

การเตรียมนาโนคอมโพสิตซิงค์ออกไซด์และอีพ็อกซีเรซิน
สำหรับใช้งานเป็นระบบฉนวนในไฟฟ้าแรงดันสูง

FABRICATION AND PROPERTIES OF ZINC OXIDE/EPOXY RESIN
NANOCOMPOSITES USE IN INSULATING SYSTEM FOR HIGH-VOLTAGE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
พ.ศ. 2560

Fabrication and Properties of ZnO/Epoxy Resin Nanocomposites
use in Insulating System for High-Voltage



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2017



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมนาโนคอมโพสิตซิงค์ออกไซด์และอีพ็อกซีเรซิน
สำหรับใช้งานเป็นระบบฉนวนในไฟฟ้าแรงดันสูง

Special Project Title Fabrication and Properties of ZnO/Epoxy Resin
Nanocomposites use in Insulating System for High-Voltage

นักศึกษา นางสาวชลรดา จิตรประวัตติ
รหัสประจำตัว 57110011
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราภรณ์ วิทยากร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร. กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์	กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์
ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์	ทศพล เมลืองนนท์
รศ.ดร.วราภรณ์ วิทยากร	วราภรณ์ วิทยากร

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้วันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2561
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมนาโนคอมโพสิตซิงค์ออกไซด์และอีพ็อกซีเรซิน สำหรับใช้งานเป็นระบบฉนวนในไฟฟ้าแรงดันสูง
นักศึกษา	นางสาวชลรดา จิตรประวัติ
รหัสประจำตัว	57110011
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. วรณวิไลย์ วิทยากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิมเพื่อใช้งานเป็นระบบฉนวนในไฟฟ้าแรงดันสูง โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการผสมของอนุภาคนาโน ZnO ในอัตราส่วนต่างๆและได้ทำการเตรียมนีเม็ดเซรามิก ZnO บริสุทธิ์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์ด้วยเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ค่าความต้านทานไฟฟ้า และค่าคงทนไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ทั้งหมด จากนั้นจะทำการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมมาพัฒนาโครงสร้างและการกระจายตัวของเฟสรองเพื่อให้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่านาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินในสัดส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้นั้นแสดงค่าทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณ ZnO ที่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดที่สัดส่วนปริมาณ ZnO เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูงที่สุดที่สัดส่วนปริมาณ ZnO เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นเมื่อนำนาโนคอมโพสิตสัดส่วนปริมาณ ZnO เท่ากับ 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาปรับปรุงโครงสร้างและการกระจายตัวด้วยสารช่วยกระจาย (Span80) ก็พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีการกระจายของเฟสรองดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกและค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นไม่แตกต่างจากก่อนที่ จะปรับปรุงมากนัก แต่ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกนั้นมีความสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

Thesis Title	Fabrication and Properties of ZnO/Epoxy Resin Nanocomposites use in Insulating System for High-Voltage
Student	Miss Chonrada Jitprawat
Student ID	57110011
Degree	Bachelor of Engineering
Year	2017
Advisor	Asst.prof.Dr. Wanwilai Vittayakorn

ABSTRACT

In this work, ZnO/epoxy resin nanocomposites were fabricated by conventional casting method for using as insulator in high voltage electrical system. The amount of ZnO nanoparticle was ranking from 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 to 30 percentage by weight. Pure ZnO ceramic was also fabricated via sintering method in order to comparison. Physical properties, microstructure and electrical properties, i.e. dielectric constant, dielectric loss, resistance and dielectric breakdown strength, were investigated for all samples. After that, optimum ratios were selected for microstructure development by using Span80 as a dispersant. The results showed that, after mixed with Span80, the dispersion of second phase in microstructure of all nanocomposites was better. Even the dielectric constant and resistance were not different but the dielectric breakdown was much higher than that before.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เพราะความกรุณาจาก ผศ.ดร. วรรณวิไล วิทยากร ที่ให้โอกาสในการศึกษาค้นคว้า เป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ เพิ่มทักษะในการทำงาน และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่เครื่องมือตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือต่างๆ เจ้าหน้าที่ อาคาร 55 พรรษา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ในการใช้เครื่องมือต่างๆขอขอบคุณเพื่อนๆทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุฯโนที่ให้กำลังใจและคอยสนับสนุนกันเสมอมาขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนด้านการศึกษาตลอดมา

สุดท้ายนี้หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ผู้เขียนขออภัยอย่างสูง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิจัยพิเศษฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่มีความสนใจทางด้านนี้ต่อไป

ชลรดา จิตรประวัติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ.....	vi
สารบัญตาราง.....	x
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 การดำเนินงานและระยะเวลาที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ฉนวนไฟฟ้า.....	5
2.2 การแบ่งประเภทของฉนวนไฟฟ้า.....	5
2.2.1 ฉนวนก๊าซ.....	6
2.2.2 ฉนวนเหลว.....	16
2.2.3 ฉนวนแข็ง.....	21
2.3 ชิงค์ออกไซด์.....	28
2.3.1 การสังเคราะห์ชิงค์ออกไซด์.....	30
2.3.2 การประยุกต์ใช้ชิงค์ออกไซด์.....	33
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	36
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.4 กระบวนการเตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนชิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซิน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.1 การเตรียมผงนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับการเป็นวัสดุผสม.....	37
3.4.2 การเตรียมอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin : Resin and Hardener).....	37
3.4.3 การเตรียมวัสดุผสม.....	39
3.4.4 การเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับการซินเตอร์.....	40
3.4.5 การเผาซินเตอร์.....	41
3.4.6 การปรับปรุงคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน.....	42
3.4.7 การหาความหนาแน่นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน.....	42
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลทรรศน์ (SEM).....	42
3.5.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	43
3.5.2 การเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปถ่าย SEM.....	44
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	46
4.1 ผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ในอีพ็อกซีเรซิน.....	46
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	46
4.1.2 ความหนาแน่น.....	48
4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (SEM).....	49
4.1.4 สมบัติทางไฟฟ้า.....	53
4.2 ผลการปรับปรุงโครงสร้างของ Epoxy กับ ZnO Nanocomposites.....	57
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	57
4.2.2 ความหนาแน่น.....	59
4.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (SEM).....	60
4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้า.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 แนวทางการพัฒนา.....	67
บรรณานุกรม.....	68

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบการเกิดดิซชาร์จระหว่างการผสมอนุภาคนาโนกับการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ลงไปในอีพ็อกซีเรซิน.....	2
2.1 แสดงการใช้อากาศเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูง.....	7
2.2 การใช้อากาศเป็นฉนวนสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันเกิน.....	7
2.3 การเบรกดาวนของก๊าซ	8
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า Breakdown Vs กับผลคูณของความดันและระยะห่าง (Pd) ของการ CO ₂ , air , H ₂	10
2.5 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ α	13
2.6 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ	14
2.7 การเกิดโฟโตไอออไนเซชัน.....	15
2.8 การเกิดสตรีมเมอร์.....	16
2.9 โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง.....	17
2.10 โครงสร้างของ Polyiso butylene	18
2.11 เอสคาเรล.....	18
2.12 การจัดเรียงทางอะตอมของน้ำมันซิลิโคน.....	19
2.13 โครงสร้างหม้อแปลงกำลัง.....	20
2.14 เคเบิลฉนวนน้ำมัน.....	21
2.15 ฉนวนกระดาษ.....	22
2.16 แก้ว.....	22
2.17 ลักษณะการ Breakdown แบบต่างๆ ของฉนวนแข็ง.....	26
2.18 ขบวนการเบรกดาวนเนื่องจากเนื้อสาร	26
2.19 แสดงการเกิด Streamer ในฉนวนแข็ง.....	27
2.20 การใช้ PVC เป็นฉนวนของสายเคเบิล.....	28
2.21 ซิงค์ออกไซด์.....	28

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.22 โมเดลโครงสร้างเวอริตไซต์ (wurtzite) ของซิงค์ออกไซด์และฟิวด์เตตระไฮไดรไรด์ของ Zn^{2+} กับ O^{2-}	30
2.23 แผนภาพแสดงเตาที่อยู่ในระบบสุญญากาศที่ใช้สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยการระเหยด้วยความร้อน.....	32
2.24 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้.....	33
2.25 a) แผนผังการใช้ซิงค์ออกไซด์แตงนาโนเป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดแก๊ส b) โครงสร้างจุลภาคของแตงนาโนซิงค์ออกไซด์.....	33
3.1 เครื่องซิงค์ดิจิทัล.....	38
3.2 การเทวัสดุผสมลงแม่พิมพ์.....	39
3.3 คนวัสดุนาโนคอมโพสิตซิงค์ออกไซด์กับพอลิเมอร์ให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที.....	39
3.4 วัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซิน.....	40
3.5 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อัดขึ้นรูปเป็นเม็ด.....	40
3.6 เครื่องอัดแรงดันทิศทางเดียว (uniaxial pressing).....	41
3.7 เตาอบสารใช้สำหรับการซินเตอร์.....	41
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM).....	43
3.9 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM).....	44
4.1 ภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ.....	47
4.2 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ.....	48
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณ ZnO	49
4.4 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆของ ZnO	50
4.5 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆของ ZnO.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโพลีทริกกับความถี่ของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ.....	54
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียทางไดโพลีทริกกับความถี่ของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ.....	54
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโพลีทริกและค่าการสูญเสียทางไดโพลีทริกของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz.....	55
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับความถี่ของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ.....	56
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าและนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz.....	56
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงทนไดโพลีทริกและนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ	57
4.12 ภาพถ่ายผิวหน้าของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างด้วย Span 80.....	58
4.13 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างด้วย Span 80.....	59
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นก่อนและหลังการปรับปรุงโครงสร้างกับนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่างๆ.....	60
4.15 ภาพถ่าย SEM บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว.....	61
4.16 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว.....	61
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโพลีทริกและความถี่ของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว.....	62

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและความถี่ของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว.....	63
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณ ZnO ของนาโนคอมโพสิตก่อนและหลังทำการปรับปรุงโครงสร้างในอัตราส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz.....	63
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับปริมาณ ZnO ของนาโนคอมโพสิตก่อนและหลังทำการปรับปรุงโครงสร้างในอัตราส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz.....	64
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความถี่ของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว.....	64
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.4 การดำเนินงานและระยะเวลาที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
2.1 ตัวอย่างการใช้อากาศเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.....	6
2.2 ศักย์ไฟฟ้า breakdown ต่ำสุดของก๊าซชนิดต่างๆ.....	10
2.3 แสดงสมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	29

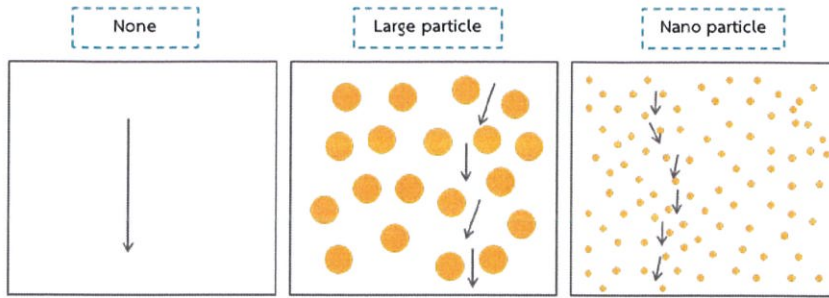


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในโลกปัจจุบันพบว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆล้วนประกอบด้วยฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าให้กับตัวนำหรือส่วนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดการลัดวงจรถึงกัน ยกตัวอย่าง เช่น สายเคเบิล ลูกถ้วยฉนวน หรือ ส่วนที่ห่อหุ้มสายไฟฟ้าในครัวเรือน เป็นต้น โดยทั่วไปจะแบ่งฉนวนออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง ฉนวนแต่ละประเภทนั้น นอกจากจะทำหน้าที่ทางการเป็นฉนวนไฟฟ้าแล้วยังมีหน้าที่เฉพาะเพิ่มเติมอีกด้วย คือ ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว มีหน้าที่ช่วยระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในขณะที่ฉนวนแข็งจะต้องทำหน้าที่ในการรองรับแรงทางกลของตัวนำไฟฟ้าที่ฉนวนแข็งนั้นรองรับโดยคุณสมบัติของฉนวนจะต้องเป็นสารที่นำไฟฟ้าได้น้อยมากหรือไม่นำไฟฟ้าเลยเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำต่อฉนวน ฉนวนที่มีความสมบูรณ์จริงๆเมื่ออยู่ใต้สนามไฟฟ้าจะไม่มีเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระเลยโดยส่วนที่บอกคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนมีทั้งหมด 4 ประการ อันได้แก่ ความต้านทาน (R) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ) แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (U_b) โดยจากคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนดังที่กล่าวมาเป็นประเด็นในการปรับปรุงฉนวนโดยลดปัญหาไฟฟ้าลัดวงจรในอุปกรณ์ไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพของฉนวนในด้านต่างๆโดยการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นฉนวนของทั้งฉนวนแข็งและฉนวนเหลว โดยในงานวิจัยหลายฉบับพบว่า วัสดุเชิงประกอบนาโน (Nanocomposite) สามารถเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนพอลิเมอร์ได้เนื่องมาจากต้องการพลังงานในการสลายพันธะระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุนาโนที่เจอเข้าไป โดยหากอนุภาคมีขนาดใหญ่จะเกิดดิสชาร์จยาวทำให้สูญเสียความเป็นฉนวนอย่างรวดเร็วกลับกันหากอนุภาคมีขนาดเล็ก (นาโนเมตร) ก็จะทำให้เกิดดิสชาร์จสั้นเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สำหรับฉนวนแข็งมีค่าสูงขึ้นและปริมาณประจุค้างก็ลดลงและยิ่งอนุภาคนาโนกระจายตัวไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนจะทำให้คุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนดีขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติของฉนวน



ภาพที่ 1.1 การเปรียบเทียบการเกิดดิซาร์จระหว่างอนุภาคนาโนกับการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ลงไปในอีพ็อกซีเรซิน

ดังนั้นวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการศึกษาการนำอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตรผสมลงไป ในอีพ็อกซีเรซินสำหรับใช้งานเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่งอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตรที่เลือกใช้นี้ คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เนื่องจากเป็นอนุภาคนาโนที่หาได้ง่ายราคาไม่แพง และมักเป็นของเหลือจากอุตสาหกรรมหลายๆประเภท โดยวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซินที่เตรียมได้นี้เชื่อว่าจะมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีและมีความยืดหยุ่นทนต่อแรงทางกลรวมถึงมีความทนทานต่อการแตกหักด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ คือ

1. เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่างซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรกับอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนที่แตกต่างกันด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของนาโนคอมโพสิตซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซิน
3. เพื่อพัฒนาโครงสร้างของนาโนคอมโพสิตกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ให้มีศักยภาพสูงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นระบบฉนวนในไฟฟ้าแรงดันสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงไปในอีพ็อกซีเรซินด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิมด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยใช้อัตราส่วนดังนี้ 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งเลือกใช้อีพ็อกซีเรซินเนื่องจากหาซื้อได้ง่ายและมีขั้นตอนการเตรียมที่ไม่ซับซ้อน พร้อมกันนี้ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานเพลสเดียวของสารตั้งต้นทั้งสองตัวด้วย โดยเซรามิกซิงค์ออกไซด์เตรียมด้วยวิธีการอัดเม็ดที่อุณหภูมิต่ำด้วยการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูง พร้อมกับเตรียมอีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์ด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบและควบคุม จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ความหนาแน่น โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การดำเนินงานและระยะเวลาที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน																				
	กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน				มกราคม				กุมภาพันธ์				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1. ทบทวนวรรณกรรมและ คิดหัวข้องานวิจัย	→																				
2. เตรียมนาโนคอมโพสิต ซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเร ซินที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	→	→	→	→																	
3. เตรียมนาโนคอมโพสิต					→	→															
4. ตรวจสอบโครงสร้างทาง จุลภาคด้วย SEM								→	→												
5. ตรวจสอบสมบัติทางด้าน ไฟฟ้า									→	→	→										
6. รวบรวมผลทั้งหมดเพื่อ ทำการวิเคราะห์หาทาง ปรับปรุงแก้ไขวัสดุ											→	→									
7. ปรับปรุงวัสดุนาโนคอม โพสิตซิงค์ออกไซด์กับอีพ อกซีเรซิน													→	→	→						
8. ตรวจสอบโครงสร้าง จุลภาคและสมบัติทางด้าน ไฟฟ้า																	→	→			
9. รวบรวมข้อมูลทั้งหมด และทำการสรุปผล																		→	→		
10. เตรียมรูปเล่มสำหรับ นำเสนองานวิจัย																				→	→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฉนวนไฟฟ้าคืออะไร

ฉนวนไฟฟ้า (Insulator) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการกีดกันหรือขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าให้กับตัวนำหรือส่วนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดการลัดวงจรถึงกัน ฉนวนที่ดีจะต้องสามารถป้องกันตัวนำไฟฟ้าจากความร้อนหรือของเหลวที่สามารถกัดกร่อนตัวนำไฟฟ้า และสามารถกันน้ำได้ดี ฉนวนที่ใช้หุ้มตัวนำไฟฟ้าต้องมีความต้านทานสูง ต้องไม่ถูกกรดหรือด่างกัดกร่อนได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 0 ถึง 200 องศาฟาเรนไฮต์ และต้องไม่ดูดความชื้นในอากาศ

