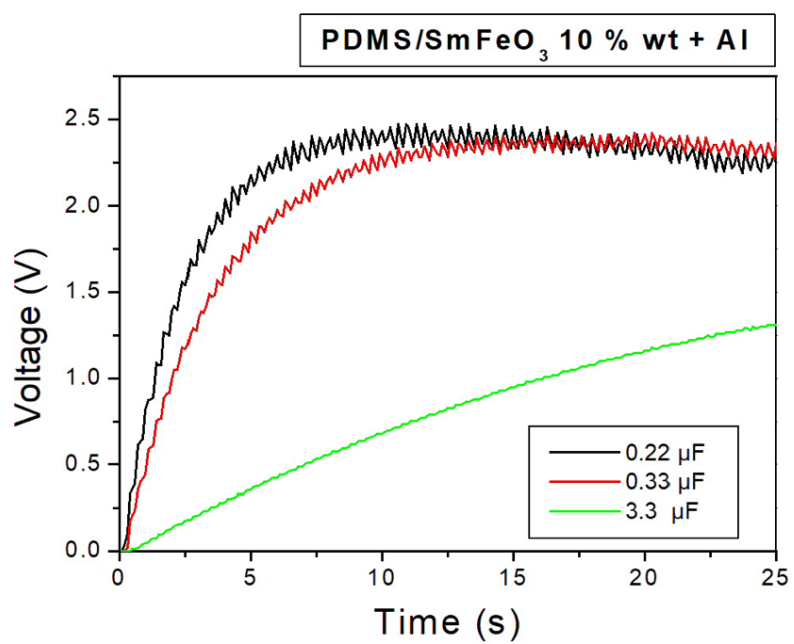
วัสดุคู่สัมผัสที่ 1	วัสดุคู่สัมผัสที่ 2	ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก	ที่มา
PDMS/ BaTiO_3	Aluminum	1.184 W/m ²	[34]
PDMS/ BaTiO_3	ITO	160 μW	[35]
PDMS/ ZnO	Aluminum	0.26 W/cm ²	[37]
PDMS/ LaFeO_3	Aluminum tape	221.11 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Our work

10. ตัวขารจประจุ (Capacitor)

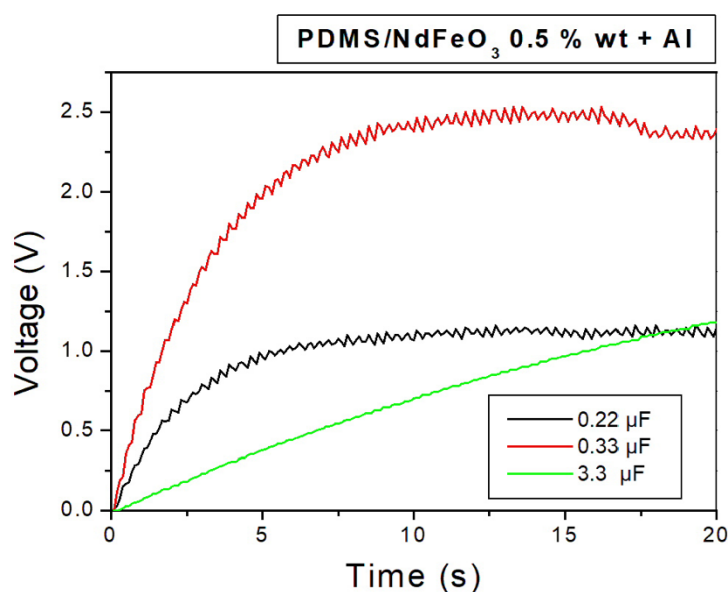
การทดสอบความสามารถในการชาร์จประจุ (capacitor) ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็น กระแสตรงเพื่อจ่ายไฟฟ้า ให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ หรือเรียกว่า Power Supply ซึ่งตัวขารจประจุมีทั้งหมด 3 ขนาด ได้แก่ 0.22, 0.33 และ 3.3 μF เพื่อดูประสิทธิภาพในการชาร์จประจุ พบว่าแผ่นฟิล์ม PDMS ที่เติม แลนทานัมเฟอร์ไรต์ ที่ 10 % wt สามารถชาร์จประจุเต็มได้ที่สองความจุคือ 0.22 และ 0.33 μF โดย สามารถอัดประจุได้เต็มที่ประมาณ 2.17 V ใช้เวลา 10.53 วินาที และ 2.21 V ใช้เวลา 10.47 วินาที ตามลำดับ แต่ที่ความจุ 3.3 μF ไม่สามารถชาร์จประจุได้เต็ม สังเกตได้จากกราฟสี่เหลี่ยม ซึ่งยังมีค่าไม่คงที่ จากการชาร์จ แสดงดังภาพประกอบ 4.53 ส่วนแผ่นฟิล์ม PDMS ที่เติมซัมมาเรียมเฟอร์ไรต์ ที่ 10 % wt และแผ่นฟิล์ม PDMS ที่เติมนีโอดีเมียมเฟอร์ไรต์ ที่ 0.5 % wt พบว่าสามารถชาร์จประจุได้เต็มที่สองความจุ เช่นเดียวกันคือ 0.22 และ 0.33 μF โดยสามารถอัดประจุ 0.22 μF ได้เต็มที่ประมาณ 2.24 V ใช้เวลา 6.31 วินาที และประมาณ 0.86 V ใช้เวลา 3.71 วินาที ตามลำดับและอัดประจุที่ 0.33 μF ได้เต็มที่ ประมาณ 2.12 V ใช้เวลา 7.62 วินาที และ 2.15 V ใช้เวลา 6.10 วินาที ตามลำดับ แต่ที่ความจุ 3.3 μF ไม่สามารถชาร์จประจุได้เต็มที่ทั้งสองตัวอย่าง สังเกตได้จากกราฟสี่เหลี่ยมที่ยังมีค่าไม่คงที่จากการชาร์จ เช่นเดียวกัน แสดงดังภาพประกอบ 4.54 และภาพประกอบ 4.55



ภาพประกอบ 4.53 แสดงค่าการชาร์จประจุของ PDMS/LaFeO₃ 10 % wt



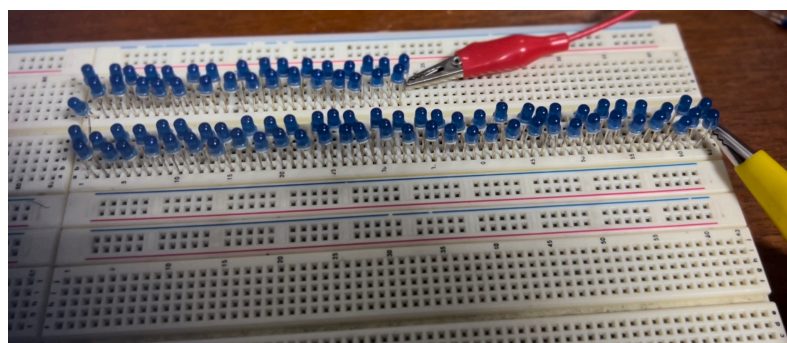
ภาพประกอบ 4.54 แสดงค่าการชาร์จประจุของ PDMS/SmFeO₃ 10 % wt