2.2 การแบ่งประเภทของฉนวนไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วสามารถฉนวนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง ฉนวนแต่ละประเภทนอกจากจะทำหน้าที่ทางไฟฟ้าแล้วจะมีหน้าที่เฉพาะอย่างเพิ่มเติม ยกตัวอย่างเช่น ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว จะต้องทำหน้าที่ช่วยระบายความร้อน ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในขณะที่ฉนวนแข็งจะต้องทำหน้าที่รองรับแรงทางเชิงกลของตัวนำไฟฟ้าที่ฉนวนแข็งนั้นรองรับอยู่ การฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมักจะเป็นการใช้งานฉนวนร่วมกันมากกว่าหนึ่งประเภทยกตัวอย่างเช่น การฉนวนของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำกับเสาส่ง จะใช้ลูกถ้วยฉนวนซึ่งเป็นฉนวนแข็งร่วมกับฉนวนอากาศรอบๆลูกถ้วยฉนวน หรือในกรณีของหม้อแปลงที่ใช้กับระบบจำหน่ายซึ่งมักจะทำน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนหลักและใช้กระดาษครีฟเป็นฉนวนระหว่างรอบของขดลวดรวมทั้งกระดาษอัดแรงใช้คั่นระหว่างรอบของขดลวดตัวนำและยึดตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ การเลือกใช้ฉนวนแต่ละประเภทจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดและประเภทของงานซึ่งจะทำให้การฉนวนมีประสิทธิภาพสูง มีผลต่อความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นๆ โดยจะอธิบายคุณสมบัติของฉนวนที่แบ่งตามประเภทดังต่อไปนี้

2.2.1 ฉนวนก๊าซ

ฉนวนประเภทก๊าซมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันโดยใช้เป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้อากาศคั่นระหว่างสายตัวนำโดยที่อากาศเป็นฉนวนที่ดีและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลง สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็มีการใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน หม้อแปลงบางประเภทก็ยังมีก๊าซไนโตรเจนเป็นฉนวนร่วมกับน้ำมันหม้อแปลงอีกด้วย

2.2.1.1 การใช้อากาศเป็นฉนวน

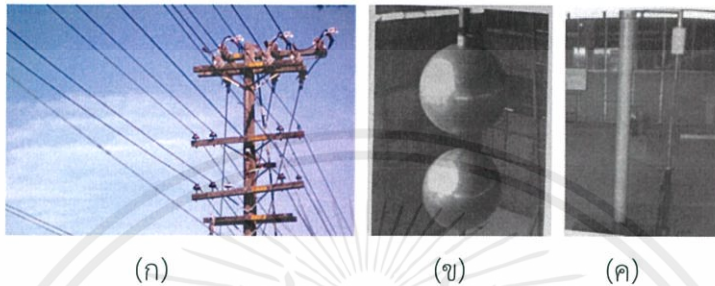
การใช้อากาศหรือก๊าซเป็นฉนวนนั้น เป็นที่นิยมกันอย่างมากในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเมื่อเป็นอากาศแห้งสะอาด การใช้อากาศเป็นฉนวนอาจจะเป็ฉนวนหลักในระบบการส่งจ่ายซึ่งจะใช้เป็นฉนวนระหว่างสายตัวนำระหว่างเฟสหรืออาจจะใช้อากาศเป็นฉนวนผสมกับฉนวนแข็งซึ่งก็คือลูกถ้วยฉนวนในการคั่นสายตัวนำกับเสาส่งหรือระบบกราวด์ ปัญหาหลักที่พบในการใช้อากาศเป็นฉนวนก็คือการที่คุณสมบัติการเป็นฉนวนของอากาศจะลดลง เมื่ออากาศมีความสกปรกและมีความเปียกชื้น ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายเกี่ยวกับพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดการเสีสภาพการฉนวนของฉนวนประเภทก๊าซหรืออากาศดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้อากาศเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ลักษณะการใช้งาน	หน้าที่
1.ฉนวนระหว่างเฟสของระบบไฟฟ้ากำลัง	เป็นฉนวนระหว่างตัวนำต่างเฟสกัน เช่น เฟส A กับเฟส B ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังกระแสสลับ เป็นฉนวนระหว่างตัวนำที่มีขั้วตรงกันข้าม เช่น ขั้วบวกกับขั้วลบของระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
2.ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์หรือเสาส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง	เป็นฉนวนระหว่างตัวนำที่มีแรงดันกับเสาส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งต่อลงกราวด์หรือระบบกราวด์อื่นๆ
3.ฉนวนระหว่างช่องว่างทรงกลม	เป็นฉนวนระหว่างช่องว่างทรงกลม(Sphere-sphere gap) ใช้สำหรับการวัดแรงดันสูง กระแสสลับและแรงดันสูงอิมพัลส์
4.ฉนวนระหว่างช่องว่างของแท่งตัวนำ	เป็นฉนวนระหว่างช่องว่างของแท่งตัวนำ(Rod-rod gap)ใช้สำหรับกรวัดแรงดันสูงกระแสตรง และใช้ในการสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ตสำหรับการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (BIL) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเช่น หม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.ฉนวนระหว่างช่องว่างป้องกันของแท่งตัวนำ	ใช้ในการส่งผ่านแรงดันเกิน (High voltage surges) ไปยังระบบกราวด์โดยการสปาร์ค ใช้ในระบบป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลง หรือระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
--	--



ภาพที่ 2.1 แสดงการใช้อากาศเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูง

- (ก) ฉนวนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- (ข) ฉนวนระหว่างช่องว่างทรงกลม
- (ค) ฉนวนระหว่างช่องว่างของแท่งตัวนำ

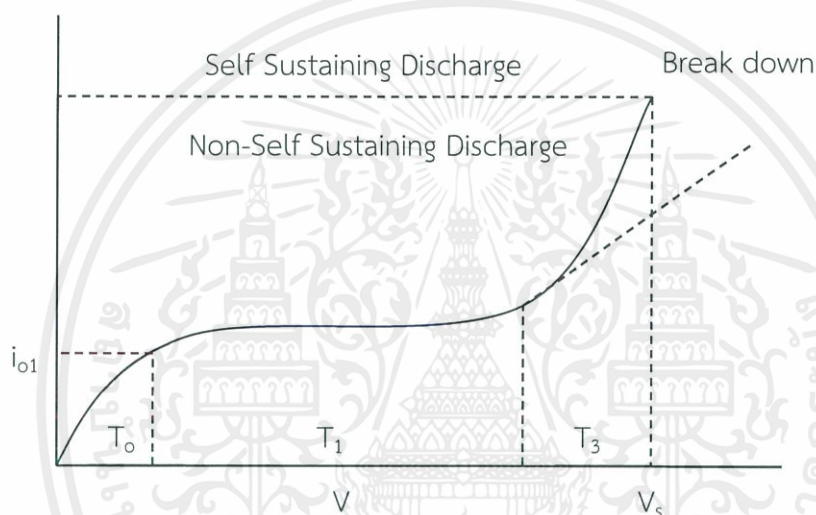


ภาพที่ 2.2 การใช้อากาศเป็นฉนวนสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาพการฉนวนของก๊าซไปสู่สภาพนำไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในแก๊สระหว่างอิเล็กโตรดมากพอ จนทำให้แก๊สมีสภาพนำไฟฟ้าสูงพอ ปัจจุบันทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับในการอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซมีอยู่ 2 ทฤษฎีคือ ทฤษฎีของทาวน์เซนต์และทฤษฎีสตรีมเมอร์ การเบรกดาวน์ของแก๊สที่ก๊าซมีความดันต่ำและแคบนั้น ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ของ Townsend ที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน จากภาพที่ 2.3 เป็นการเบรกดาวน์ของก๊าซ ซึ่งเกิดขึ้น 3 ระยะคือ



ภาพที่ 2.3 การเบรกดาวน์ของก๊าซ

ระยะเริ่มต้น, ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย

- ที่ระยะเริ่มต้น (T_0) จะเห็นว่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพราะทำให้เกิดกระแสรั่วไหล
- ที่ระยะปานกลาง (T_1) กระแสที่ไหลค่อนข้างคงที่ เพราะทำให้เกิดขบวนการ Ionization กับขบวนการรวมตัวของ electron (T_2) สมดุลกัน
- ที่ระยะสุดท้าย กระแสจะไหลอย่างรวดเร็วและมากมาย และในที่สุดก็จะเกิดการเบรกดาวน์ อย่างสมบูรณ์ (Completely Breakdown)

เพื่อให้เข้าใจขบวนการ Breakdown ของ Townsend ระยะ T_1 และ T_2 (1st และ 2nd) Coefficient townsend mechanism เราจะอธิบายโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\gamma(e^{\alpha x} - 1) = 1 \quad (2.1)$$

หรือเขียนใหม่เป็น

$$\gamma e^{\alpha x} = 1 + \text{เทอม } e^{\alpha x} \gg 1 \quad (2.2)$$

จากความสัมพันธ์ของ α, γ และ E/P สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\alpha / p = \frac{f(E)}{p} \quad (2.3)$$

$$\gamma = \frac{g(E)}{p} \quad (2.4)$$

และ gradient E มีค่า

$$E = v / d \quad (2.5)$$

สมการที่ 2.5 นี้ ใช้ในกรณีที่สนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอมีศักย์ตาไฟฟ้า V มีระยะช่องว่าง d ทำการแทนค่า E จากสมการที่ (2.5) และ จาก สมการที่ (2.2) และ ลงในสมการที่ (2.3) และ (2.4)

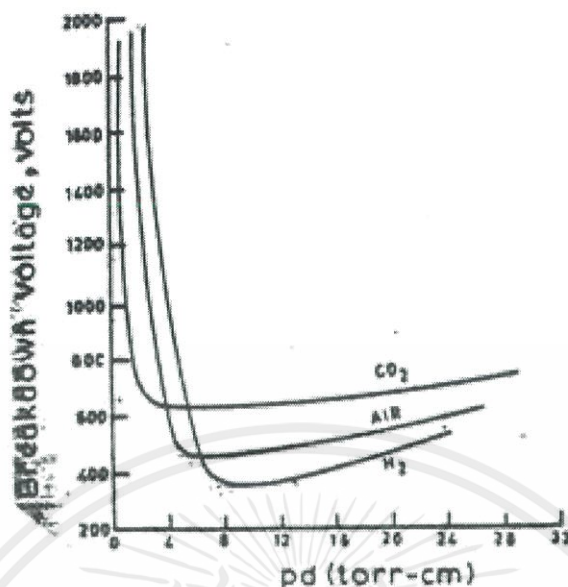
$$g \left[\frac{V}{pd} \right] e^{(f(V/p.d), pd)} = 1 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) เขียนใหม่

$$V_s = f(pd) \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) แสดงถึง ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนเป็น Function ของความดัน p และ ระยะช่องว่าง d สมการนี้เราเรียกว่า Paschen's law

จากกฎของ Paschen's law การหาศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนสำหรับช่วงที่มีสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอในก๊าซที่มีผลคูณของความดันและระยะห่าง (Pd) สำหรับอากาศ (air) , Cabondioxide (CO_2) และ Hydrogen (H_2) แสดงไว้ในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า Breakdown Vs กับผลคูณของความดันและระยะห่าง (Pd) ของการ CO_2 , air , H_2

จากภาพที่ 2.4 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้า Breakdown จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม Pd จนกระทั่งได้ศักย์ตาไฟฟ้า Breakdown ต่ำสุด Vs min และศักย์ไฟฟ้ากลับเพิ่มขึ้นอีกเมื่อทำการเพิ่ม Pd ให้มากขึ้นไปอีก

ตารางที่ 2.2 ศักย์ไฟฟ้า Breakdown ต่ำสุดของก๊าซชนิดต่างๆ

Gas	V_B (min) Volts	Pd at V_B (min) (Toir-cm)
Air	327	0.567
Argon	137	0.9
H_2	273	1.15
Helium	156	4.0
CO_2	420	0.51
N_3	251	0.67
N_2O	418	0.5
O_2	450	0.7
SO_2	457	0.33
H_2S	414	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎของ Paschen นี้ใช้ได้ดีสำหรับอุณหภูมิสูงจนถึง 1100 °C แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่านี้แล้ว การ Breakdown จะไม่เป็นไปตามกฎของ Paschen เนื่องจากการ Breakdown จะเกิด Ionization จากความร้อนที่มีอุณหภูมิมากกว่า 2000°k หรืออาจเกิดจากผลของ Thermonic emission

Paschen ได้ทดลองช่องว่างที่กว้างกว่า 0.01 cm ที่ (n,t,p) (normal temperature pressure) มีค่า Pd ไปทางขวามือของจุดต่ำสุดของ Paschen และศักย์ไฟฟ้า Breakdown จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ Pd ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V = 24.22 \left[\frac{293(pd)}{760T} \right] + 6.08 \sqrt{\frac{293(pd)}{760T}} \text{KV} \quad (2.8)$$

หรือ

$$E = V/d = 24.22 \left[\frac{293}{760} \left[\frac{P}{T} \right] \right] + 6.08 \left[\frac{293}{760} \left[\frac{P}{T} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{d}} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ $P =$ เป็นความดันของอากาศ หน่วยเป็น mmHg
 $T =$ อุณหภูมิ หน่วย °K
 $d =$ ระยะ gap หน่วยเป็น cm

จากสมการที่ 2.9 ถ้าที่ความดัน 1 บรรยากาศ คือ 760 mmHg อุณหภูมิ 293°K

$$E = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}} \text{Kv/cm} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 ถ้า gap (d) มีค่ามากๆ สนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 24.22 Kv/cm สำหรับอากาศทั่วไป ที่ระยะ gap 1 cm ความดัน 760 mmHg ที่อุณหภูมิ 20 °C จะมีศักย์ไฟฟ้า

Breakdown 30 Kv/cm ซึ่งหมายความว่าเทอม $\frac{293}{760} \left[\frac{P}{T} \right] d = 1$

1. ทฤษฎีของทาว์นเซนต์ (Townsend's theory)

ทฤษฎีนี้อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซที่เกิดจากการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากการชนไอออนไนเซชัน (Collision Ionization) ซึ่งประกอบด้วยขบวนการขั้นต้น (Primary or α - process) หมายถึงการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาแอโนดพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าว(กำหนดให้เป็น e_1)เคลื่อนที่เข้าชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซซึ่งประกอบด้วยกลุ่มอิเล็กตรอน(กำหนดให้เป็น e_2)โคจรอยู่รอบๆนิวเคลียสหลังจากที่ e_1 ชนอะตอม ถ้าพลังงานที่ e_2 ได้รับจากการชนมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่าง e_2 กับนิวเคลียสของอะตอมหรือโมเลกุลของมัน e_2 จะหลุดออกมาเป็นอิสระจากอะตอมเดิมของมันซึ่งทำให้ขณะนี้มียอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รวมเป็น 2 ตัว คือ e_1 และ e_2 เรียกว่าการเกิดไอออนไนเซชัน โดยอะตอมเดิมที่เป็นกลางจะกลายเป็นไอออนบวก การเกิดไอออนไนเซชันโดยทั่วไปจะหมายถึงการสร้างไอออนบวกโดยเอาอิเล็กตรอนออกมาจากอะตอมที่เป็นกลางสำหรับกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทด ซึ่งโดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะยึดติดกับผิวอิเล็กโตรดด้วยแรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิต ดังนั้นการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทดหรืออิเล็กโตรดจะต้องให้พลังงานจำนวนหนึ่งไม่น้อยกว่าพลังงานเนื่องจากไฟฟ้าสถิตดังกล่าว ซึ่งอาจจะทำได้โดยการฉายแสง ฉายรังสี ให้ความร้อนหรือสนามไฟฟ้า ไปที่แคโทด หรืออาจจะใช้การชนของไอออนบวกไปที่แคโทด ส่วนกระบวนการขั้นสอง(γ - process) อันเป็นกระบวนการที่เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นโดยการชนของไอออนบวกไปที่เกิดจากกระบวนการขั้นต้นซึ่งมีทิศทางในการเคลื่อนที่วิ่งเข้าชนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทดได้ทำให้มียอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น เมื่อมียอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากกระบวนการขั้นสองก็จะทำให้เกิดกระบวนการขั้นต่อไปอีกนั้นก็หมายความว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สจะเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้นส่วนกระบวนการขั้นสองอีกกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการที่ไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นต้นวิ่งไปชนโมเลกุลของก๊าซ ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงพอก็จะทำให้เกิดไอออนไนเซชันในก๊าซ เรียกว่า กระบวนการ β (β - process)อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ไม่อาจนำมาอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้ ด้วยเหตุผลพอสรุปได้คือ

- 1) ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนไนเซชันในก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่าแต่โอกาสเช่นนั้น มีน้อยมาก
- 2) ถ้ากลไกการเกิดไอออนไนเซชันตามกระบวนการ (β) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์โลหะผิวของแคโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรกดาวน์ แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโลหะที่ทำแคโทดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่วัดได้

3) กลไกการเบรกดาวนตามกระบวนการ (β) ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแก๊พมากกว่าเวลาการเกิดเบรกดาวนที่วัดได้

กระบวนการที่สองที่เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดเบรกดาวนจึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนแคโทดหรือที่เรียกว่ากระบวนการ (γ) การเพิ่มทวีคูณของจำนวนอิเล็กตรอนโดยอาศัยกระบวนการขั้นต้นและกระบวนการขั้นสองสามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้ ดูภาพที่ 2.5 ประกอบคำอธิบาย กำหนดให้แคโทดได้รับการกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจำนวน N_0 ตัวต่อวินาที กระบวนการขั้นต้น จำนวนอิเล็กตรอนในระยะเวลาสั้นในแก๊พที่ระยะ x จากแคโทดคือ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (2.11)$$

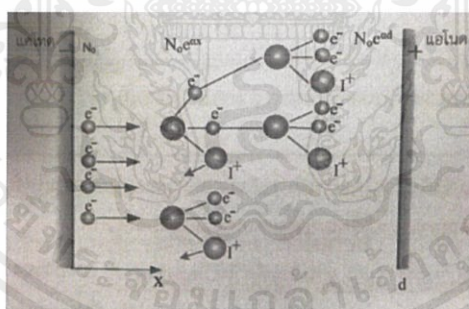
เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N_x = จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากแคโทด

ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหาแอโนด ($x = d$) ต่อวินาทีจะเป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (2.12)$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha d} - 1$ ตัวจะเห็นได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล แต่ตามลำพังกระบวนการขั้นต้นนี้จะไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนได้ เพราะถ้าต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกแล้ว กระบวนการไอออนในเซชันจะหยุดลง ดังนั้นจะต้องอาศัยกระบวนการที่สองจึงทำให้เกิดเบรกดาวน



ภาพที่ 2.5 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ α

เมื่อนำจำนวนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากกระบวนการขั้นที่สองมาพิจารณาร่วมกับจำนวนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากกระบวนการขั้นที่ 1 จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากแคโทดสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.13)

$$N_0'' = N_0 + N_0' \quad (2.13)$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาทีโดยกระบวนการขั้นต้น

N_0' = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากกระบวนการขั้นที่สองต่อวินาทีที่แคโทด

N_0'' = จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากแคโทดต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะชนโมเลกุลอิสระ หรืออะตอมตัวอื่นๆ แล้วเกิดไอออนเซชันขึ้นมีโอกาสเกิดขึ้นเท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกที่เกิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการชนจากกระบวนการขั้นต้น โดยพิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากแคโทดเป็นดังสมการที่ (2.14)

$$N_o' = N_o''(e^{\alpha d} - 1) \quad (2.14)$$

ไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการขั้นต้นนั้น เมื่อเคลื่อนที่ไปชนแคโทด เป็นผลให้แคโทดปลดปล่อยอิเล็กตรอนมา

เนื่องจากกระบวนการขั้นที่ 2 เป็นไปตามสมการที่ (2.15)

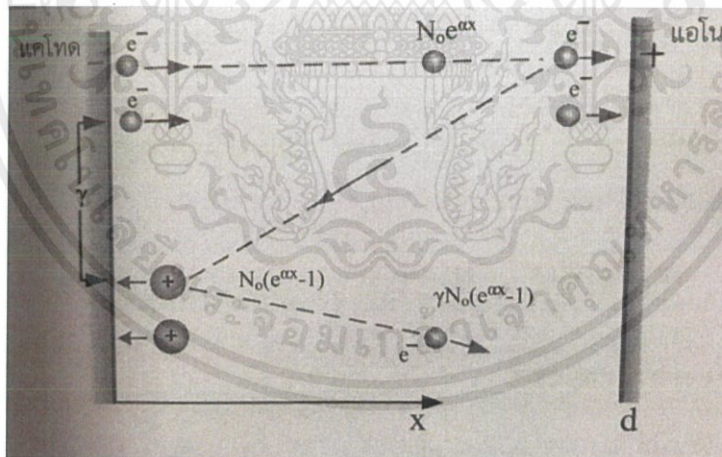
$$N_o' = \gamma N_o''(e^{\alpha d} - 1) \quad (2.15)$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออนในเซชันที่สองของทาวน์เซนต์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$N_o'' = N_o + \gamma N_o''(e^{\alpha d} - 1) \quad (2.16)$$

พิจารณาสมการที่ (2.12) พบว่าจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนดมีค่าเท่ากับ

$$N_d = N_o'' e^{\alpha d} \quad (2.17)$$



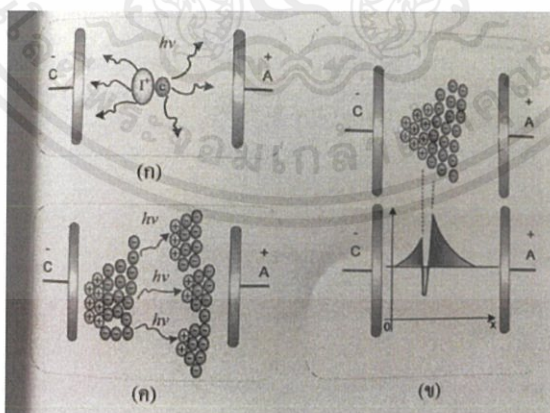
ภาพที่ 2.6 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ

2. ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory)

เนื่องจากกลไกเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี เช่น การเกิดเบรกดาวน์ในช่องแก๊ปกว้างๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped Time, T_c) น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนการของทาวน์เซนต์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนโดยการชนแตกตัวแล้วปล่อยอิเล็กตรอนจะพบว่ามากกว่าเวลาคลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลองหรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่โดยตรงจากแคโทดข้ามช่องแคบไปยังแอโนดโดยไม่ชนกับโมเลกุลเลยก็ใช้เวลานานกว่าเวลาคลื่นตัดที่ทดลองได้ อีกประการหนึ่งทฤษฎีของทาร์นเซนต์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง ที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก่อนๆ กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้นและอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออไนเซชันขึ้นได้ เช่น ในสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง

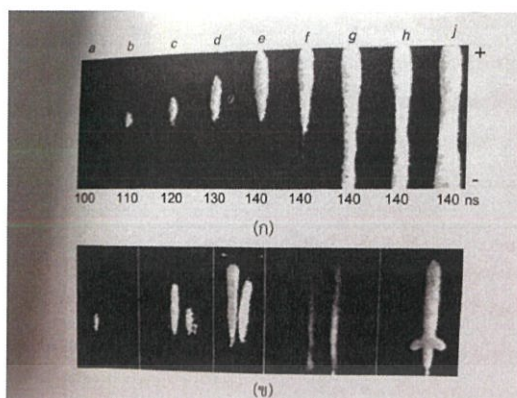
Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวกในปี 1940 และในเวลาเดียวกัน Rather ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ซึ่งทฤษฎีของทาร์นเซนต์อธิบายไม่ได้ หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวิงชนไอออไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาร์นเซนต์กล่าวคือจะมีการไอออไนเซชันเป็นจำนวนมากจากหลังโพتون ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ระหว่างไอออนบวกกับอิเล็กตรอนแล้วจะปลดปล่อยพลังงานออกมา การเกิดไอออไนเซชันแบบนี้เรียกว่า โฟโตไอออไนเซชัน (Photo-Ionization) ของก๊าซดังภาพที่ 2.7 โมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานซ์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไอออนบวกจึงรวมตัวกันอยู่เบื้องหลังเป็นหมอกประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวาลานซ์เพิ่มสูงขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้น เกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หมอกประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างแอโนดกับแคโทด ดังภาพที่ 2.8 และเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้ จึงเรียกกลไกเบรกดาวน์ลักษณะนี้ว่าสตรีมเมอร์เบรกดาวน์



ภาพที่ 2.7 การเกิดโฟโตไอออไนเซชัน

- (ก) พลังงานโพتون เป็นผลจากการรวมตัวกันใหม่
- (ข) รูปแบบความเครียดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป
- (ค) พัฒนาการของการเกิดสตรีมเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 การเกิดสตรีมเมอร์

- (ก) พัฒนาการเกิดไอออไนเซชันเนื่องจากผลของประจุค้างของก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 200 Torr แรงดันเกิน 25%
- (ข) การเกิดอะวาลานซ์ของกลุ่มอิเล็กตรอน และอะวาลานซ์สตรีมเมอร์ของช่องว่างอากาศ 3-6 ซม. ความดัน 260 Torr ความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 11,800 V/cm.

2.2.2 ฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวเป็นฉนวนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนหลักในการออกแบบระบบ ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีโดยมีค่าความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์สูงกว่าอากาศที่สภาวะความดันบรรยากาศมีความสามารถในการคืนตัวเป็นฉนวนอีกครั้งหลังการเกิดเบรกดาวน์มีค่ามิตติวิตีและความสูญเสียต่ำค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ประมาณ 2-2.5 และค่า $\tan \delta$ ไม่มากกว่า 1×10^{-4} ฉนวนเหลวสามารถไหลแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างต่างๆเพื่อระบายความร้อนได้เกือบทุกส่วนของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวยังมีข้อเสียอยู่ด้วยเช่น จำเป็นที่จะต้องมีการบำรุงรักษา บำรุงและมีโอกาสที่จะติดไฟได้รวมทั้งไม่สามารถใช้เป็นตัวรองรับอุปกรณ์เหมือนกับฉนวนแข็ง

2.2.2.1 ประเภทของฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวอาจจะได้จากก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมหรือเกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมีฉนวนเหลวแต่ละชนิดมีคุณสมบัติและคุณภาพที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งฉนวนออกเป็น 2 ประเภท คือสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ซึ่งสารอินทรีย์จะประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันแร่ (Mineral oil) น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันพืช ไขมัน เรซิน และ แอลฟัสส์ เป็นต้น โดยเฉพาะน้ำมันแร่เป็นที่นิยมนำไปใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและตัวระบายความร้อนให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า น้ำมันหม้อแปลง (Transformer oil) ฉนวนประเภทนี้นอกจากจะผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติแล้วยังสามารถผลิตได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีอีกด้วย สำหรับฉนวนเหลว

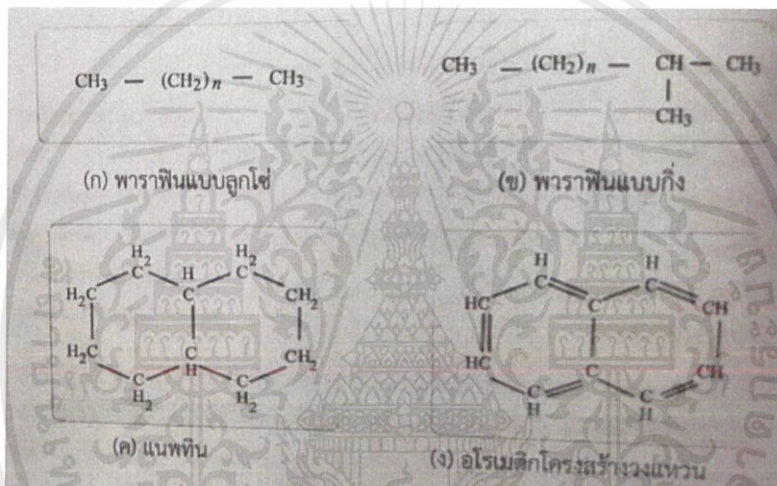
ประเภทสารอนินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตได้แก่ ไนโตรเจนเหลว อาร์กอน ออกซิเจนเหลวและ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำบริสุทธิ์ การพิจารณาคุณสมบัติของฉนวนเหลว โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ทางเคมี และทางไฟฟ้า

2.2.2.2 ชนิดของฉนวนเหลว

1. น้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่

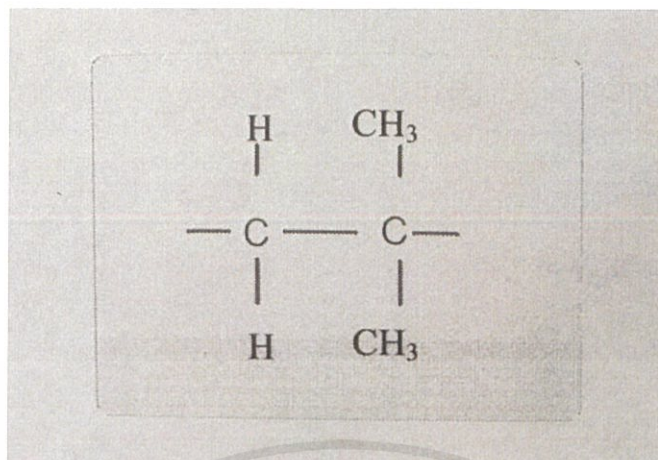
โครงสร้างหลักทางเคมีของน้ำมันปิโตรเลียมแสดงดังภาพที่ 2.9 ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นหลักรวมทั้งเชื่อมโยงด้วยซัลเฟอร์ ออกซิเจนและโลหะบางชนิด จากองค์ประกอบย่อยๆ ดังกล่าวรวมตัวประกอบขึ้นมาเป็นโครงสร้างพื้นฐาน 3 แบบด้วยกันคือ พาราฟิน แนพทีน และอโรมาติก โครงสร้างทางเคมีดังกล่าวนี้ถูกนำไปปรับปรุงเพื่อให้เป็นฉนวนที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ไฟฟ้าและเคมี ตามต้องการ



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง

2. ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์

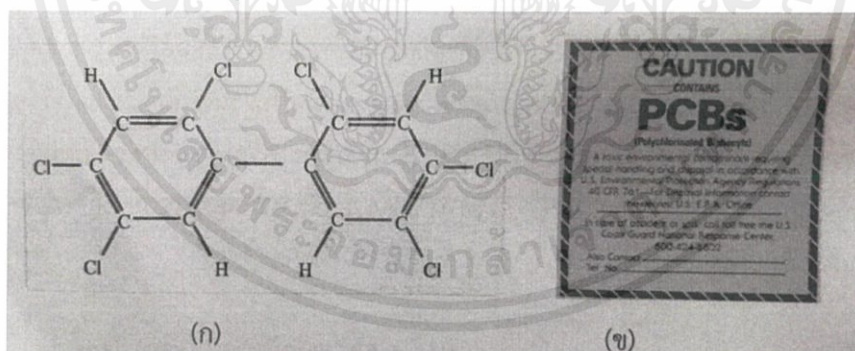
เป็นสารที่เกิดจากการสังเคราะห์น้ำมันปิโตรเลียม มีข้อดีคือสามารถควบคุมฉนวนเหลวให้มีคุณสมบัติต่างๆตามต้องการได้ เช่น ฉนวนเหลวที่จะนำไปใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง นอกจากจะต้องมีความต้านทานสูงแล้วฉนวนนั้นยังจะต้องมีคุณสมบัติ ทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ ทนความร้อนสูง และติดไฟได้ยาก ฉนวนเหลวที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์มากกว่า 55% จะเป็น polyolefin ซึ่งนิยมนำไปใช้ทำเป็นฉนวนของสายเคเบิลวัสดุประเภท โอลิฟิน(olefins) ที่ใช้งานส่วนใหญ่ได้แก่ poly butylenes และ alkyl aromatic hydrocarbons เช่นสาร alkyl-benzenes เป็นต้นโดยที่สารดังกล่าวนี้จะมีโครงสร้างซับซ้อนน้อยกว่าน้ำมันแร่ แต่จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาก โครงสร้างทางเคมีของ polyiso butylene แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของ Polyiso butyle

3. คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbon)

เป็นสารประกอบที่เกิดจาก benzene และ diphenyle ซึ่งอยู่ในกลุ่มของ aromatic Hydrocarbon เมื่อผ่านขั้นตอนคลอรีเนตเพื่อให้กลายเป็นสารประกอบคลอรีเนต อโรเมติกที่เรียกว่า askarels หรือ simple polychlorinated biphenyl (PCB) มีคุณสมบัติติดไฟได้ยากและมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีมาก โครงสร้างทางเคมีของ askarels แสดงดังภาพที่ 2.11 หลังจากใช้งานสารประกอบชนิดนี้ไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง สารประกอบชนิดนี้ได้ถูกยกเลิกและห้ามใช้งานทั่วโลก เนื่องจากการปล่อยสาร PCB นี้สู่สภาวะแวดล้อม จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.11 เอสคาเรล

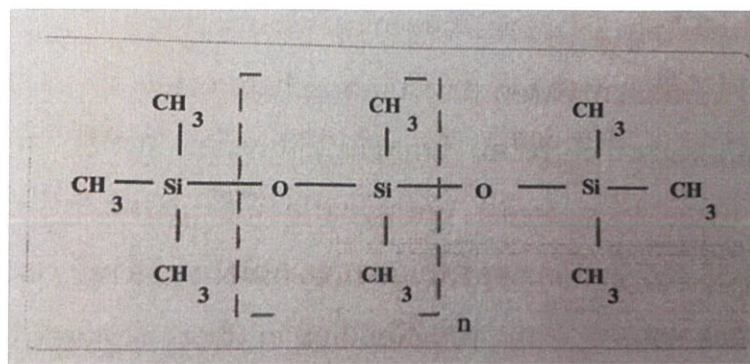
(ก) ตัวอย่างการจัดเรียงโครงสร้างของเอสคาเรล

(ข) ป้ายแสดงว่าอุปกรณ์ PCB เป็นส่วนประกอบ

4. น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)

น้ำมันซิลิโคนถูกนำมาใช้แทน PCB แต่มีราคาแพงกว่า โครงสร้างของน้ำมันซิลิโคนแสดงดังภาพที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 การจัดเรียงทางอะตอมของน้ำมันซิลิโคน

5. เอสเตอร์ (Esters)