ภาพประกอบ 4.55 แสดงค่าการชาร์จประจุของ PDMS/NdFeO₃ 0.5 % wt

11. Light emitting diode (LED)

จากการตรวจสอบค่า maximum power พบว่าค่า maximum power ตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ อุปกรณ์ TENG ที่ประกอบขึ้นจาก PDMS composite กับ แลนทานัมเฟอร์ไรต์ (LaFeO₃) ที่อัตราส่วน 10 % wt จึงนำ PDMS/LaFeO₃ ที่ 10 % wt ทำการทดสอบเพื่อดูว่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถที่จะขับเคลื่อน (Light emitting diode : LED) ได้ที่ปริมาณจำนวนกี่หลอด โดยทำการต่อ LED แบบอนุกรม แสดงดังภาพประกอบ 4.56 ซึ่งผลปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพียงพอที่จะสามารถขับเคลื่อนความสว่างให้กับหลอด LED ขนาด 0.3 mm. ได้จำนวน 60 หลอด แสดงดังภาพประกอบ 4.57



ภาพประกอบ 4.56 แสดงภาพการต่อหลอดไฟ LED แบบอนุกรม



ภาพประกอบ 4.57 แสดงภาพการทดสอบการขับเคลื่อนหลอดไฟ LED

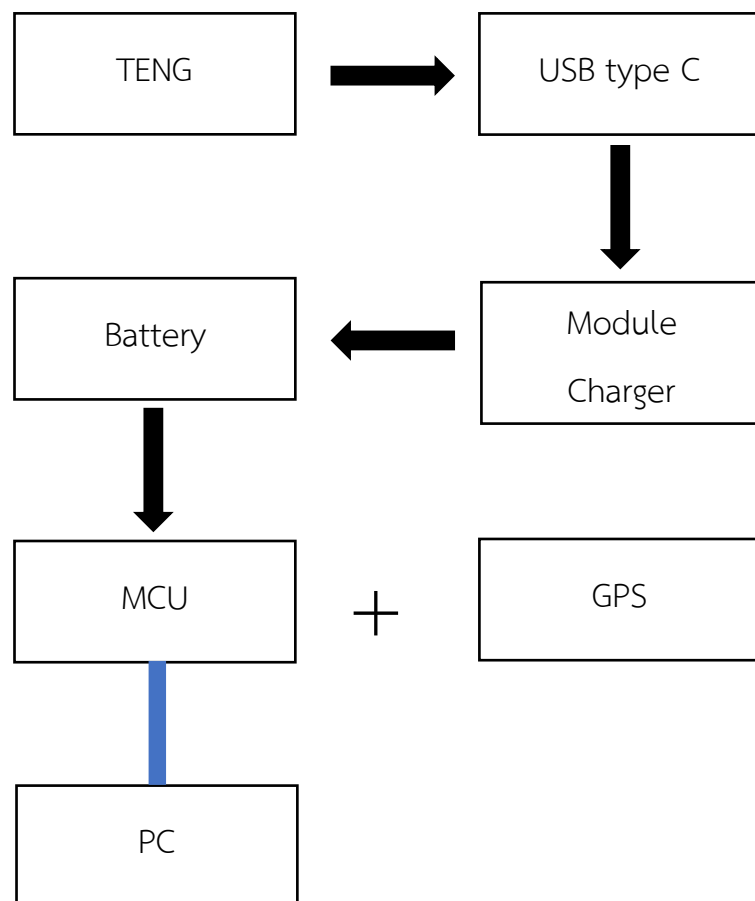
12. การนำอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) ไปประยุกต์ใช้งาน (Application)

สำหรับการนำไปใช้งานผู้จัดทำได้ออกแบบรองเท้าที่สามารถติดตามได้ด้วย GPS ซึ่งเป็นรองเท้าที่สามารถใช้ได้กับทุกเพศทุกวัย โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกออกแบบให้อยู่ในพื้นรองเท้า โดยให้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) อยู่ตรงส่วนส้นเท้าเพื่อรับแรงกด และวงจรต่าง ๆ กับ GPS จะอยู่ในส่วนกลางเท้า แสดงดังภาพประกอบ 4.58

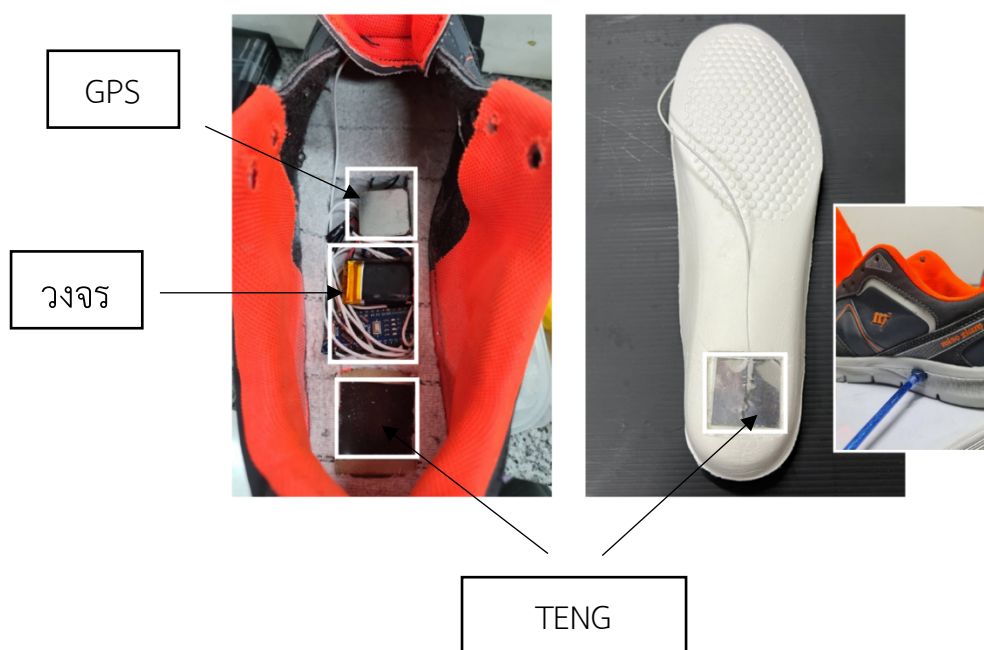


ภาพประกอบ 4.58 แสดงส่วนประกอบของรองเท้า

โดยการต่อวงจรภายในพื้นรองเท้าเริ่มจากการเจาะพื้นรองเท้า ซึ่งจะทำการเจาะเป็นสองส่วน ส่วนแรกที่จะเจาะจะอยู่ตรงส้นเท้าเพื่อที่จะวางอุปกรณ์ TENG โดยจะใช้อุปกรณ์ TENG ที่ประกอบขึ้นจาก PDMS Composite กับ แลนทานัมเฟอไรต์ (Lanthanum Iron Oxide: LaFeO_3) ที่อัตราส่วน 10 % wt ที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงที่สุด และส่วนที่สองจะอยู่ตรงส่วนกลางเท้า เพื่อที่จะนำวงจรไปติดตั้ง โดยวิธีการต่อวงจร จะนำอุปกรณ์ TENG ต่อกับ USB type C จากนั้นนำ USB type C ต่อกับ module charger ที่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ ซึ่งทำหน้าที่ในการนำไฟฟ้าไปเก็บที่แบตเตอรี่ และ MCU ที่ถูกโปรแกรมติดตาม GPS และตัว GPS ตามลำดับ จากนั้นทำการเจาะที่ด้านข้างรองเท้าให้ตรงกับตัว MCU เพื่อต่อสาย Arduino nano controller เข้ากับ MCU และทำการต่อสายดังกล่าวเข้ากับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เพื่อดูตำแหน่งล่าสุด โดยวิธีการต่อวงจรภายในรองเท้าและรองเท้าที่ทำการต่อวงจร แสดงดังภาพประกอบ 4.59 และภาพประกอบ 4.60 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.59 วิธีการต่อวงจรภายในรองเท้า