เอสเตอร์ที่มีการใช้งานมานานได้แก่ natural ester เช่น น้ำมันแคสเตอร์ (Caster oils) ซึ่งได้นำมาใช้เป็นฉนวนของคาร์ปาซิเตอร์และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำ organic esters และ phosphate esters มาใช้งาน organic esters มีจุดติดไฟสูง มีค่าเปอร์มิทิวตี้สูงกว่าน้ำมันแร่ น้ำมันซิลิโคนแต่น้อยกว่าเอสกาเรล organic esters ได้ถูกนำไปใช้ในคาร์ปาซิเตอร์ สำหรับ phosphate esters มีค่าจุดเดือดและจุดติดไฟสูงมีค่าเปอร์มิทิวตี้สูงกว่าน้ำมันแร่ น้ำมันซิลิโคน นิยมนำไปใช้กับหม้อแปลงที่ติดตั้งในบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายสูงและหม้อแปลงที่ใช้ในสวิตช์เกียร์

6. ฉนวนเหลวชนิดอื่นๆ

2.2.2.3 กลไกการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลว

การอธิบายกลไกการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลว อาจจะแบ่งฉนวนเหลวออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวเชิงการค้า โดยทั่วไปฉนวนเหลวทางการค้านำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงไม่สามารที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์สูงได้เหมือนฉนวนเหลวบริสุทธิ์ กลไกการเกิดเบรกดาว์นจึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว ตัวอย่างเช่น ความชื้น เศษโลหะ ปริมาณก๊าซ และไฟเบอร์ เป็นต้น

1. การเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

กลไกการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการแบบเดียวกับกรณีของฉนวนก๊าซที่เกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ โดยเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอนุภาคในสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่ออกจากแคโทดเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า (Field emission) หรือเป็นผลมาจากความร้อน (Thermionic emission) มีรายงานผลการศึกษานำไฟฟ้าในฉนวนเหลว ระบุว่าเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน การเกิดเบรกดาว์นน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่เข้าสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ผิวแคโทดเพิ่มสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกมาได้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผิวแคโทดได้อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้ จะได้รับพลังงานสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางไปสู่ขั้วแอโนด ระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้ว ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่ออะวาลานซ์ การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวก็จะเกิดขึ้น

2. กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า

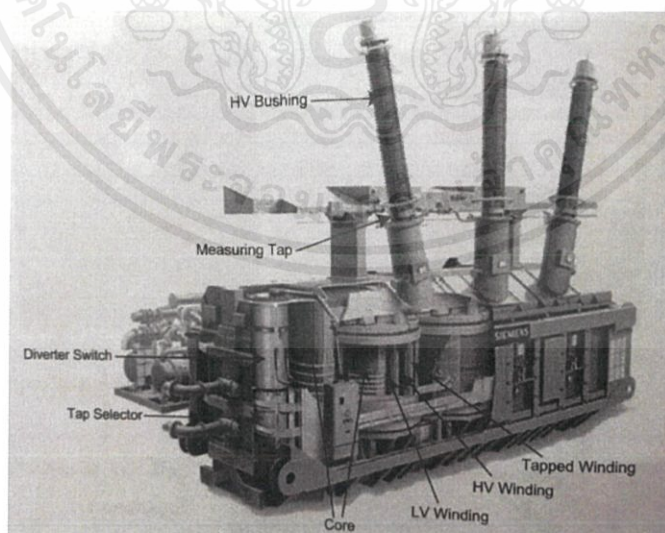
การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้าอาจเกิดได้จากสาเหตุต่อไปนี้

1. เกิดเบรกดาวน์เนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง
2. เกิดเบรกดาวน์เนื่องจากฟองก๊าซ
3. เกิดเบรกดาวน์เนื่องจากหยดของเหลวเจือปน
4. เกิดเบรกดาวน์เนื่องจากความร้อน

2.2.2.4 ตัวอย่างการใช้งานฉนวนเหลว

1. การใช้งานฉนวนเหลวเป็นฉนวนหลักในหม้อแปลง

จากภาพที่ 2.13 เป็นโครงสร้างของหม้อแปลงกำลังและหม้อแปลงระบบจำหน่าย โดยที่ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง จะใช้ฉนวนกระดาษอัดแรง (Pressboard) ประกอบกันเป็นทรงกระบอกเพื่อรองรับแรงทางกลและแรงทางไฟฟ้า และใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและช่วยในการระบายความร้อน

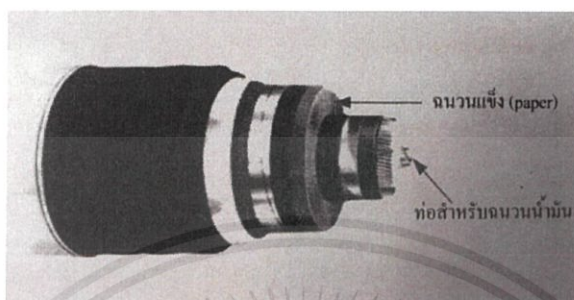


ภาพที่ 2.13 โครงสร้างหม้อแปลงกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การใช้ฉนวนเหลวร่วมกับกระดาษเป็นฉนวนของสายเคเบิล

ฉนวนน้ำมันมีใช้ในเคเบิลแสดงดังภาพที่ 2.14 ฉนวนแข็งทำด้วยกระดาษชุบน้ำมันและที่ศูนย์กลางของสายเคเบิลในชั้นตัวนำจะทำเป็นช่องของน้ำมัน เพื่อช่วยในการระบายความร้อนในสายเคเบิลอีกด้วย



ภาพที่ 2.14 เคเบิลฉนวนน้ำมัน

2.2.3 ฉนวนแข็ง

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนแข็งเมื่อทำการแบ่งประเภทโดยอาศัยโครงสร้างทางเคมีจะสามารถจำแนกเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพอลิเมอร์ดังตารางต่อไปนี้

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ คือ

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)
2. เปอร์มีตติวิตี
3. แพลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงทางเชิงกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีและความร้อน

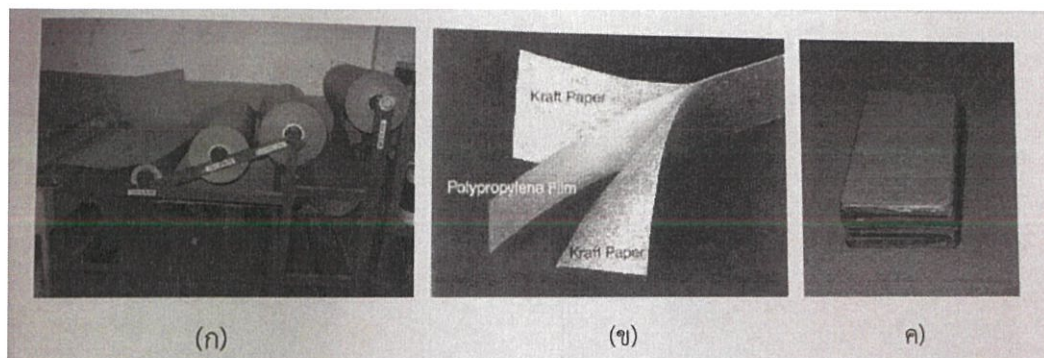
2.2.3.1 ชนิดของฉนวนแข็ง

ฉนวนแข็งที่ตินั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น และไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่มีการใช้งานด้านไฟฟ้าแรงสูงได้แก่

1. กระดาษและกระดาษอัดแรง

กระดาษที่มีการใช้งานอาจจะแบ่งออกเป็น กระดาษบาง หรือกระดาษอัดแรง โดยทั่วไปกระดาษบางจะมีความหนาน้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตร ส่วนกระดาษอัดแรงจะมีความหนามากกว่า 0.8 มิลลิเมตร กระดาษอัดแรงที่กล่าวถึงในที่นี้จะมีความหมายครอบคลุมไปถึง press boards transformer boards และ fuller boards แสดงดังภาพที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 ฉนวนกระดาษ

(ก) Paper

(ข) Polypropylene Laminated Paper

(ค) Pressboard

เนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติดูดซึมความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วชุบฉนวนเหลว เช่น น้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับค่าเปอร์มิตติวิตีของเซลล์โลสของกระดาษและของฉนวนเหลวที่ชุบ และความหนาแน่นของกระดาษซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตีรวมนี้สามารถคำนวณได้ ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนแสดงในตารางที่ , คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระดาษคราฟและ PPP ชุบน้ำมันในฉนวน

2. แก้ว

เป็นวัสดุโปร่งใส เนื้อใสสะอาด มีความเป็นมันแวววาวสุกใส แก้วเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์มีลักษณะโปร่งตาและมีความเปราะในตัวเอง ตาม ASTM กล่าวว่า แก้ว คือ วัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึก



ภาพที่ 2.16 แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแก้วจะรวมถึง ปริมาตรและสภาพต้านทานเชิงผิว ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าความคงทนไดอิเล็กตริก โดยที่ซิลิกาที่หลอมจะมีสภาพต้านทานสูงถึง 10¹⁹ โอมห์-เซนติเมตร โดยทั่วไปค่าความต้านทานทางไฟฟ้าหรือความนำไฟฟ้าของแก้วชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมี อุณหภูมิและสภาพอากาศขณะนั้น

3. เซรามิก

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากอนินทรีย์สาร จำพวกอโลหะซึ่ง ได้แก่ แร่ธาตุดิน หินต่างๆ โดยนำมาบดย่อยแล้วผสมน้ำ และนำไปขึ้นรูปตามวิธีการต่างๆ ผึ่งแห้งแล้วนำไปผ่านขบวนการ ให้ความร้อนจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ ตามที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ ในการอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 8 ชนิด คือ

1. ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา แบ่งตามลักษณะเนื้อของดินได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่ดูดซึมน้ำได้ มีทั้งชนิดที่เคลือบ และไม่เคลือบ ชนิดที่ไม่เคลือบได้แก่ พวกดินเผาทั่วไป เช่น กระจ่าง หม้อดิน ชนิดเคลือบได้แก่ พวกถ้วยชามถ้วยเตี้ย ชนิดดูดซึมน้ำนี้ เมื่อเคาะจะมีเสียงไม่ดังกังวาน สำหรับประเภทไม่ดูดซึมน้ำ เมื่อเคาะจะมีเสียงดังกังวาน มีทั้งชนิดทึบแสง และโปร่งแสง ผิวเนียน และเนื้อสีขาว เช่น ถ้วยกาแฟ จาน แจกัน อ่างล้างหน้า ฯลฯ

2. ผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ ที่ทำจากทรายโดยนำมาหลอมเหลว แล้วนำไปขึ้นรูปตามวิธีการต่างๆ เช่น กระจก ขวด โคมไฟ หลอดไฟ และภาชนะทดลองทางเคมี เป็นต้น

3. ผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ วัสดุทนไฟมีหลายชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ที่นำมาใช้ผสม และคุณสมบัติต่างกัน เช่น อิฐทนไฟธรรมดา ซิลิกา แม็กนีเซีย โครไมต์ เตาลงแร่ เตาลงต้ม เตาลงเผาเคลือบ เป็นต้น

4. ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ นับว่ามีประโยชน์ และมีความสำคัญมากในปัจจุบัน เพราะนำมาใช้งานก่อสร้างประเภทต่างๆ มากมาย เช่น อาคาร ถนน สะพาน เขื่อน ฯลฯ และปูนซีเมนต์ก็มีหลายชนิด เช่น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซีเมนต์ชนิดทนไฟ แม็กนีเซียซีเมนต์ และซีเมนต์ชนิดพิเศษ รวมทั้งปูนพลาสติก เป็นต้น

5. ผลิตภัณฑ์โลหะเคลือบ ได้มีผู้นำไปประดิษฐ์สิ่งต่างๆ เช่น การเคลือบบนโลหะทำเป็นภาชนะเครื่องใช้ เครื่องประดับ เช่น ช้อน ปิ่นโต กะละมัง ถาด เป็นต้น

6. ผลิตภัณฑ์สิ่งขัดถู ปัจจุบันสิ่งขัดถูมีชื่อเรียกต่างๆ กัน ตามวัสดุที่ใช้ผสม เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ อลูมินาไฮดรอกไซด์ ทำเป็นเครื่องมือใช้ในวงการแพทย์ เช่น หินกรอ เป็นต้น

7. ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ทำจากอนินทรีย์สาร เมื่อนำมาเผา จะทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า สะพานไฟ ปลั๊ก ขั้ว และสวิตช์ไฟ เป็นต้น

8. ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับงานเทคนิคขั้นสูง ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดนี้ ต้องอาศัยกรรมวิธีการผลิตที่ซับซ้อนมาก และใช้งานขั้นสูง เช่น เตาลงปฏิกรณ์ปรมาณู แผ่นกันความร้อนของยานอวกาศ เป็นต้น

4. ยาง (Rubber)

เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน ยางเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ยางที่มีต้นกำเนิดจากธรรมชาติจะมาจากของเหลวของพืชบางชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว คล้ายน้ำมัน มีสมบัติเป็นคอลลอยด์ อนุภาคเล็ก มีตัวกลางเป็นน้ำ ยางในสภาพของเหลวเรียกว่าน้ำยาง ยางที่เกิดจากพืชนี้เรียกว่ายางธรรมชาติ ในขณะที่เดียวกันมนุษย์สามารถสร้างยางสังเคราะห์ได้จากปิโตรเลียม

5. พอลิเมอร์

สารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีมวลโมเลกุลมากประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ ของสารที่อาจจะเหมือนกันหรือต่างกันมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ประเภทของพอลิเมอร์ แบ่งตามเกณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. แบ่งตามการเกิดเป็นเกณฑ์

- ก . พอลิเมอร์ธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โปรตีน แป้ง เซลลูโลส ไกโคเจน กรดนิวคลีอิก และยางธรรมชาติ (พอลิไอโซพรีน)
- ข . พอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์เพื่อใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น พลาสติก ไนลอน ดาครอน และลูไซต์ เป็นต้น

2. แบ่งตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ

- ก . โฮมโพลิเมอร์ (Homopolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน เช่น แป้ง (ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่เป็นกลูโคสทั้งหมด) พอลิเอทิลีน PVC (ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่เป็นเอทิลีนทั้งหมด)
- ข . เฮเทอโรพอลิเมอร์ (Heteropolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน เช่น โปรตีน (ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่เป็นกรดอะมิโนต่างชนิดกัน) พอลิเอสเทอร์ พอลิเอไมด์ เป็นต้น

3. แบ่งตามโครงสร้างของพอลิเมอร์

- ก. พอลิเมอร์แบบเส้น (Chain length polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาว โซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ จึงมีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็ง ชุ่มเหนียวกว่าโครงสร้างอื่น ๆ ตัวอย่าง PVC พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน
- ข. พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้นและโซ่ยาว กิ่งที่แตกจาก พอลิเมอร์ของโซ่หลัก ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มาก จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำยืดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
- ค. พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross-linking polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแห พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรง และเปราะหักง่าย ตัวอย่างเบกาไลต์ เมลามีนใช้ทำถ้วย

ชาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนของแข็ง

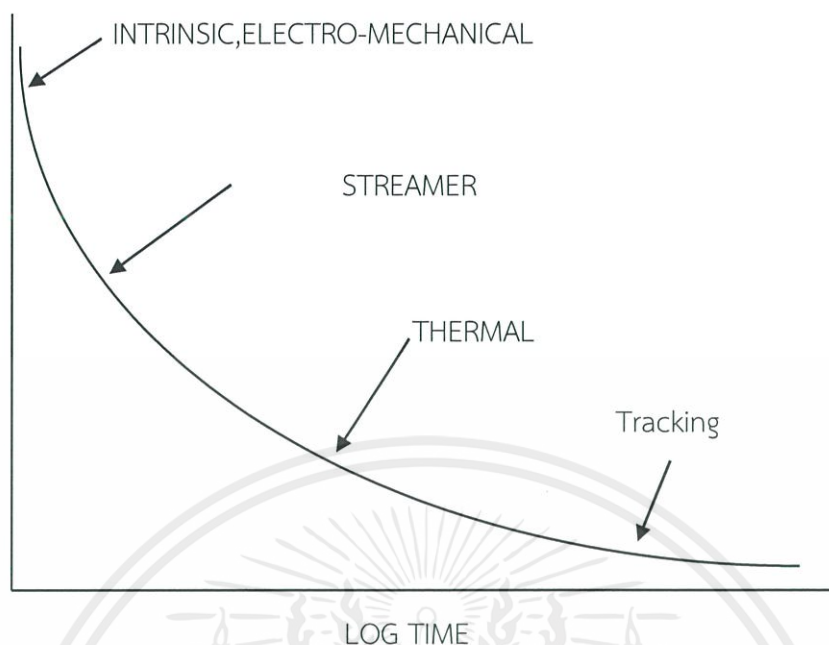
การเบรกดาวน์ในของแข็งนั้นมีลักษณะแตกต่างจากของเหลวและก๊าซคือของแข็ง เมื่อเกิดการ Breakdown จะแตกสลายทันที ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก แต่ของเหลวหรือก๊าซ เมื่อเบรกดาวน์แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเมื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ดังนั้นฉนวนแข็ง เช่น ลูกล้วน จะต้องมีความสมบัติที่ดีดังนี้

- มีค่าสูญเสียใน dielectric ต่ำ (Low dielectric loss)
- ไม่มีรูพรุนหรือความชื้น (Gaseous Cavity and moisture)
- ทนต่อแรงดึงทางกลได้สูง (High mechanical strength)
- ไม่แตกกร้าว
- ทนทานต่ออุณหภูมิ (Thermal Resistance)
- ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของระบบ
- ทนต่อสารเคมี (Chemical deterioration)

การเบรกดาวน์ของของแข็งมีขบวนการกลไกการเบรกดาวน์อยู่ 6 ลักษณะคือ

1. ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจากเนื้อสาร (Intrinsic breakdown)
2. ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจากแรงทางกล (Electromechanical Breakdown)
3. ขบวนการเบรกดาวน์แบบ Streamer (Streamer Breakdown)
4. ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจากความร้อน (Thermal breakdown)
5. ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจาก Tracking (Tracking breakdown)
6. ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจากโพรงภายใน (Cavity breakdown)

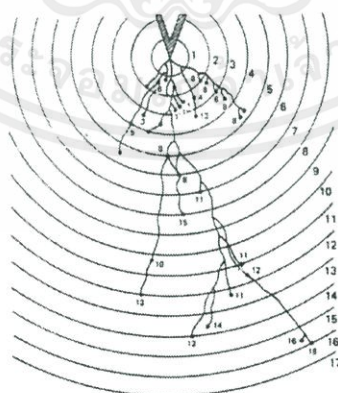
กลไกการเบรกดาวน์ลักษณะต่างๆสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ลักษณะการ Breakdown แบบต่างๆ ของฉนวนแข็ง

1. ขบวนการเบรกดาว์นเนื่องจากเนื้อสาร (Intrinsic breakdown)

การเบรกดาว์นแบบนี้เมื่อดูจากภาพที่ 2.18 จะเห็นว่าจะต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงมาก วัสดุใดที่มีเนื้อสารที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันและทนต่อแรงทางกลได้มากกว่า 100 Kg/cm มีความนำไฟฟ้าต่ำและไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ทดลอง และเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสูงๆ การเบรกดาว์นไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเราเรียกการเบรกดาว์นนี้ว่า เป็นการเบรกดาว์นแบบ Intrinsic จากการทดลองฉนวนของแข็งที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมจะมีค่า intrinsic Breakdown สูงสุดประมาณ 0.2 Mv/cm



ภาพที่ 2.18 ขบวนการเบรกดาว์นเนื่องจากเนื้อสาร

2. ขบวนการเบรกดาว์นแบบทางกล (Electromechanical Breakdown)

การเบรกดาว์นแบบนี้เกิดขึ้น เมื่อแรงกดที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตบนฉนวนแข็งมีค่ามากกว่าแรงกดทางกลแรงกดที่กระทำบนฉนวนแข็งเกิดจากแรงดึงระหว่างผิวเมื่อป้อนไฟฟ้าเข้าไป ถ้าเราไม่คิดถึงค่าความไม่เสถียรภาพที่เกิดจาก Stress และ Young's modulus ที่ขึ้นอยู่กับเวลาจะได้ค่าเบรกดาว์นในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

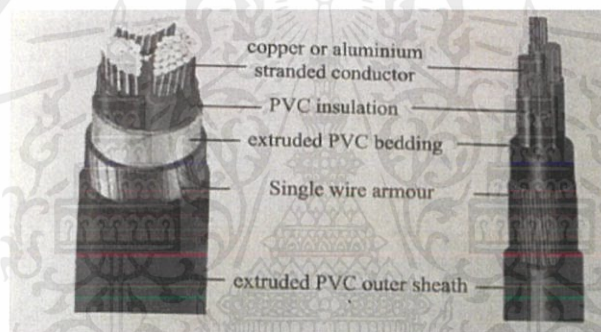
ด้วยสารที่ เกาะยึดบนผิวของฉนวน เช่น ฝุ่นเกลือ ผงถ่าน หยตน้ำ เป็นต้น ดังนั้นวิธีป้องกันการเกิด Tracking จะต้องทำให้ฉนวนสะอาด ไม่เกิดความชื้น

6. ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจากโพรงภายในฉนวนแข็ง (Cavitation Breakdown)

ฉนวนไฟฟ้าที่มีในการผลิตฉนวนแข็ง เช่น Insulator ลูกถ้วยนั้นจะต้องไม่ให้เกิดโพรงอากาศภายใน เนื่องจากอากาศภายในมีค่า Dielectric ต่ำกว่า การเบรกดาวน์จึงเกิดขึ้นได้ง่าย ขณะเกิดเบรกดาวน์จะทำให้ฉนวนแข็ง บริเวณรอบโพรงอากาศเสียดสภาพการเป็นฉนวน ทำให้เกิดฟองอากาศเพิ่มขึ้นและเกิด Punching ในที่สุด

2.2.3.4 การใช้งานฉนวนแข็ง

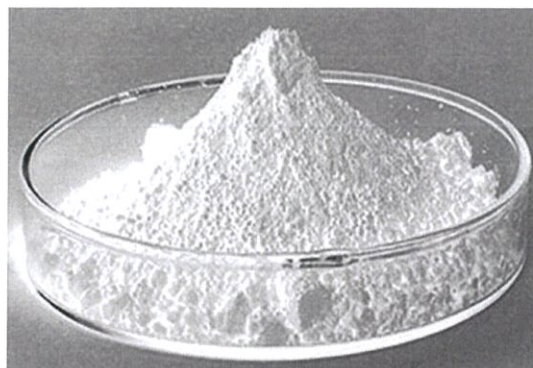
ฉนวนแข็งมีใช้ทั่วไปในระบบไฟฟ้าแรงสูง ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การใช้ PVC เป็นฉนวนของสายเคเบิล

2.3 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมี ZnO มีลักษณะเป็นผงที่ไม่ละลายในน้ำและใช้ผสมในผลิตภัณฑ์หลายชนิดเช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว น้ำมันเครื่อง สารยึดเกาะ อาหาร แบตเตอรี่ และอื่น ๆ ในธรรมชาติพบในรูปซินไซต์ แต่ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ ในสมัยโบราณเรียกฝุ่นจันทองจันทน์และญี่ปุ่นใช้เป็นแป้งขัดหน้า ใช้ผสมในยาแก้ฝีหนอง โรคผิวหนัง ปัจจุบันใช้ผสมในเครื่องสำอาง



ภาพที่ 2.21 ซิงค์ออกไซด์

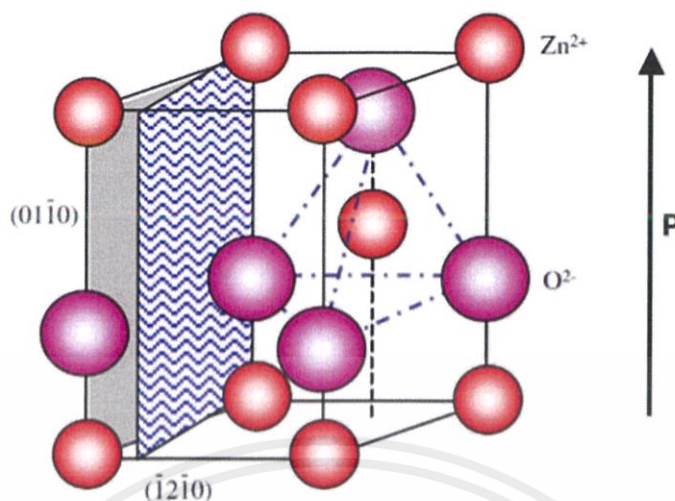
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติของซิงค์ออกไซด์

สูตรเคมี	ZnO
มวลต่อหนึ่งโมล	81.38 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งสีขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	5.606 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1975 °C, 2248 K, 3587 °F
· ความสามารถละลายได้ ในน้ำ	ไม่ละลายน้ำ
ดัชนีหักเหแสง (n_D)	2.0041

ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากมี สมบัติ ในช่วงกว้างคือ สามารถใช้วิธีเดิมสารเจือเพื่อปรับโครงสร้างระดับจุลภาค และโครงสร้าง แถบพลังงานให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ วัสดุนี้มีค่าแบนด์แก๊ป (band gap) มีความไวต่อการตรวจวัด สารเคมีต่างๆ ด้วย ซิงค์ออกไซด์สามารถสังเคราะห์ให้มีโครงสร้าง ต่างๆ ในระดับขนาดนาโนเมตรได้ ง่าย จึงไม่ใช่เรื่องยาก ที่จะพัฒนาอุปกรณ์ใหม่ๆ ที่มีสมบัติ และการนำไปใช้งาน ที่หลากหลาย ในที่นี้ จะกล่าวถึงโครงสร้างในระดับนาโน ของซิงค์ออกไซด์ที่มีการศึกษาในปัจจุบัน ตั้งแต่วิธีการ สังเคราะห์ การขึ้นรูป และการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ที่แปลกใหม่กว่าที่ผ่านมา

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำมีค่าระดับพลังงาน 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ เหมาะกับการนำมาใช้ งานออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronics) ในช่วงคลื่นสั้น มีโครงสร้างเฮกซะโกนอลที่เรียกว่า เวิร์ตไซต์ (Wurtzite) ซึ่งมีค่าคงที่แลกทิจ $a = 0.3296$ และ $c = 0.5206$ โครงสร้าง ของซิงค์ออกไซด์ประกอบด้วยระนาบของเตตระฮีดรัลที่ เชื่อมระหว่าง Zn^{2+} O^{2-} เรียงเป็นชั้นๆ ตามแนวแกน c เตตระฮีดรัลที่ประกอบด้วย Zn^{2+} O^{2-} ในผลึกซิงค์ออกไซด์ นี้เป็นโครงสร้างแบบไม่สมมาตร จึง เหมาะในการนำมาทำเป็นฉนวนไฟฟ้า



ภาพที่ 2.22 โมเดลโครงสร้างเวอร์ตไซต์ (wurtzite) ของซิงค์ออกไซด์และพิกัดเตตระฮีดรอลของ Zn^{2+} กับ O^{2-}

นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ยังมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญ คือ มีทั้งระนาบที่มีขั้ว และระนาบที่ไม่มีขั้ว ระนาบที่มีขั้วอยู่ที่ฐานของผลึกเฮกซะกอนซิงค์ออกไซด์ โดยระนาบที่เป็นขั้วบวกจะมีซิงค์ไอออนที่ปลาย ($Zn(0001)$) และระนาบที่มีขั้วลบจะเป็นระนาบที่มีออกซิเจนที่ปลาย ($O-(0001)$) ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีไดโพล และเป็น สารที่เกิดโพลาไรซ์ได้เอง (spontaneous polarization) ตามแนวแกน c และเพื่อให้เกิดสมดุลโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ยังมีระนาบที่ไม่มีขั้วและมีพลังงานต่ำกว่าระนาบที่มีขั้ว ดังเช่น $\{2110\}$ และ $\{0110\}$ นอกจากนี้ ซิงค์ ออกไซด์ มีค่า พลังงานยึดเหนี่ยวเอกซ์ ซิตอน (exciton binding energy) สูงถึง 60 มิลลิโวลต์ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้เป็นวัสดุเลเซอร์

2.3.1 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างในระดับนาโนที่ หลากหลาย ได้แก่ แผงเส้นลวดนาโนที่มีความเป็นระเบียบ (highly ordered array) โครงสร้างเหมือนกับหอคอย (tower-like structure) แท่งนาโน (nanorods) สปริง นาโน (nanosprings) หวีนาโน (nanocombs) และ วงแหวนนาโน (nanorings) โครงสร้างเหล่านี้สามารถ เลือกและควบคุมได้ด้วยการสังเคราะห์โดยในที่นี่จะกล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์ 3 วิธี ได้แก่ (1) กระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) หรือการใช้ระบบน้ำ (aqueous solution) (2) การตกเคลือบด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition) และ (3) การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition)

1. การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถใช้ สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ได้หลากหลายโครงสร้าง ทำได้ ที่อุณหภูมิต่ำ และไม่ต้องการระบบที่ยุ่งยากและซับซ้อน จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นักวิจัยหลายกลุ่มใช้วิธีนี้ใน การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ โดยในปี 1990 คณะของ Andres Verges เป็นกลุ่มแรกๆ ที่ได้ รายงานการ สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์อีกสิบปีต่อมา Vayssieres และคณะปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ บนกระจกตัวนำ และซิลิคอนเวเฟอร์อธิบายขั้นตอนการปลูกที่ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยๆ คือ การ

เอกลำต้นเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในน้ำโดยการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

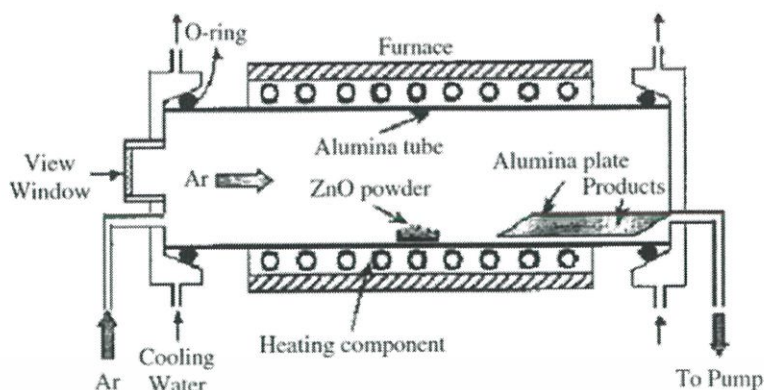
เพาะชั้นอนุภาค (ZnO seeding) และการปลูกซิงค์ออกไซด์แท่งนาโน (Growth of ZnO nanorods) โดยใช้สารละลาย ของซิงค์ออกไซด์ไนเตรด ($Zn(NO_3)_2$) และเฮกซะเมทิลซีนเตตระมีน ($(CH_2)_6N_4$) hexamethylene teramine, HMT) เป็นสารตั้งต้นการฟอร์มตัวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เกิดจาก ปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้



โดยเกลือซิงค์ไนเตรดจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายซิงค์ ไอออน (Zn^{2+}) ส่วน HMT เป็นสารที่จะค่อยๆ แตกตัว ให้ไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการฟอร์มตัวของซิงค์ไฮดรอกไซด์ก่อน และเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ในที่สุด

2. การสังเคราะห์ด้วยการตกเคลือบด้วยไอเคมี

การสังเคราะห์แท่งนาโนด้วยวิธีการตกเคลือบ ด้วยไอเคมีแบบ ไอ-ของเหลว-ของแข็ง (vapor-liquid-solid method) เป็นการควบคุมอัตราการป้อนไอของ สารที่เป็นแหล่งจ่ายซิงค์ไอออน และ ออกซิเจนให้มาตก กระทบบนคะตะลิสต์ หรือสารเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบอยู่ บนวัสดุรองรับที่อุณหภูมิสูงระดับหนึ่ง ผลึกซิงค์ออกไซด์ จะเริ่มเกิดที่ตำแหน่งของอนุภาคคะตะลิสต์นี้เองและ ค่อยๆ ขยายขนาดยึดยาวออกไปจากตำแหน่งคะตะลิสต์ ภายในระบบต้องมีการควบคุมความดันของแก๊ส ออกซิเจน ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงต่อโครงสร้างสุดท้ายของ ซิงค์ออกไซด์วิธีนี้สามารถใช้ในการขยายขนาดของ การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ได้ไม่ยากปัจจัยสำคัญคือ การควบคุมขนาด หรือความหนาของ ชั้นคะตะลิสต์ที่เคลือบบนวัสดุรองรับนั่นเอง การใช้วิธีนี้จะสังเคราะห์ แท่งซิงค์ออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ผลึกที่ได้แทบจะไม่มีตำหนิเลยการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์โครงสร้างหวีนาโน ด้วยวิธีไอเคมีแบบการระเหยด้วยความร้อน (thermal evaporation) โดยการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์บนแผ่น รองอะลูมินาที่อุณหภูมิประมาณ 1050-1250 องศาเซลเซียส ภายในเตาท่อ และใช้ผงซิงค์ออกไซด์ เป็นสารตั้งต้นจะได้ซิงค์ออกไซด์โครงสร้างหวีนาโน (ภาพที่ 6) อุณหภูมิ และเวลาจะเป็นตัวแปรที่มีความ สำคัญอย่างมากต่อขนาดและรูปร่างของโครงสร้างหวี ดังกล่าว โครงสร้างลักษณะนี้ ถ้าควบคุมขนาด และระยะห่าง ระหว่างหวีได้สม่ำเสมอจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ เป็นเกรตติงในงานด้านแสงที่ต้องการช่องขนาดจิ๋ว มากๆ ได้



ภาพที่ 2.23 แผนภาพแสดงเตาที่อยู่ในระบบสุญญากาศที่ใช้สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยการระเหยด้วยความร้อน

การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์โดยวิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมีโดยใช้สารตั้งต้นเป็นเมทัล-ออร์แกนิก (metal-organic precursor) ที่ประกอบด้วยธาตุที่ต้องการมีรายงานการปลูกซิงค์ออกไซด์แห่งนาโน ภายในเตา 2 โซน ประกอบด้วยโซนอุณหภูมิต่ำและสูงโดยใช้สารตั้งต้นเป็น ซิงค์อะซิโตนไฮเดรต (Zn acetylacetonate hydrate) วางที่ตำแหน่งอุณหภูมิ 130-140 องศาเซลเซียสจากนั้นใช้แก๊สไนโตรเจนผสมออกซิเจนเป็นตัวพาไปยังโซนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500 องศาเซลเซียสที่ความดัน 200 ทอร์พบว่าซิงค์ออกไซด์แห่งนาโนตั้งเป็นแท่งตรง