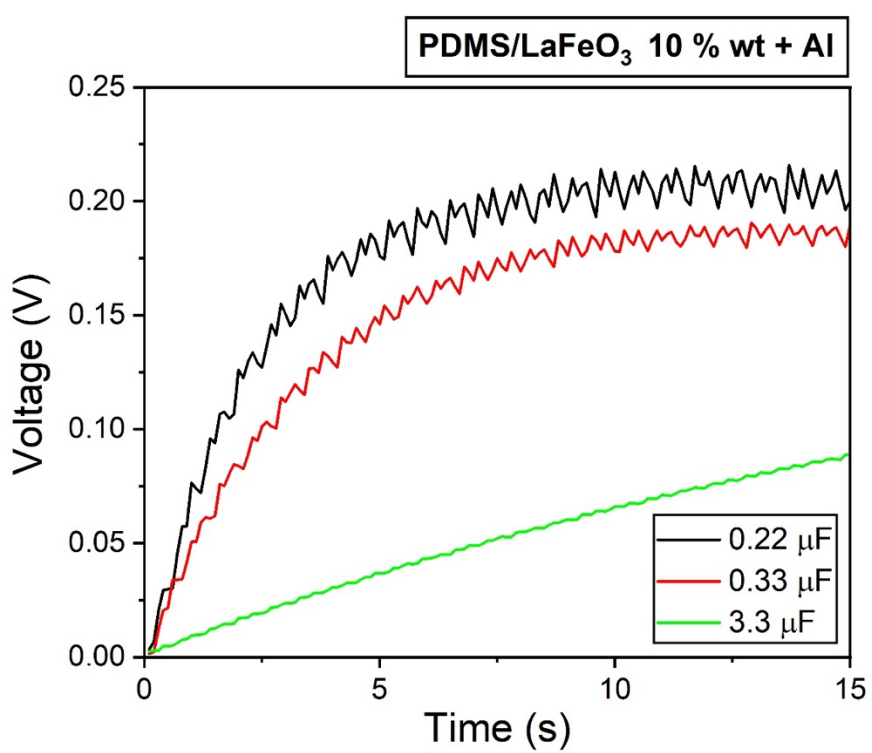


ภาพประกอบ 4.60 แสดงภาพรองเท้าที่ทำการต่อวงจร

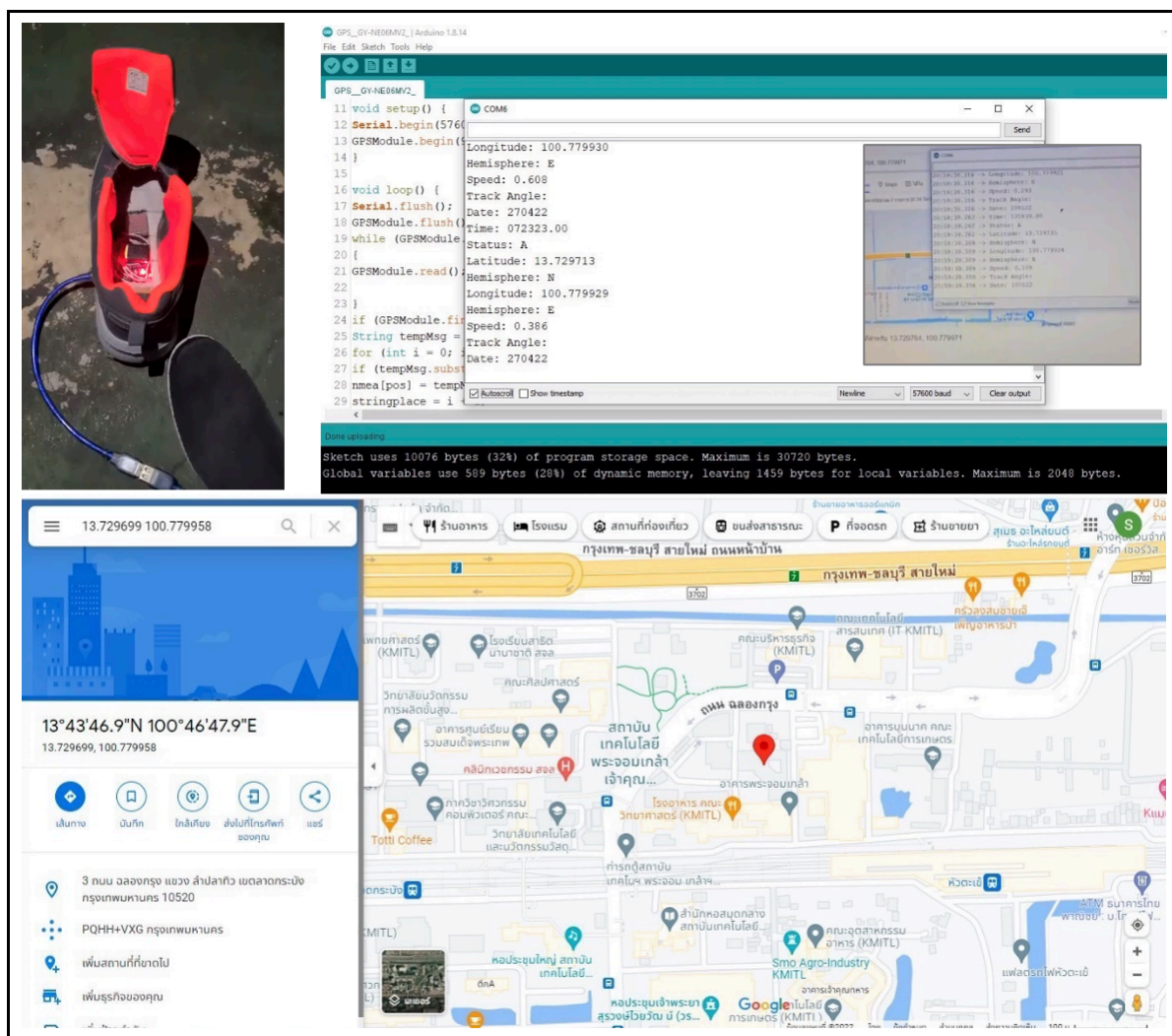
โดยเมื่อทำการประดิษฐ์รองเท้าสำเร็จ ได้ทำการทดลองเหยียบรองเท้าเพื่อดูประสิทธิภาพของรองเท้าว่าสามารถเป็นอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าให้กับตัว GPS ได้เพียงพอหรือไม่ โดยการใช้รองเท้าในการชาร์จประจุ (Capacitor) แสดงดังภาพประกอบ 4.61 ซึ่งเมื่อทำการชาร์จประจุแล้ว พบว่าที่ค่าตัวเก็บประจุเท่าเดิม สามารถอัดไฟให้กับตัวเก็บประจุได้ไม่เท่ากับอุปกรณ์ที่ยังไม่ได้ทำเป็นรองเท้า แสดงดังภาพประกอบ 4.62 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Voltage) ในการอัดเข้าไปในตัวชาร์จประจุลดลง แต่อย่างไรก็ตามการใช้รองเท้าสามารถอัดประจุจนเสถียรได้ โดยที่ $0.22 \mu\text{F}$ ได้เต็มทีประมาณ 0.22 V ที่ระยะเวลา 6.8 วินาที และที่ 0.33 ได้ประมาณ 0.18 V ที่ระยะเวลา 7.8 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ TENG ที่อยู่ในพื้นรองเท้า ไม่เพียงพอต่อการจ่ายไฟฟ้าให้กับ GPS เนื่องจากไม่สามารถผลิตไฟได้แบบทันท่วงที จึงมีการใช้แบตเตอรี่เพื่อสะสมไฟไว้ที่แบตเตอรี่ และใช้แบตเตอรี่ในการจ่ายไฟให้กับ GPS เพื่อให้ตัว GPS สามารถระบุตำแหน่งได้ โดยทำการทดลองหาตำแหน่งของ GPS ที่อยู่ในพื้นรองเท้า แสดงดังภาพประกอบ 4.63 พบว่าสามารถหาตำแหน่งที่อยู่ของ GPS ได้สำเร็จ



ภาพประกอบ 4.61 แสดงภาพการทดลองใช้รองเท้าในการชาร์จประจุ



ภาพประกอบ 4.62 แสดงค่าการชาร์จประจุของอุปกรณ์ TENG ในพื้นรองเท้า



ภาพประกอบ 4.63 แสดงภาพการทดลองหาตำแหน่งของ GPS

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ด้วยการเติมสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ชนิด R_2O_3 และ $RFeO_3$ เมื่อ R คือ แลนทานัม (La), ซัมมาเรียม (Sm) และนีโอดิเมียม (Nd) ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) เพื่อนำมาใช้เป็นชั้น charge-generating layer ในอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator: TENG) รูปแบบการสัมผัสแบบตัก (Contact-separation mode) โดยทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) วิเคราะห์ลักษณะทางกายของแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite) ตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคในแผ่นฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซนด้วยกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy: SR-XTM) และตรวจวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กทริก และค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของอุปกรณ์ TENG โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1.1 การสังเคราะห์วัสดุกลุ่มออกไซด์ไดอิเล็กทริกและวัสดุออกไซด์เชิงซ้อนไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ

ผลจากการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ พบว่าผลึกของกลุ่มสารประกอบออกไซด์ ได้แก่ La_2O_3 , Sm_2O_3 และ Nd_2O_3 และผลึกของกลุ่มออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ ได้แก่ $LaFeO_3$, $SmFeO_3$ และ $NdFeO_3$ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับระนาบของผลึกดังกล่าว แสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์วัสดุกลุ่มออกไซด์ไดอิเล็กทริกและวัสดุออกไซด์เชิงซ้อนไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ

1.2 การขึ้นรูปคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS Composite)

ผลจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริก และ PDMS กับ วัสดุไดอิเล็กทริกชนิดโคโลซอล ด้วยกระบวนการหล่อแบบ ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt พบว่า ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม PDMS และแผ่นฟิล์ม PDMS Composite มีพื้นผิวเรียบ และมีความ ยืดหยุ่นสูง สามารถดัด บิด งอ ได้ทุกอัตราส่วนการเติมสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อน โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ

ผลจากการศึกษาผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของ PDMS pure และ PDMS Composite ด้วย เทคนิค IR เพื่อตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน พบว่า PDMS pure มีการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันสอดคล้องกับตัว ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ PDMS ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PDMS ที่งานวิจัยฉบับนี้ทำการขึ้นรูปไม่มีหมู่ฟังก์ชันของ เฟสอื่นเจือปน และในส่วน PDMS Composite ที่เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็น องค์ประกอบ พบว่าพีคการดูดกลืนสอดคล้องกับ PDMS แต่ไม่พบพีคที่แสดงสัญลักษณ์ของสารประกอบ ออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากพีคของสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็น องค์ประกอบอยู่ต่ำกว่าช่วงที่เครื่องมือจะทำการตรวจสอบได้ จึงมีการใช้เทคนิค XRD เพื่อตรวจสอบเฟส เพิ่ม ซึ่งจากการศึกษาผลการตรวจสอบ PDMS pure และ PDMS composite ที่เติมด้วยสารประกอบ ออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ด้วยเทคนิค XRD พบว่า PDMS pure พบ broad พีค ตั้งแต่ บริเวณองศาที่ 12-22 ซึ่งเป็นพีคของ amorphous PDMS และหลังจากเติม La_2O_3 และ Sm_2O_3 พบว่ามี พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ La_2O_3 และ Sm_2O_3 เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ประสบ ความสำเร็จในการทำคอมโพสิตระหว่าง PDMS กับ สารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ และในการศึกษาการตรวจสอบเอกลักษณ์ของ PDMS composite ที่เติมด้วยสารประกอบออกไซด์ เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ด้วยเทคนิค IR พบว่ายังคงแสดงพีคการ ดูดกลืนหลักเป็น PDMS อยู่ แต่อย่างไรก็ตามในการเติมสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟ สไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ พบพีคการดูดกลืน perovskite ของ Fe oxide อยู่ที่พีคการดูดกลืน บริเวณ 550 แสดงให้เห็นว่าสามารถยืนยันการทำ PDMS composite กับ สารประกอบออกไซด์เชิงซ้อน โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบได้ในเทคนิค IR

ผลจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ SR-XTM เพื่อดูการกระจายตัวของผลึกของสารประกอบ ออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบใน PDMS Composite พบว่าที่ทุกตัวอย่างการเติมมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น โดยที่ อัตราส่วนการเติมที่ 2.5 % wt จะพบการกระจายตัวที่ดี และที่ 10 % wt จะพบการกระจายตัวที่ หนาแน่น และมีการเกาะกลุ่มกันเกิดขึ้น