3. การสังเคราะห์ด้วยวิธีตกเคลือบด้วยไฟฟ้า

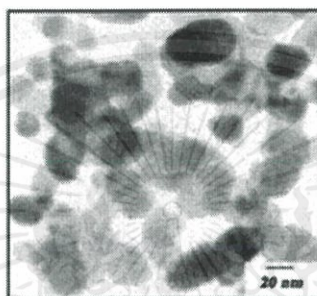
วิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าใช้สังเคราะห์แท่งรูป ทรงเหลี่ยมขนาดนาโนของซิงค์ออกไซด์บนกระจกเคลือบด้วยชั้นออกไซด์นำไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์เจือด้วย ฟลูออรีน แท่งซิงค์ออกไซด์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 100 นาโนเมตร ถึง 300 นาโนเมตร และความหนา 400 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร พบว่าตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มซึ่งมีผลต่อลักษณะของฟิล์มที่ได้ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์และอุณหภูมิถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าสูงจะได้ฟิล์มที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการเพิ่มกระบวนการอบอุ่นทำให้ได้แถบของการคายแสงเอกซ์ซิตอน (exciton emission band) ที่คมชัดยิ่งขึ้น การเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะทำให้ซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีแบนด์แก๊ปเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดของแบนด์แก๊ปจะมีผลอย่างมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มนั้นคือการที่มีขนาดเกรนหรือความเครียดภายในแลตทิซ และตำแหน่งของตำหนิในระดับชั้นพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป การสังเคราะห์ฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ที่มีรูพรุนที่จัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ (ordered porous ZnO films) เตรียมได้โดยการตกเคลือบด้วยไฟฟ้าบนกระจกที่เคลือบด้วยอินเดียมออกไซด์เจือด้วยดีบุก (Indium TinOxide, ITO) และเคลือบด้วยโพลิสไตรีนเม็ดกลมด้านบนเพื่อทำหน้าที่เป็นเทมเพลต จากนั้นก็เคลือบซิงค์ออกไซด์ลงบนเทมเพลตที่เป็นโพลิสไตรีนด้วยวิธีการตกเคลือบด้วยไฟฟ้า เมื่อละลายโพลิสไตรีนออกไป ก็จะได้ซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างพรุนตัวเช่นเดียวกับการใช้เทมเพลตที่เป็นแอนดิกอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่มีลักษณะเป็นโพรงแนวลึกลับ มีหน้าตัดของโพรงต่างๆ กัน การสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำโดยการใช้ลวดโลหะของซิงค์หย่อนลงในโพรงของแอโนดิกอะลูมินา และออกซิไดซ์ลวดที่เป็นโลหะซิงค์ซึ่งจะได้ซิงค์ออกไซด์โครงสร้างของโพรงของแอโนดิกอะลูมินานั่นเอง

4. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

สังเคราะห์โดยใช้วิธี ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้อง สารตั้งต้นที่ใช้คือ ซิงค์แอะซีเตต $[(CH_3COO)_2 Zn]$ และสารละลายแอมโมเนีย โดยหยดสารละลายแอมโมเนียลงไปผสมจะได้ตะกอนสีขาว นำมากรองล้างอบแห้งแล้วนำไปเผาแคลไซน์ จะได้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดประมาณ 20-50 nm ดังแสดงในภาพที่ 2.24

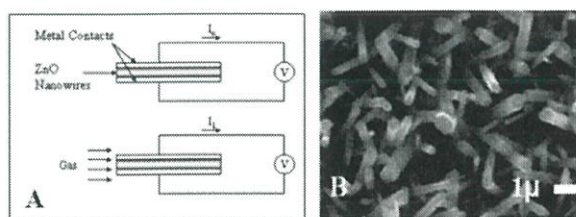


ภาพที่ 2.24 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

2.3.2 การประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์

1. เซนเซอร์ (Sensors)

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้ในด้านการศึกษาวิจัยสารเคมีต่างๆ ค่อนข้างมาก เนื่องจากมีค่าความไวต่อสิ่งรบกวนที่เป็นสารเคมีรอบๆ ตัวสูง การเพิ่มความไวต่อการตรวจวัดทำโดยเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นตัวตรวจวัดให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น ดังนั้นโครงสร้างระดับนาโนเมตรจึงมีข้อได้เปรียบในกรณีนี้ อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเซนเซอร์ขนาดจิ๋วได้ ซิงค์ออกไซด์โครงสร้างลวดนาโนเป็นวัสดุหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่ามีค่าความไวค่อนข้างสูง แม้กระทั่งที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่เซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแบบฟิล์มบางทั่วไปมักนิยมใช้ที่อุณหภูมิสูง สมบัติของซิงค์ออกไซด์ขึ้นกับตำหนิในโครงสร้างผลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตำหนิที่เป็นช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancies) ซึ่งปริมาณของช่องว่างออกซิเจนจะเป็นตัวแปรที่บอกถึงสมบัติทางไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์การตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์นั้นแก๊สที่ดูดซับบนผิวของซิงค์ออกไซด์และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโมเลกุลแก๊สรับอิเล็กตรอนจากซิงค์ออกไซด์



ภาพที่ 2.25 a) แผนผังการใช้ซิงค์ออกไซด์แท่งนาโนเป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดแก๊ส

b) โครงสร้างจุลภาคของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์ลดลงไป เมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม ในทางกลับกัน ถ้ามีโมเลกุลของไฮโดรเจนที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์มาดูดซับบนผิวซิงค์ออกไซด์จะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ในผลึกซิงค์ออกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นความยากและท้าทายในการพัฒนาซิงค์ออกไซด์เพื่อนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ คือ ความจำเพาะต่อสารเป้าหมายที่สนใจ งานวิจัยที่นำซิงค์ออกไซด์มาเป็นเซนเซอร์มีมากมาย เช่น การใช้โครงสร้างแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มาประกอบเป็นอุปกรณ์เล็กๆ โดยปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์บนวัสดุรองรับที่ทำเป็นขั้วไฟฟ้า และใช้ในการตรวจวัดแก๊ส โดยแก๊สเป้าหมายจะถูกส่งผ่านมายังเซนเซอร์ และมีการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานหรือการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าภายในวงจรเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของแก๊สนั้นเอง

2. เทคโนโลยีชีวภาพ

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นำมาใช้ในการระงับกลิ่นตัว โดยสามารถยับยั้งแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของกลิ่น นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียจากร่างกายได้อย่างรวดเร็วรวมทั้งทำปฏิกิริยากับไทออลซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นเหม็นให้กลายเป็น ซิงค์ซัลไฟด์ได้อีกด้วย นอกจากนี้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ยังมีความเสถียรและทำปฏิกิริยาได้โดยไม่ต้องใช้แสง UV ในการกระตุ้นปฏิกิริยา

3. อิเล็กทรอนิกส์

นอกจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์แล้ว อนุภาคนาโนของสังกะสีกับธาตุอื่น เช่น ผลึกนาโนซิงค์ซิลิไซด์และซิงค์ซัลไฟด์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเรืองแสงที่ใช้ในการเพิ่มความละเอียดของจอภาพแบบแบนของโทรทัศน์และจอมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์ได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงช่วยให้ภาพมีความสว่างและมีความคมชัดสูงรวมทั้งยังมีต้นทุนการผลิตต่ำอีกด้วย

4. วัสดุ

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอในการกำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า ผลิตภัณฑ์เส้นใยด้านแบคทีเรีย เส้นใยป้องกันรังสี UV ได้เช่น การตรึงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ให้คงทนอยู่บนผ้าซึ่งนำมาใช้ผลิตเป็นเสื้อกาวน์ของแพทย์เพื่อสวมใส่ขณะปฏิบัติการโดยนำผ้ามาอัดสารละลายสังกะสีออกไซด์นำไปทดสอบประสิทธิภาพความคงทนของสารละลายเมื่อผ่านการซักล้าง พบว่า เสื้อกาวน์สามารถซักล้างทำความสะอาดได้ 50 ครั้ง โดยยังมีอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ติดอยู่

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

[1] Wenhui Yang และคณะ ได้ทำการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของ ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่มีผลต่อคุณสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยจะนำอีพ็อกซีเรซินที่เป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนและมีการใช้งานเป็นวงกว้างในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาผสมกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีแบนแกปกว้างเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าและพบว่าที่สัดส่วน 5wt% มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) สูงที่สุดจึงนำสัดส่วนนี้มาทำการศึกษาต่อและพบว่าขนาดและการกระจายตัวของ ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่มีผลต่อคุณสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจริง

[2] Ilona Plesa และคณะ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนา micro/nano คอมโพสิตที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้า การผสมกันของอนุภาคทั้งไมโครและนาโนกับอีพ็อกซีเรซินโดยจะขึ้นอยู่กับการใช้งานเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง



บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางเชิงกลระหว่างวัสดุผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซินซึ่งในขั้นตอนแรกคือทำการเตรียมซิงค์ออกไซด์และวัสดุสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักที่เสียไปหลังการเผาซินเตอร์ หลังจากตรวจสอบทางกายภาพเสร็จแล้วก็นำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาผสมกับอีพ็อกซีเรซินด้วยอัตราส่วนต่างๆเพื่อเตรียมเป็นวัสดุผสมแล้วจึงนำไปตรวจสอบความหนาแน่น นอกจากนี้ยังศึกษาโครงสร้างภายนอกบริเวณพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) รวมไปถึงการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ (Dielectric constant and Dielectric loss) ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance) และการวัดค่า breakdown Voltage ของวัสดุตามลำดับ แล้วศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่างๆโดยในขั้นตอนของสมบัติการเตรียม อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และวัสดุผสมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีรายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ กระบวนการเตรียมและการตรวจสอบต่างๆดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide (ZnO) nanoparticle)
- 3.1.2 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin : Resin and Hardener)
- 3.1.3 Ethanol
- 3.1.4 น้ำ DI
- 3.1.5 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol : PVA)
- 3.1.6 Span 80

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 แก้วกระดาษสำหรับผสมสาร
- 3.2.2 แท่งแก้วคนสาร (stirring Rod)
- 3.2.3 ช้อนตักสาร (spatula)
- 3.2.4 ท่อหล่อวัสดุ (cast in pellet shape)
- 3.2.5 ครกบดสาร (agate mortar)
- 3.2.6 บีกเกอร์
- 3.2.7 ถุงซิปล็อกใส่สาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.9 แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป
- 3.2.10 กระจกทรายเบอร์ 400 600 800 และ 1000
- 3.2.11 หลอดหยด (dropper)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.00001 กรัม
- 3.3.2 ตู้อบสารอุณหภูมิ 200 °ซ
- 3.3.3 เครื่องอัดแรงดันทิศทางเดียว (uniaxial pressing)
- 3.3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)
- 3.3.5 เครื่องวัดค่าไดอิเล็กทริกและค่าความต้านทาน
- 3.3.6 เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
- 3.3.7 เตาอบสารใช้สำหรับการซินเตอร์
- 3.3.8 ถ้วยกระเบื้อง (crucible)

3.4 กระบวนการเตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide Nanoparticle) กับอีพ็อกซีเรซิน

3.4.1 การเตรียมผงนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับการเป็นวัสดุผสม

การเตรียมผงนาโนซิงค์ออกไซด์จะเตรียมโดยการแบ่งเป็นอัตราส่วนต่างๆ คือ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หากเราต้องการ ผลรวมของน้ำหนักเป็น 2 กรัม จะมีอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์อยู่ 0.1 กรัม ซึ่งหากเราต้องการผลรวมของน้ำหนักเป็น 2 กรัม ในอัตราส่วน 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะได้เป็น 0 กรัม 0.02 กรัม 0.04 กรัม 0.06 กรัม 0.08 กรัม 0.1 กรัม 0.2 กรัม 0.3 กรัม 0.4 กรัม 0.5 กรัม และ 0.6 กรัม ตามลำดับเป็นสมการคำนวณดังนี้

$$\text{น้ำหนักของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์} = \frac{2 \text{ กรัม} \times \text{เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์}}{100} \quad (3.1)$$

3.4.2 การเตรียมอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin : Resin and Hardener)

การเตรียมอีพ็อกซีเรซินจะแบ่งเป็นอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดย จะแยกเป็นการเตรียม เรซิน (Resin) กับ ฮาร์ดเทนเนอร์ (Hardener) แล้วจึงนำมาผสม คือ จะใช้หลักการคำนวณขั้นแรก ต้องทราบค่า น้ำหนักของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่จะใช้ในแต่ละอัตราส่วนเสียก่อน เป็นสมการคำนวณ ดังนี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 กรัม - น้ำหนักของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่จะใช้ในแต่ละอัตราส่วน = น้ำหนักของอีพ็อกซีเรซิน

เมื่อเราทราบค่าน้ำหนักของอีพ็อกซีเรซินในแต่ละอัตราส่วนคือ 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 และ 30 ตามลำดับแล้วหลังจากนั้นเราจึงมาทำการคำนวณแยกโดยแบ่งเป็น เรซิน (Resin) กับ ฮาร์ดเดนเนอร์ (Hardener) โดยเริ่มคิดจาก เรซิน (Resin) จะได้สมการดังนี้

$$\text{น้ำหนักของเรซิน} = \frac{\text{น้ำหนักของอีพ็อกซีเรซิน} \times 100}{123} \quad (3.2)$$



ภาพที่ 3.1 เครื่องชั่งดิจิตอล

จะได้ค่าน้ำหนักของเรซินตามอัตราส่วน 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 และ 30 คือ 1.62 กรัม 1.609 กรัม 1.59 กรัม 1.577 กรัม 1.560 กรัม 1.54 กรัม 1.46 กรัม 1.38 กรัม 1.30 กรัม 1.21 กรัม 1.13 กรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อทราบค่าน้ำหนักของเรซินตามอัตราส่วนต่างๆแล้วจึงสามารถคำนวณหาค่าน้ำหนักของฮาร์ดเดนเนอร์(Hardener) ได้จากสมการดังนี้

$$\text{น้ำหนักของอีพ็อกซีเรซิน} - \text{น้ำหนักของเรซิน} = \text{น้ำหนักของฮาร์ดเดนเนอร์} \quad (3.3)$$

จะได้ค่าน้ำหนักของฮาร์ดเดนเนอร์ตามอัตราส่วน 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 และ 30 คือ 0.38 กรัม 0.38 กรัม 1.59 กรัม 0.363 กรัม 0.36 กรัม 0.35 กรัม 0.33 กรัม 0.31 กรัม 0.30 กรัม 0.28 กรัม และ 0.26 กรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อเราเตรียม ฮาร์ดเดนเนอร์ (Hardener) และ เรซิน (Resin) ตามอัตราส่วนทั้งหมดแล้วก็นำมาผสมกัน ได้ออกมาเป็น อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin)

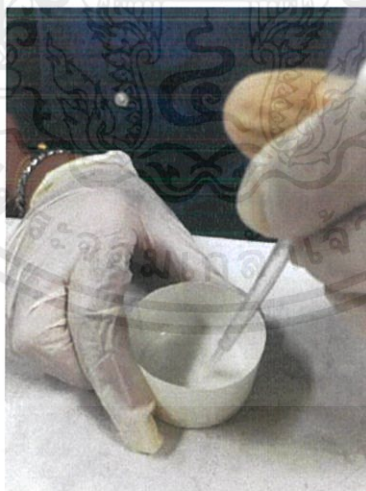
3.4.3 การเตรียมวัสดุผสม

การเตรียมวัสดุผสมนั้นจะเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดหากขึ้นรูปไม่ดีจะทำให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่จำนวนมากซึ่งอาจส่งผลต่อตัวชิ้นงานและประสิทธิภาพได้



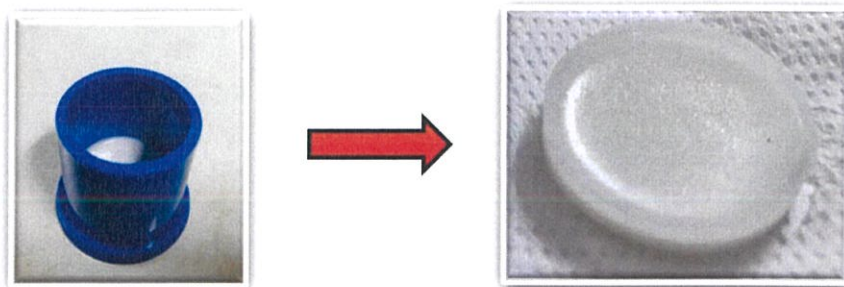
ภาพที่ 3.2 การเทวัสดุผสมลงแม่พิมพ์

ตั้งนั้นขั้นตอนแรก คือ นำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาผสมกับอีพ็อกซีเรซินที่ได้เตรียมจากข้างต้นตามอัตราส่วนต่างๆ เมื่อผสมกันเสร็จแล้วทำการคนให้เข้ากันโดยใช้เวลา 2 นาที จนสารทั้งสองผสมกันเป็นเนื้อเดียวหลังจากนั้นทำการเทในแม่พิมพ์ขึ้นรูปโดยระมัดระวังไม่ให้หกออกนอกแม่พิมพ์และหลังจากนั้นเกลี่ยให้ผิวหน้ามีความสม่ำเสมอและเรียบ



ภาพที่ 3.3 คนวัสดุอนุภาคนาโนคอมโพสิตซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซินให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นทำซ้ำตามอัตราส่วน คือ 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 และ 30 อัตราส่วนละ 2 ชิ้นงานตามลำดับหลังจากนั้นจะใช้เวลาในการฟอร์มตัวประมาณ 6 ชั่วโมงจึงทำการแกะออกจากแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 วัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซิน

3.4.4 การเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับการซินเตอร์

ในการเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้สำหรับการซินเตอร์นั้นเราสามารถเตรียมได้จากการใช้แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูปและใช้แรงทางเชิงกลจากเครื่องอัดแรงดันทิศทางเดียว (uniaxial pressing) ในการอัดให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นเม็ดโดยเตรียมทั้งหมด 5 เม็ด ขั้นตอนแรกคือการชั่งอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีน้ำหนัก 0.78 กรัม 0.68 กรัม 0.70 กรัม 0.69 กรัม และ 0.67 กรัมตามลำดับ หลังจากนั้นนำมาผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol : PVA) เพื่อให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เกาะติดกันโดยการบดให้เข้ากันในครกบดสาร นำใส่แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป และออกแรงกดโดยใช้เครื่องอัดแรงดันทิศทางเดียว (uniaxial pressing) ตามลำดับ และได้เม็ดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อัดขึ้นรูปเป็นเม็ด



ภาพที่ 3.6 เครื่องอัดแรงดันทิศทางเดียว (uniaxial pressing)

3.4.5 การเผาซินเตอร์

การเผาซินเตอร์คือกระบวนการที่ทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก อนุภาคของวัสดุติดกันและเชื่อมต่อกัน ถ้าใน conventional ceramic ก็จะทำให้เกิดเนื้อแก้ว (Glassy phase) ขึ้นภายในรูพรุนระหว่างอนุภาค ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำลดลง โดยขั้นแรกนำเม็ดนาโนซิงค์ออกไซด์ใส่ในถ้วยกระบือ (crucible) และเรียงเม็ดแยกให้ห่างกันรอบข้างโรย อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ให้ทั่วจนไม่เห็นเม็ดก่อนนำเข้าเตาอบสารใช้สำหรับการซินเตอร์ โดยเงื่อนไขที่ใช้ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ $1100^{\circ}C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง Heating และ cooling $10^{\circ}C$ ต่อนาที หลังจากนั้นรอนจนกว่าจะหายร้อนจนถึงอุณหภูมิห้องและนำออกมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป



ภาพที่ 3.7 เตาอบสารใช้สำหรับการซินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 การปรับปรุงคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน

ในการปรับปรุงคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผสมกับอีพ็อกซีเรซินนั้น จะเลือกอัตราส่วนที่นำมาปรับปรุงคือ 20 25 และ 30 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการเติม Span 80 ลงไปโดยมีน้ำหนัก 0.02 กรัมในอัตราส่วนที่กล่าวมาข้างต้น โดยอัตราส่วนที่ 20 25 และ 30 ใช้อีพ็อกซีเรซินจำนวน 1.284 กรัม 1.203 กรัม 1.121 กรัม ตามลำดับ และอัตราส่วนที่ 20 25 และ 30 ใช้ฮาร์ดเดนเนอร์จำนวน 0.296 กรัม 0.277 กรัม และ 0.259 กรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

3.4.7 การหาความหนาแน่นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน

หลังจากเตรียมชิ้นงานเรียบร้อยแล้วเราจะนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของอัตราส่วนต่างๆทั้งก่อนและหลังปรับปรุงโครงสร้างโดย สูตรดังต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}} \quad (\text{g/m}^3) \quad (3.4)$$

โดย

$$\text{มวล} = \text{น้ำหนักของชิ้นงาน (g)}$$

$$\text{ปริมาตร} = \pi r^2 \times \text{ความหนา} \quad (\text{m}^3)$$

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)

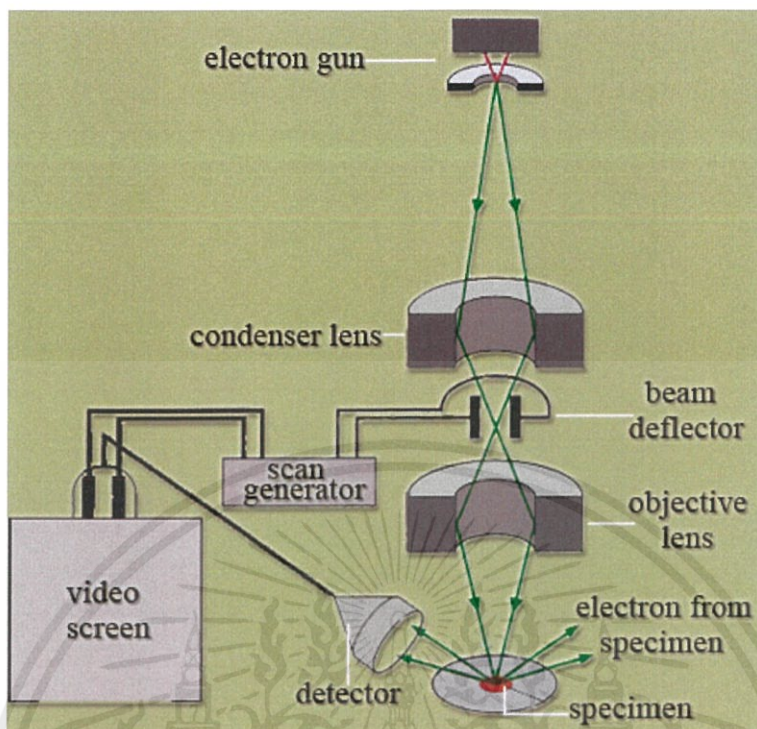
scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



ภาพที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)

3.5.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



ภาพที่ 3.9 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(scanning electron microscope : SEM)

3.5.2 การเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปถ่าย SEM

- (1) ทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เกาะบริเวณผิวของวัสดุผสมก่อนนำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM
- (2) ทำการแยกวัสดุโดยการทุบ ตัด ในแนวขวางเพื่อให้เกิดรอยแตก
- (3) ขัดบริเวณที่จะติดกับแท่นวางชิ้นงานทองเหลืองให้เรียบเสมอกันหลังจากนั้นวางชิ้นงานลงบนแท่นวางชิ้นงานทองเหลืองที่ติดเทปคาร์บอนไว้
- (4) เคลือบผิวชิ้นงานด้วยวิธี gold sputtering เพื่อทำให้เกิดการนำไฟฟ้า
- (5) นำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

3.6.1 การสร้างขั้วไฟฟ้า

ทำการเตรียมวัสดุโดยการเตรียมผิวหน้าให้เรียบร้อยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 และ 1000 จนผิวหน้าของวัสดุผสมเรียบเสมอกัน หลังจากนั้นทากาวเงิน (silver paint) แบบไม่เผาเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบครบวงจร โดยทาทั้ง 2 ด้านของวัสดุผสม แต่ ห้ามไม่ให้ติดบริเวณขอบ เพราะจะไม่เกิดความต่างของกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

3.6.2 การตรวจสอบค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant : ϵ) เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆโดยหลังจากเตรียมชิ้นงานด้วยการทากาวเงินแล้วหลังจากนั้นนำมาวัดค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก และ การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในทิศทางแนวความยาวของวัสดุผสมด้วยเครื่องตรวจสอบค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก และ การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

3.6.3 การตรวจสอบค่าความต้านทาน

ความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistance) ของฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวชี้วัดของความยากในการที่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในฉนวนนั้นซึ่งหากค่าความต้านทานของฉนวนมากจะแสดงถึงคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนที่ดีโดยหลังจากเตรียมชิ้นงานด้วยการทากาวเงินแล้วหลังจากนั้นก็นำมาตรวจสอบค่าความต้านทานด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทาน

3.6.5 การตรวจสอบ Breakdown Voltage

เป็นการบ่อนแรงดันทางไฟฟ้าแก่วัสดุผสมโดยการบ่อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าไม่แตกต่างกันจนเยอะเกินไปจนที่สุดทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย จึงทราบค่าของ Breakdown voltage ซึ่งกล่าวคือเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุผสมจะรับได้ โดยการตรวจสอบนี้จะเป็นการตรวจสอบในขั้นสุดท้าย เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียชิ้นงานโดยไม่สามารถนำมาตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆได้อีก

บทที่ 4

ผลการทดลอง

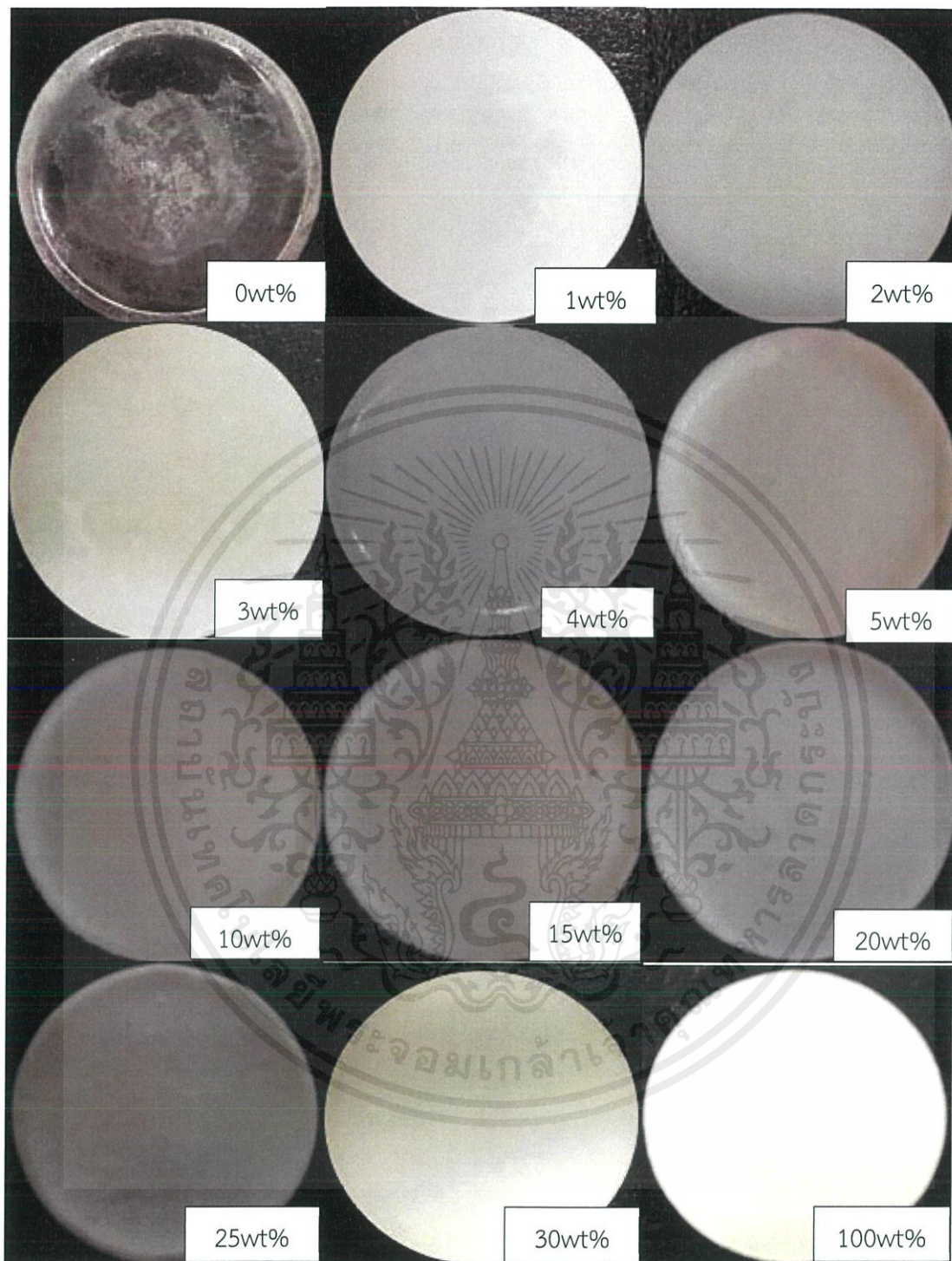
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอีพ็อกซีเรซินในสัดส่วนต่างๆ ซึ่งรายละเอียดประกอบด้วยผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ความหนาแน่น ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ สมบัติไดอิเล็กทริก ความต้านทานไฟฟ้า และ ความคงทนทางไดอิเล็กทริก ของนาโนคอมโพสิตในระบบดังกล่าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ในอีพ็อกซีเรซิน

เมื่อทำการเติมซิงค์ออกไซด์ในอีพ็อกซีเรซินในสัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็น 0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิมเกิดเป็นชิ้นงานนาโนคอมโพสิตของสัดส่วนเหล่านี้แล้วจึงนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

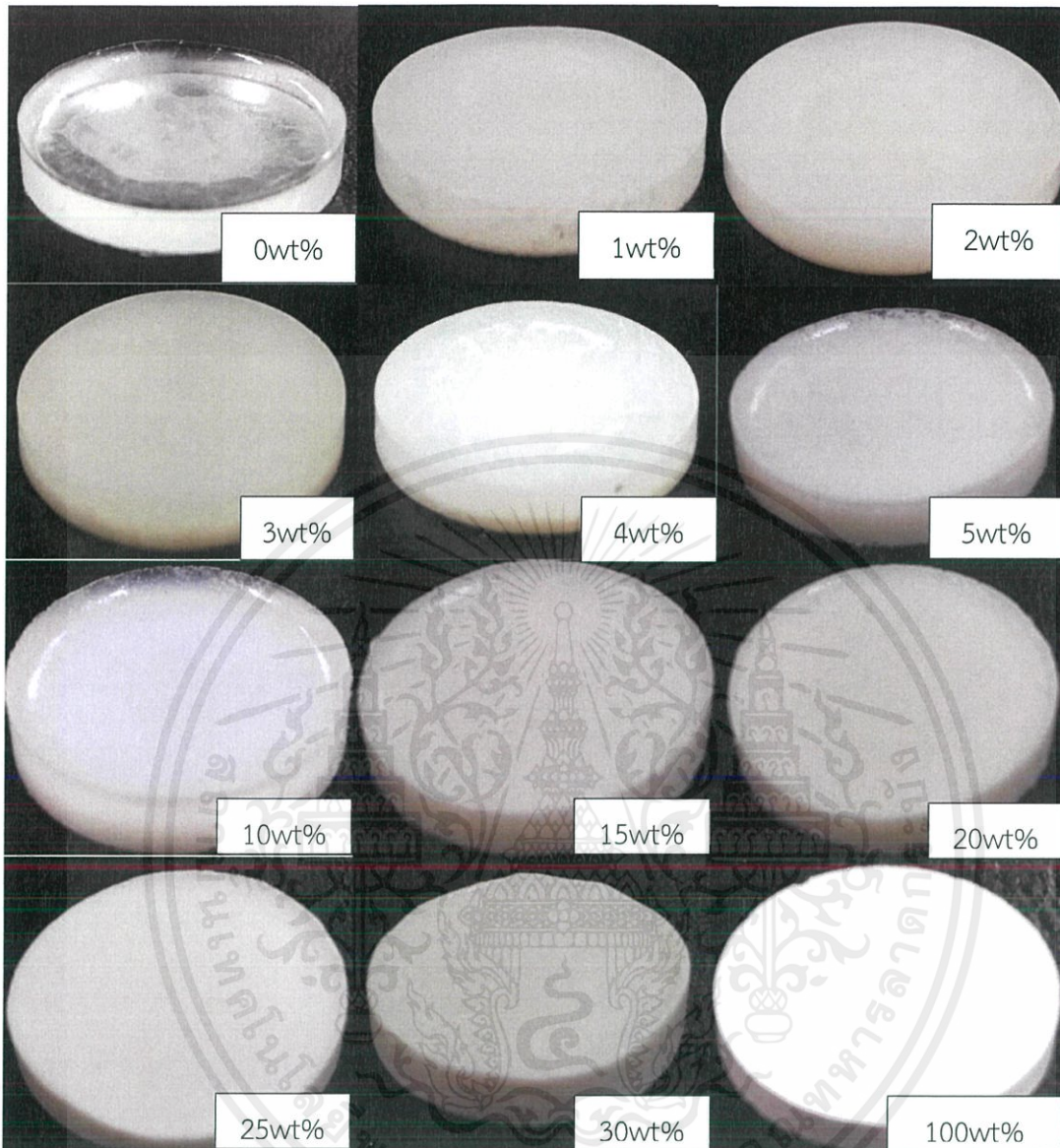
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

นำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ที่สัดส่วนต่างๆ ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ของผิวหน้าและภาพตัดขวางของชิ้นงานทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยจากภาพจะเห็นว่าที่สัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น 0 (อีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์) จะเห็นว่าสีของชิ้นงานเป็นสีขาวใสคล้ายกระจกความหนาเท่ากับ 0.002 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 2.2 เซนติเมตร และน้ำหนักโดยรวมอยู่ที่ 1.894 กรัม จากนั้นเมื่อเติม ZnO ลงไปในอีพ็อกซีเรซินในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าสีของชิ้นงานมีลักษณะขาวขุ่น และเมื่อเติม ZnO มากขึ้นเรื่อยๆ สีก็มีความขุ่นมากขึ้น ส่วนชิ้นงานที่เป็น ZnO 100 เปอร์เซ็นต์นั้นจะเห็นว่า มีสีขาวผิวเรียบเนียนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.1 เซนติเมตรและมีความหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และน้ำหนักโดยรวมอยู่ที่ 0.586 กรัม สำหรับภาพตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.2 ซึ่งก็จะเห็นว่า เมื่อเติม ZnO เพิ่มขึ้นจะสามารถสังเกตเห็นว่ามีตะกอนขาวขุ่นเกิดขึ้นและเมื่อ ZnO มีปริมาณเพิ่มขึ้นตะกอนก็จะเกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