และสุดท้ายจากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาของ PDMS ที่เติมด้วย LaFeO_3 ด้วยกล้อง SEM พบว่าอนุภาคของ LaFeO_3 มีการแทรกตัวอยู่ในเนื้อเมทริกของ PDMS โดยที่ไม่สามารถหาขนาดที่แน่นอนได้ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดและรูปร่างที่ไม่ได้สม่ำเสมอ และค่อนข้างมีการเกาะกลุ่มกัน แต่อย่างไรก็ตามสามารถอนุมานได้ว่าอนุภาคมีขนาดเล็กที่สุดอยู่ในช่วง 200 nm - 1 μm และที่กำลังขยายเดียวกัน ที่อัตราส่วนการเติม 2.5 % wt มีปริมาณของเฟสกระจายน้อยกว่าที่อัตราส่วนการเติม 10 % wt อย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นได้ทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS เพื่อยืนยันผลึกที่แทรกตัวอยู่ในเมทริก เพื่อยืนยันธาตุองค์ประกอบ โดยที่อัตราส่วน 2.5 % wt มีการพบ Si, C และ O ที่เป็นองค์ประกอบของ PDMS ปนอยู่กับธาตุที่เป็น La, Fe และ O ซึ่งเป็นสัดส่วนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ LaFeO_3 และที่อัตราส่วน 10 % wt มีการพบ Si, C และ O ที่เป็นองค์ประกอบของ PDMS ปนอยู่กับธาตุที่เป็น La, Fe และ O เช่นเดียวกัน และมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคที่ทำการเติมลงใน PDMS คือ LaFeO_3

1.3 การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator)

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างอุปกรณ์ TENG รูปแบบการสัมผัสแบบตึงฉาก ซึ่งจะประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด ที่มีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันมาสัมผัสหรือเสียดสี เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า โดยจะนำแผ่นฟิล์ม PDMS ที่เติมสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อน โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบเป็นวัสดุลบ โดยใช้เป็นชั้น charge-generating layer เป็นชั้นที่สัมผัสกับอีกวัสดุหนึ่ง และทำการติดอลูมิเนียมเทปที่ด้านล่างเพื่อใช้เป็นขั้วและเพื่อทำหน้าที่ในการพาประจุ จากนั้นติดด้วยลวดทองแดงเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟ และนำไปประกอบกับฝั่งที่เป็นบวกที่มีการติดลวดทองแดงไว้ โดยจะใช้เป็นอลูมิเนียมเทปที่สามารถทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวกและเป็นตัวพาประจุได้ และมีการใช้แผ่นอะคริลิกเพื่อให้ด้านบนและด้านล่างประกบกัน

1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์ม PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์ม PDMS Composite กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบและออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ เพื่อศึกษาค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt ผลที่ได้พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของ PDMS pure มีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.14 ถึง 3.15 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ PDMS/ Sm_2O_3 ที่อัตราส่วน 10 % wt อยู่ในช่วง 4.50 ถึง 4.55 ซึ่งจะมีค่าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ต่ำสุดที่การเติมสารประกอบ Sm_2O_3 ที่อัตราส่วน 5 % wt ซึ่งอยู่ในช่วง 0.002 ถึง 0.005 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการเติมสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ และเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ PDMS/ LaFeO_3 ที่อัตราส่วน 5 % wt อยู่ในช่วง 5.98 ถึง 6.06 ซึ่งจะมีค่าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดที่ PDMS/ SmFeO_3 ที่อัตราส่วน 2.5 % wt ซึ่งอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.010 โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความหนาแน่นประจุ ซึ่งค่าความหนาแน่นประจุจะแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแปรผกผันกับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก โดยเมื่อมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกต่ำลงหรือลดลง

1.5 การศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก, ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบแผ่นฟิล์ม PDMS กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นกลุ่มสารประกอบออกไซด์และออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

การศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) ด้วยอุปกรณ์อุปกรณ์ TENG ซึ่งแผ่นอลูมิเนียมและเทปลอนถูกนำมาเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นฟิล์ม PDMS แผ่นฟิล์ม PDMS/ R_2O_3 และแผ่นฟิล์ม PDMS/ RFeO_3 ที่อัตราส่วน 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt ผลที่ได้พบว่าเมื่อนำ PDMS/ R_2O_3 ไปติดกับอลูมิเนียมเทปได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกลดลง และได้ทำการนำ PDMS/ R_2O_3 ไปติดกับเทปลอนพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่า PDMS pure จากนั้นได้ทำการนำ PDMS/ RFeO_3 ไปติดกับแผ่นอลูมิเนียมพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขา

ออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำไปเทียบกับ PDMS/RFeO₃ ที่นำไปติดกับเทปลอนที่มีค่าลดลง ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่า PDMS pure โดย PDMS/LaFeO₃ ที่ 10 % wt ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 75 V และ 164 nA และได้นำ PDMS/RFeO₃ ไปตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้าขาออก ผลที่ได้พบว่า PDMS/LaFeO₃ ที่ 10 % wt ที่ความต้านทาน 1M Ω ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 1,990 μ W

1.6 การนำไปใช้งาน (Application)

จากการศึกษาการนำอุปกรณ์ TENG ไปใช้งานในรองเท้า ที่สามารถติดตามได้ด้วย GPS ซึ่งทำการออกแบบการต่อวงจรภายใน โดยทำการเจาะส่วนสันเท้าเพื่อที่จะวางอุปกรณ์ TENG และส่วนที่สองอยู่ในส่วนกลางเท้าเพื่อที่จะติดตั้งวงจร โดยวิธีการต่อวงจร จะนำอุปกรณ์ TENG ต่อกับ USB type C จากนั้นนำ USB type C ต่อกับ module charger ที่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ ซึ่งทำหน้าที่ในการนำไฟฟ้าไปเก็บที่แบตเตอรี่ และ MCU ที่ถูกโครฟ์โปรแกรมติดตาม GPS และตัว GPS ตามลำดับ จากนั้นจะทำการเจาะที่ด้านข้างรองเท้าให้ตรงกับตัว MCU เพื่อต่อสาย Arduino nano controller เข้ากับ MCU และทำการต่อสายดังกล่าวเข้ากับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เพื่อดูตำแหน่งล่าสุด ซึ่งจากการทดสอบพบว่า อุปกรณ์ TENG ที่อยู่ในรองเท้าสามารถอัดประจุจนเสถียรได้ โดยที่ 0.22 μ F ได้เต็มทีประมาณ 0.22 V ที่ระยะเวลา 6.8 วินาที และที่ 0.33 ได้ประมาณ 0.18 V ที่ระยะเวลา 7.8 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ TENG ที่อยู่ในพื้นรองเท้า ไม่เพียงพอต่อการจ่ายไฟฟ้าให้กับ GPS เนื่องจากไม่สามารถผลิตไฟได้แบบทันทั่วทั้งที่ จึงมีการใช้แบตเตอรี่เพื่อสะสมไฟไว้ที่แบตเตอรี่ และใช้แบตเตอรี่ในการจ่ายไฟให้กับ GPS ทำให้ตัว GPS สามารถระบุตำแหน่งได้

2. ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบเพื่อหาวิธีการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มให้มีความหนาทั่วทั้งแผ่นสม่ำเสมอ เพื่อประสิทธิภาพในการนำแผ่นฟิล์มไปตรวจสอบสมบัติ และการนำไปใช้งาน
2. การนำอุปกรณ์ TENG ไปใช้งานในรองเท้าที่สามารถติดตามได้ด้วย GPS สามารถพัฒนาจากการหาตำแหน่งโดยการต่อเข้ากับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ให้เป็นระบบไร้สาย (Wireless) ได้ โดยการติดตั้งตัว Wireless ไว้ในวงจร เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในอนาคต
3. ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์ TENG และการวางตำแหน่งในพื้นที่รองเท้า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Kim MP, Um D-S, Shin Y-E, Ko H. High-performance triboelectric devices via dielectric polarization: A review. *Nanoscale Research Letters*. 2021;16(1):35.
2. Menge HG, Kim JO, Park YT. Enhanced triboelectric performance of modified pdms nanocomposite multilayered nanogenerators. *Materials*. 2020;13(18).
3. Kim TY, Kim SK, Kim S-W. Application of ferroelectric materials for improving output power of energy harvesters. *Nano Convergence*. 2018;5(1):30.
4. Baek C, Yun JH, Wang JE, Jeong CK, Lee KJ, Park K-I, et al. A flexible energy harvester based on a lead-free and piezoelectric bctz nanoparticle–polymer composite. *Nanoscale*. 2016;8(40):17632-8.
5. Park H-W, Huynh ND, Kim W, Hwang HJ, Hong H, Choi K, et al. Effects of embedded tio₂-x nanoparticles on triboelectric nanogenerator performance. *Micromachines*. 2018;9(8).
6. Jang S, Oh JH. Rapid fabrication of microporous batio₃/pdms nanocomposites for triboelectric nanogenerators through one-step microwave irradiation. *Sci Rep*. 2018;8(1):14287.
7. Wang Y, Jie W, Yang C, Wei X, Hao J. Colossal permittivity materials as superior dielectrics for diverse applications. *Advanced Functional Materials*. 2019;29(27):1808118.
8. Singh KD, Singh F, Choudhary RJ, Kumar R. Consequences of r³⁺ cationic radii on the dielectric and magnetic behavior of rcro₃ perovskites. *Applied Physics A*. 2020;126(3):148.
9. Huang S, Shi L, Tian Z, Yuan S, Wang L, Gong G, et al. High-temperature colossal dielectric response in rfeo₃ (r=la, pr and sm) ceramics. *Ceramics International*. 2015;41(1 Part A):691-8.
10. Sawant A. Power electronics market 2019 global industry analysis by size, share, growth factors, competitive landscape, with regional forecast to 2023. 2019.
11. ByakkoHD. แวโร่เบิล (wearable) เทคโนโลยีเคียงคู่ life style สุดล้ำหน้า. 2015. Available from: <https://ireview.in.th/article-what-is-wearable-technology/>
12. Thainiramit P. Developments of energy harvesting using the piezoelectric methods. 2013.

13. Putson C. Harvesting on ambient mechanical energy with smart polymers. 2012;17:182-8.
14. Wongwiriyan W. Triboelectric nanogenerators: A solution of the next energy. 154-67.
15. KAISAARD S, SAWANAKARN O. Enhanced-performance bacteria cellulose-based triboelectric nanogenerator with 2d oxide nanosheets. 2019.
16. Karan SK, Maiti S, Lee JH, Mishra YK, Khatua BB, Kim JK. Recent advances in self-powered tribo-/piezoelectric energy harvesters: All-in-one package for future smart technologies. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(48):2004446.
17. Kim DW, Lee JH, Kim JK, Jeong U. Material aspects of triboelectric energy generation and sensors. *NPG Asia Materials*. 2020;12(1):6.
18. Miller K. Triboelectric series. 2011. Available from: http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Triboelectric_series
19. Kim YJ, Lee J, Park S, Park C, Choi H-J. Effect of the relative permittivity of oxides on the performance of triboelectric nanogenerators. *RSC Advances*. 2017;7(78):49368-73.
20. Hwang HJ, Lee Y, Lee C, Nam Y, Park J, Choi D, et al. Mesoporous highly-deformable composite polymer for a gapless triboelectric nanogenerator via a one-step metal oxidation process. *Micromachines*. 2018;9(12).
21. Jing T, Xu B, Guan X, Yang Y, Wu M, Jiang C. Liquid-filling polydimethylsiloxane composites with enhanced triboelectric performance for flexible nanogenerators. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2020;305(9):2000275.
22. Chandrasekhar A, Alluri NR, Saravanakumar B, Selvarajan S, Kim S-J. A microcrystalline cellulose ingrained polydimethylsiloxane triboelectric nanogenerator as a self-powered locomotion detector. *Journal of Materials Chemistry C*. 2017;5(7):1810-5.
23. Sriphan S, Charoonsuk T, Maluangnont T, Vittayakorn N. High-performance hybridized composited-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators based on batio₃/pdms composite film modified with ti_{0.8}o₂ nanosheets and silver nanopowders cofillers. *ACS Applied Energy Materials*. 2019;2(5):3840-50.

24. Wang D, Lin Y, Hu D, Jiang P, Huang X. Multifunctional 3d- mxene/ pdms nanocomposites for electrical, thermal and triboelectric applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020;130:105754.
25. Biutty MN, Koo JM, Zakia M, Handayani PL, Choi UH, Yoo SI. Dielectric control of porous polydimethylsiloxane elastomers with au nanoparticles for enhancing the output performance of triboelectric nanogenerators. *RSC Advances*. 2020;10(36):21309-17.
26. Zhang P, Zhang W, Deng L, Zhang H. A triboelectric nanogenerator based on temperature- stable high dielectric batio₃- based ceramic powder for energy harvesting. *Nano Energy*. 2021;87:106176.
27. Luechar P, Harnchana V. Power output enhancement of triboelectric nanogenerator with surface modified polydimethylsiloxane. 2021:7.
28. Ibrahim M, Jiang J, Wen Z, Sun X. Surface engineering for enhanced triboelectric nanogenerator. *Nanoenergy Advances*. 2021;1(1).
29. Gregersen. E. Dielectric. 2021. Available from: <https://www.britannica.com/science/dielectric>
30. Kwon YH, Shin S-H, Kim Y-H, Jung J-Y, Lee MH, Nah J. Triboelectric contact surface charge modulation and piezoelectric charge inducement using polarized composite thin film for performance enhancement of triboelectric generators. *Nano Energy*. 2016;25:225-31.
31. Qian Y, Kang DJ. Poly(dimethylsiloxane) / zno nanoflakes/ three- dimensional graphene heterostructures for high- performance flexible energy harvesters with simultaneous piezoelectric and triboelectric generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018;10(38):32281-8.
32. Liu H, Feng Y, Shao J, Chen Y, Wang ZL, Li H, et al. Self-cleaning triboelectric nanogenerator based on tio₂ photocatalysis. *Nano Energy*. 2020;70:104499.
33. Su H, Wang X, Li C, Wang Z, Wu Y, Zhang J, et al. Enhanced energy harvesting ability of polydimethylsiloxane- batio₃- based flexible piezoelectric nanogenerator for tactile imitation application. *Nano Energy*. 2021;83:105809.
34. Liu Y, Han R, Li L, Zhou Z, Chen G, Li Q. Tuning of highly dielectric calcium copper titanate nanowires to enhance the output performance of a triboelectric nanogenerator. *ACS Applied Electronic Materials*. 2020;2(6):1709-15.

35. Meng X, Zhang Z, Lin 林 D大, Liu W, Zhou S, Ge S, et al. Effects of particle size of dielectric fillers on the output performance of piezoelectric and triboelectric nanogenerators. *Journal of Advanced Ceramics*. 2021;10.
36. Kim J, Kim W, Jang G, Hyeon DS, Park MH, Hong JP. 1d stretchable block copolymer yarn-based energy harvesters via batio3/polydimethylsiloxane composite- carbon conductive ink. *Advanced Energy Materials*. 2020;10(6):1903217.
37. Kim DH, Dudem B, Yu JS. High- performance flexible piezoelectric- assisted triboelectric hybrid nanogenerator via polydimethylsiloxane- encapsulated nanoflower- like zno composite films for scavenging energy from daily human activities. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2018;6(7):8525-35.
38. สาริกฤติ ช. Rare earth. 2021. Available from: <https://www.nsm.or.th/other-service/669-online-science/knowledge-inventory/sci-vocabulary/sci-vocabulary-sciencemuseum/3770%E0%B8%98%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B8%E0%B8%AB%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%81-rare-earth.html>
39. Helmenstine A. Rare earth elements. 2015. Available from: <https://sciencenotes.org/rare-earth-elements/>
40. Lo Nigro R, Raineri V, Bongiorno C, Toro R, Malandrino G, Fragalà IL. Dielectric properties of pr2o3 high-k films grown by metalorganic chemical vapor deposition on silicon. *Applied Physics Letters*. 2003;83(1):129-31.
41. Olsson E, Cai Q, Cottom J, Jakobsen R, Shluger AL. Structural, elastic, vibrational and electronic properties of amorphous sm2o3 from ab initio calculations. *Computational Materials Science*. 2019;169:109119.
42. Feng X-Y, Liu H-X, Wang X, Zhao L, Fei C-X, Liu H-L. The study of electrical properties for multilayer la2o3/al2o3 dielectric stacks and laalo3 dielectric film deposited by ald. *Nanoscale Research Letters*. 2017;12(1):230.
43. Busani T, Devine R, Gonon P. Structural effects in the dielectric constant of rare-earth oxides: Nd2o3. *ECS Transactions*. 2019;1(5):331-40.
44. Alarcón-Flores G, Aguilar-Frutis M, Falcony C, García-Hipolito M, Araiza-Ibarra JJ, Herrera-Suárez HJ. Low interface states and high dielectric constant y2o3 films on si substrates. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 2006;24(4):1873-7.

45. Panya P, Wattanawikkam C, Laowanidwatana A, Vittayakorn N, Bongkarn T. Optimum conditions for fabrication high-density knn-ls-bf ceramics by combustion method. *Integrated Ferroelectrics*. 2013;148(1):161-70.
46. Thongrit P, Bintachitt P. The study of fabrication and piezoelectric properties with lanthanum doping in pzt by tape casting method. 2019.
47. Luo S, Daoud WA. Recent progress in organic–inorganic halide perovskite solar cells: Mechanisms and material design. *Journal of Materials Chemistry A*. 2015;3(17):8992-9010.
48. Zhao C, Wu J. Effects of secondary phases on the high-performance colossal permittivity in titanium dioxide ceramics. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018;10(4):3680-8.
49. Guruleninn. Flow diagram for co- precipitation. 2012. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Coprecipitation#/media/File:Co-precipitation.png>
50. ชนสารโชคพิบูลย์ ณ. เรื่อง ปริมาณสารสัมพันธ์ การคำนวณปริมาณสารในปฏิกิริยาเคมี. 2021. Available from: http://www.digitalschool.club/digitalschool/chemical2_2_1/chemical4_6/menu/teacher.pdf
51. W. C, M. P, A. T, N. S. Analysis and development of temperature sensor in polymer processing. 1999(Vol. 26 No. 3).
52. Center NMaMT. Sem (scanning electron microscopy) . 2021. Available from: <https://www.mtec.or.th/technical-service-2/sem/>
53. Wikimedia. Zeiss sigma hd fe- sem. 2013. Available from: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZEISS_SIGMA_HD_FE-SEM_\(10710289333\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZEISS_SIGMA_HD_FE-SEM_(10710289333).jpg)
54. Lab TSN. BL1.2w: X-ray imaging & x-ray tomographic microscopy (xtm). 2021. Available from: <https://www.slri.or.th/en/bl1-2w.html>
55. Lab TSN. X-ray imaging and x-ray tomographic microscopy (xtm). 2021. Available from: <https://www.slri.or.th/th/beamline/beamline-overview.html?view=article&id=4240>
56. Arunrat. อี น ฟ า เ ร ด ส เ ป ก โ ท ร ส โ ก ปี 2021. Available from: <http://pws.npru.ac.th/arunrat/data/files/ch3%20IR.pdf>

57. Lab TSN. Infrared (ir) spectroscopy. 2021. Available from: <https://www.slri.or.th/th/beamline/bl41.html>
58. Perkinelme. Infrared spectroscopy. 2021. Available from: <https://www.perkinelmer.com/th/category/infrared-ir-instruments>
59. Lab TSN. X- ray diffractometer (xrd) . 2021. Available from: <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>
60. CORPORATION L. Oscilloscope. 2021. Available from: <https://legatool.com/wp/5682/>
61. TECHNOLOGIES K. Digital oscilloscope, infiniivision 1000 x, 2 channel, 50 mhz, 1 gsps, 100 kpts, 7 ns. 2021. Available from: <https://th.element14.com/keysight-technologies/edux1002g/digital-storage-osc-50mhz-2-ch/dp/2690191>
62. System TT. Bench- top digital multimeter. 2021. Available from: <http://www.technotestsystem.com/14922206/%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%A5%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B9%89%E0%B8%87%E0%B9%82%E0%B8%95%E0%B9%8A%E0%B8%B0>
63. WATJANATEPIN N. Digital multimeters. 2019. Available from: <http://g-tech.ac.th/vdo/moterdoc>
64. Limited IT. Keysight 34470a. 2021. Available from: https://www.irct.co.th/shop_detail/86
65. Precision B. Bk precision 891 bench lcr meter 100mf, 100 mΩ, 9999h. 2021. Available from: <https://th.rs-online.com/web/p/lcr-meters/1217581>
66. Karthikeyan S, Selvapandiyan M. Effect of annealing temperature on the properties of lanthanum oxide (la₂o₃) nanoplates by reflux routes. Engineering sciences & Research Technology. 2018;7(3):559-62.
67. Jiang S, Li X, Li Y, Lin C, Liu J. High-pressure x-ray diffraction and raman spectroscopy of phase transitions in sm₂o₃. Applied Physics. 2013;113(1):113502-6
68. Achary SN, Chavan SV, Tyagi AK. XRD investigations in the nd₂o₃ – y₂o₃ system and structural studies of a stabilized monoclinic phase. Alloys and Compounds. 2006;441(7):332-336

69. Gerbeson CB, Glauber S, Jairo LS, Maria SC, Osmar R, Patricia M, et al. Synthesis and application of pigments based on lanthanide orthoferrites. *Processing and Application of Ceramics*. 2020;14(2):161-167
70. Han Z, Li Z, Lin X. Microstructure and magnetic properties of SmFeO_3 ceramics. *Metallurgical Engineering*. 2020;7(2):71-76
71. Stafie N, Stamatialis DF, Wessling M. Effect of PDMS cross-linking degree on the permeation performance of *pan/pdms* composite nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*. 2005;45:220-231

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. การคำนวณความเข้มข้นในขวดของ HNO_3

จากสูตร $D = \frac{M}{V}$

เมื่อ	D	คือ ความหนาแน่น
	M	คือ มวล
	V	คือ ปริมาตร

2. การคำนวณเกี่ยวกับการเตรียมสารละลาย HNO_3

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ	C_1	คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น
	C_2	คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ
	V_1	คือ ปริมาตรของสารละลายเริ่มต้น
	V_2	คือ ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

3. การคำนวณเกี่ยวกับการเตรียมสารละลาย NaOH 6 M

จากสูตร $\frac{g}{MW} = \frac{CV}{1000}$

เมื่อ	g	คือ มวลของสาร
	MW	คือ มวลโมเลกุล
	C	คือ ความเข้มข้น
	V	คือ ปริมาตรของสารละลาย

4. การคำนวณการหาน้ำหนักผงกลุ่มออกไซด์ไดอิลิกทริก และวัสดุออกไซด์เชิงซ้อนไดอิลิกทริกชนิดโคโลซอลที่มีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบ ที่ใช้ในการขึ้นรูป PDMS Composite

ถ้ามีน้ำหนัก PDMS 11.3 กรัม และน้ำหนัก Curing agent 1.1 กรัม รวมน้ำหนักทั้งหมดเป็น 12.4 กรัม โดยน้ำหนักทั้งหมด 12.4 กรัม มีค่าเท่ากับ 100 % ถ้าต้องการทราบปริมาณการเติมผงที่ 0.5 % wt ต้องใช้ผงน้ำหนัก 0.5 % wt เท่ากับ

$$= \frac{0.5 \% \text{ wt} \times 12.4 \text{ g}}{100}$$

$$= 0.062 \text{ g}$$

ถ้าต้องการทราบปริมาณการเติมผงที่ 2.5 % wt ต้องใช้ผงน้ำหนัก 2.5 % wt เท่ากับ

$$= \frac{2.5 \% \text{ wt} \times 12.4 \text{ g}}{100}$$

$$= 0.31 \text{ g}$$

ถ้าต้องการทราบปริมาณการเติมผงที่ 5 % wt ต้องใช้ผงน้ำหนัก 5 % wt เท่ากับ

$$= \frac{5 \% \text{ wt} \times 12.4 \text{ g}}{100}$$

$$= 0.62 \text{ g}$$

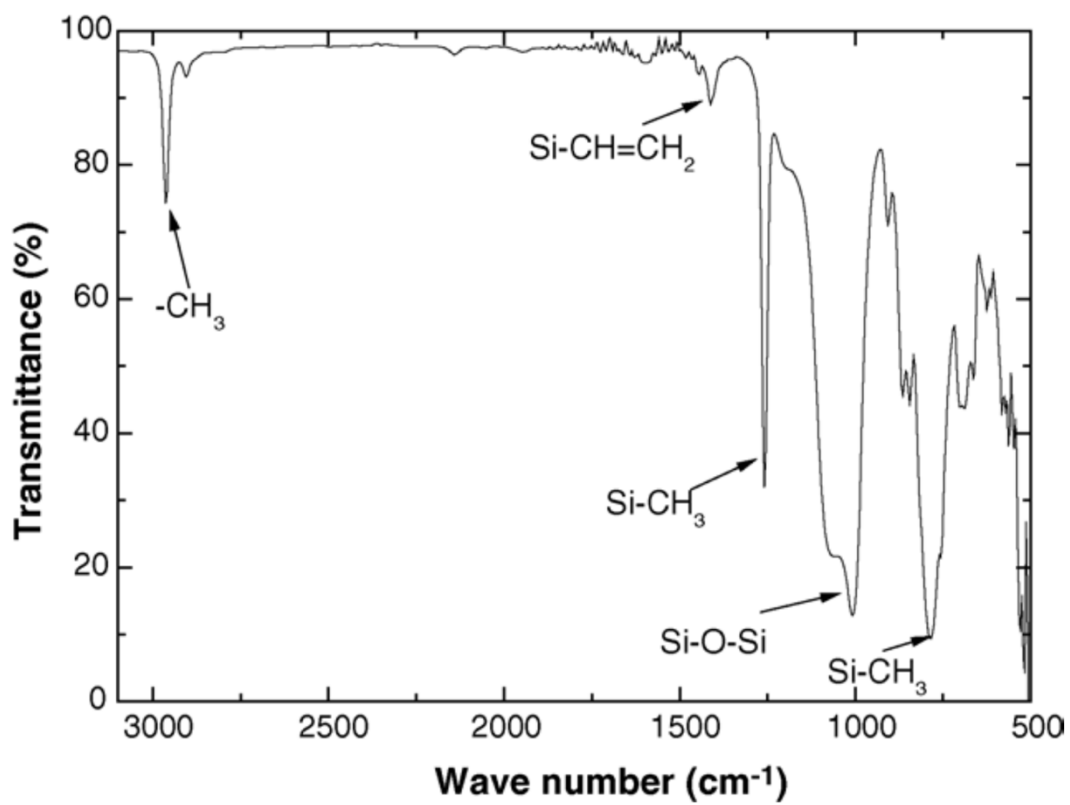
ถ้าต้องการทราบปริมาณการเติมผงที่ 10 % wt ต้องใช้ผงน้ำหนัก 10 % wt เท่ากับ

$$= \frac{10 \% \text{ wt} \times 12.4 \text{ g}}{100}$$

$$= 1.24 \text{ g}$$

ดังนั้น ปริมาณการเติมผงที่ 0.5, 2.5, 5 และ 10 % wt เท่ากับ 0.062, 0.31, 0.62 และ 1.24 กรัม ตามลำดับ

ภาคผนวก ข



ภาพประกอบ แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์ม PDMS pure จากงานวิจัยของ Stafie และคณะ [71]

ภาคผนวก ค

วิธีคำนวณหาความหนาแน่นของค่ากำลังไฟฟ้าขาออกต่อพื้นที่ของแผ่นฟิล์ม PDMS/LaFeO₃ ที่อัตราส่วน 10 % wt

เมื่อแผ่นฟิล์มมีขนาดเท่ากับ 3x3 เซนติเมตร และมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 1,990 ไมโครวัตต์

$$\text{จากสูตร} = \frac{\text{ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก}}{\text{พื้นที่ของฟิล์ม}}$$

$$= \frac{1990 \mu\text{W}}{3 \times 3 \text{ cm}}$$

$$= 211 \mu\text{W}/\text{cm}^2$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของค่ากำลังไฟฟ้าจะเท่ากับ 211 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นางสาวอัญมรินทร์ อีร์พิพัฒน์ธาดา
วัน เดือน ปี เกิด	วันอาทิตย์ที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2542
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบญจมราชาลัย ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564
ชื่อ – สกุล	นางสาวอาทิตย์ยา พลอยศรี
วัน เดือน ปี เกิด	วันอาทิตย์ที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2543
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบญจมราชาลัย ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564
ชื่อ – สกุล	นางสาวจิราพัชร เป็งกาสิทธิ์
วัน เดือน ปี เกิด	วันอังคารที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2542
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบญจมราชาลัย ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564