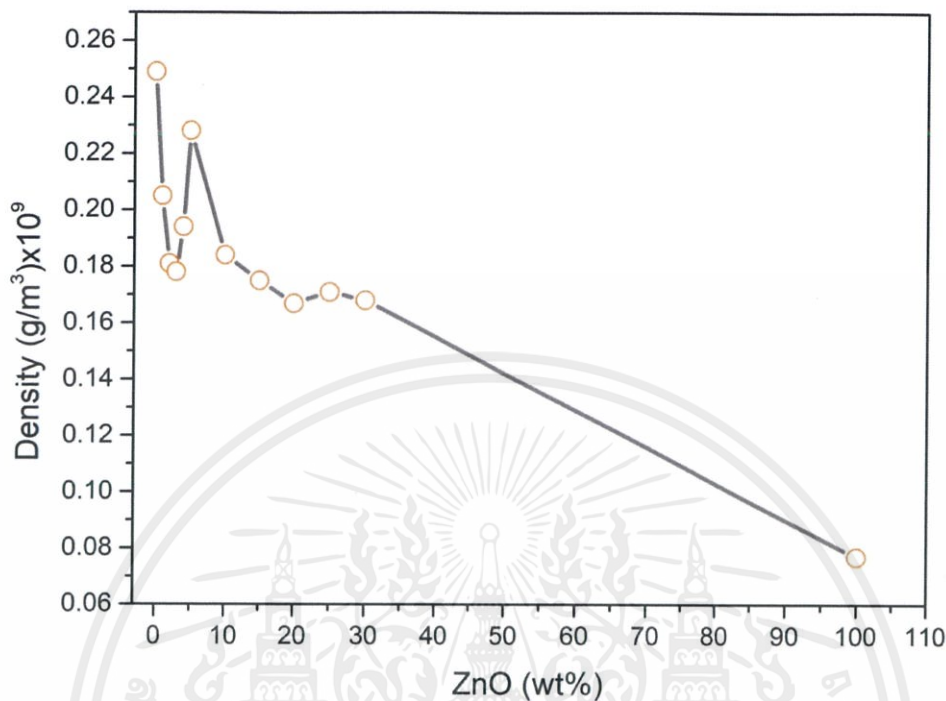


ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ

4.1.2 ความหนาแน่น

นำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ที่สัดส่วนต่างๆ มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นตามสมการที่ 3.4 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.3 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่า ที่สัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น 0 (อีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์) ชิ้นงานมีความหนาแน่นเท่ากับ $0.249 \times 10^9 \text{ g/m}^3$ และเมื่อเติม ZnO ลงไปก็พบว่าความหนาแน่นมีค่าลดลงตามปริมาณ ZnO ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเท่ากับ $0.077 \times 10^9 \text{ g/m}^3$ ที่เม็ด ZnO บริสุทธิ์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ปริมาณ ZnO เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นมีค่าสูงขึ้นอยู่ที่ $0.228 \times 10^9 \text{ g/m}^3$ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นเพราะชิ้นงานมีการกระจายตัวของอนุภาค ZnO ที่ดีจึงทำให้รูพรุนภายในน้อยส่งผลต่อค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นนั่นเอง แต่เมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นไปอีกเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นกลับลดลงซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากอนุภาค ZnO เกาะรวมกลุ่มกันเป็นก้อนทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงาน

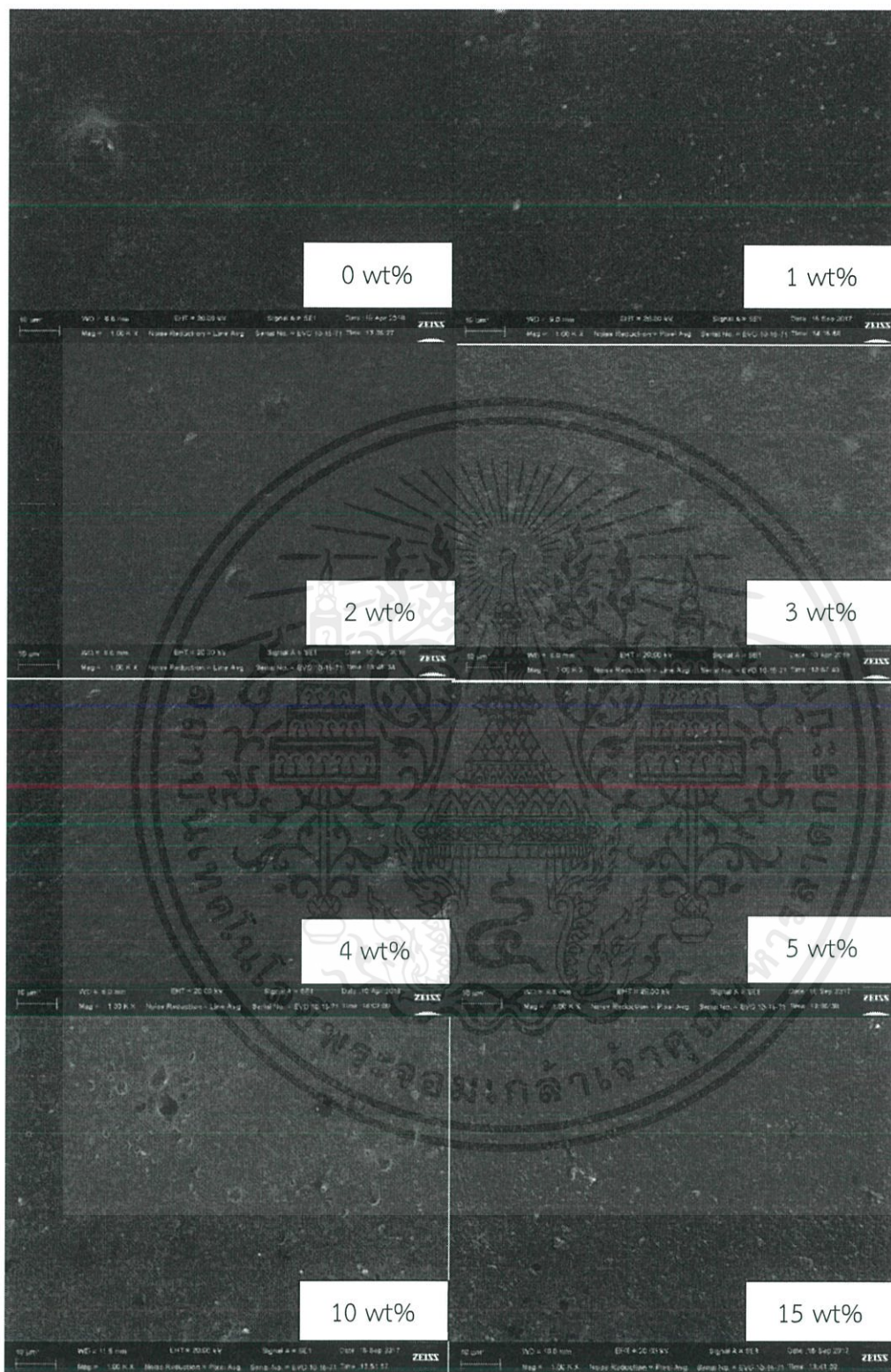
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณ ZnO

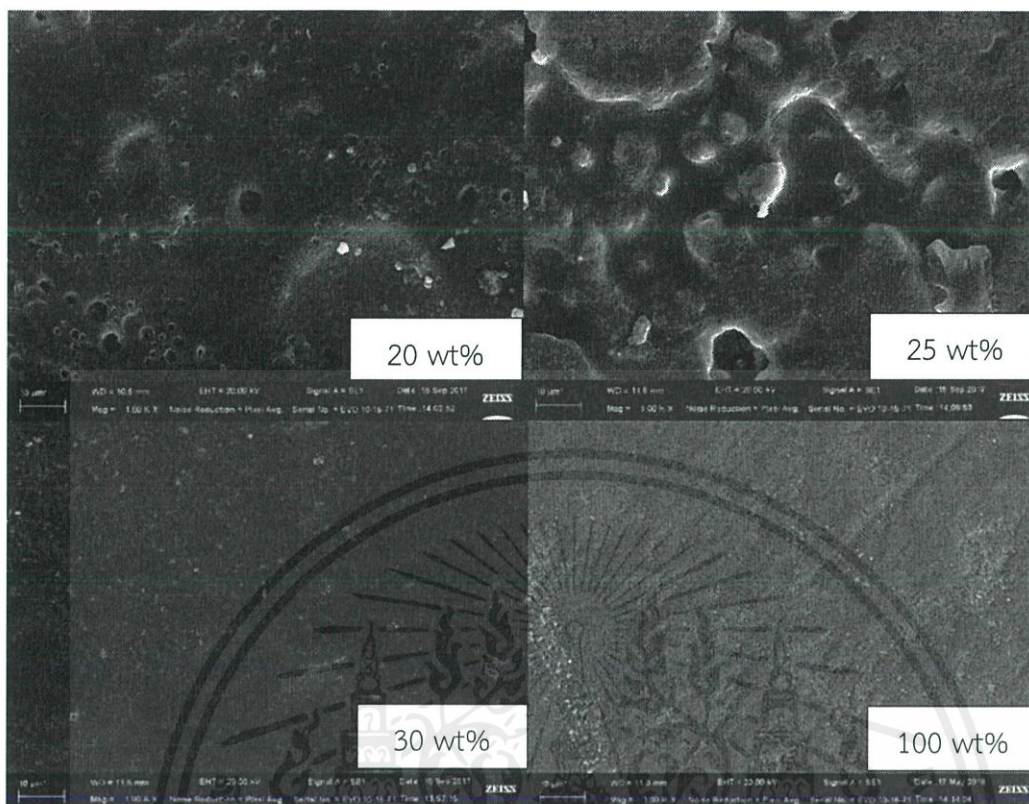
4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ที่สัดส่วนต่างๆ ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผิวหน้าและภาพตัดขวางของชิ้นงานทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ โดยจากภาพจะเห็นว่าที่สัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น 0 (อีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์) จะเห็นว่าไม่พบรูพรุนผิวเรียบ แต่เมื่อปริมาณของซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นพบว่าบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานมีความขรุขระและมีรูพรุนอยู่จำนวนมากและในสัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น 100 (ซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์) จะเห็นว่าไม่พบรูพรุนผิวเรียบเนียน ซึ่งสาเหตุที่เกิดรูพรุนในชิ้นงานขึ้นก็เนื่องมาจากการเข้ากันได้ไม่ดีของผงนาโน ZnO กับอีพ็อกซีเรซิน อีกทั้งยังเป็นผลมาจากการไล่ฟองอากาศออกไปได้ไม่หมดในระหว่างขั้นตอนการหล่อแบบชิ้นงานและเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของชิ้นงานทั้งหมด (ภาพที่ 4.5) พบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีลักษณะการกระจายตัวที่ดีขึ้นเมื่อสัดส่วนปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นแต่ก็ยังคงมีการเกาะกระจุกกันเป็นก้อนขนาดใหญ่อยู่ทั่ว



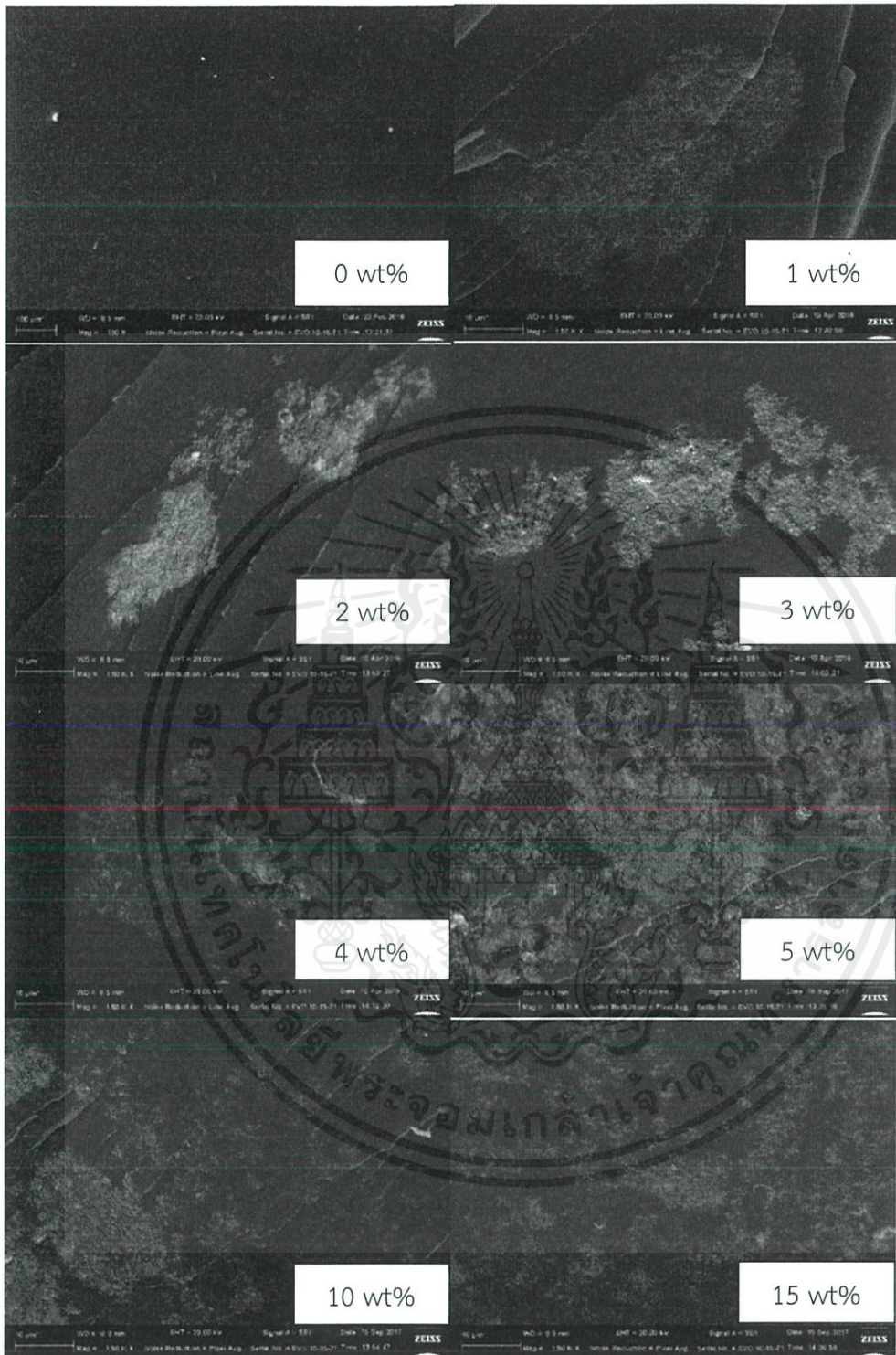
ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆของ ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



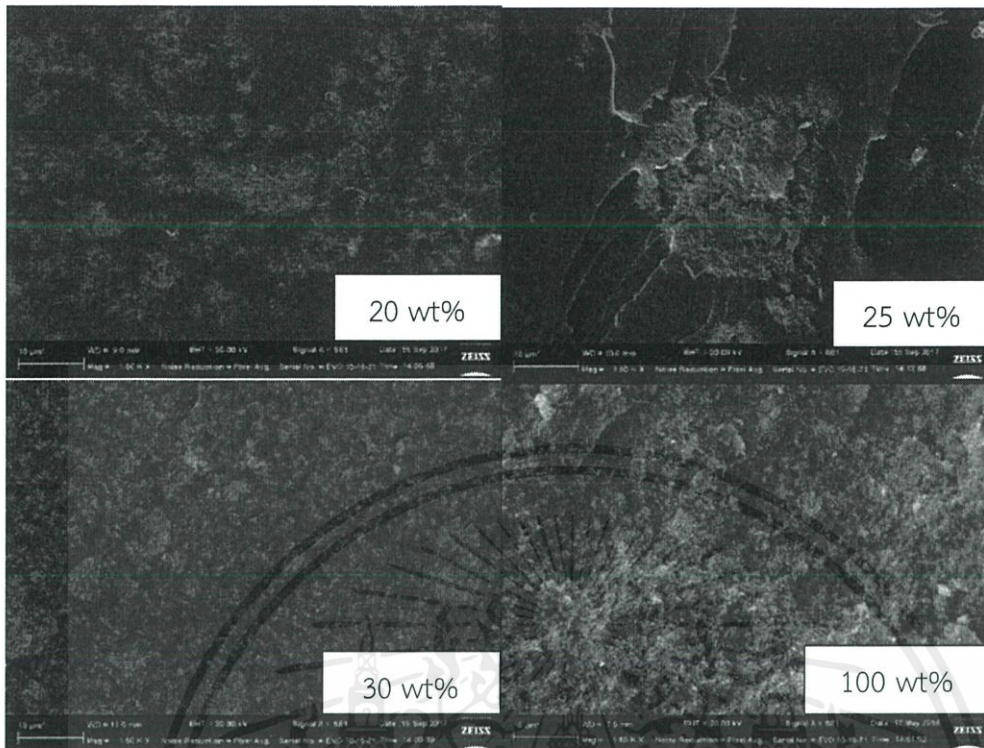
ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆของ ZnO (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆของ ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



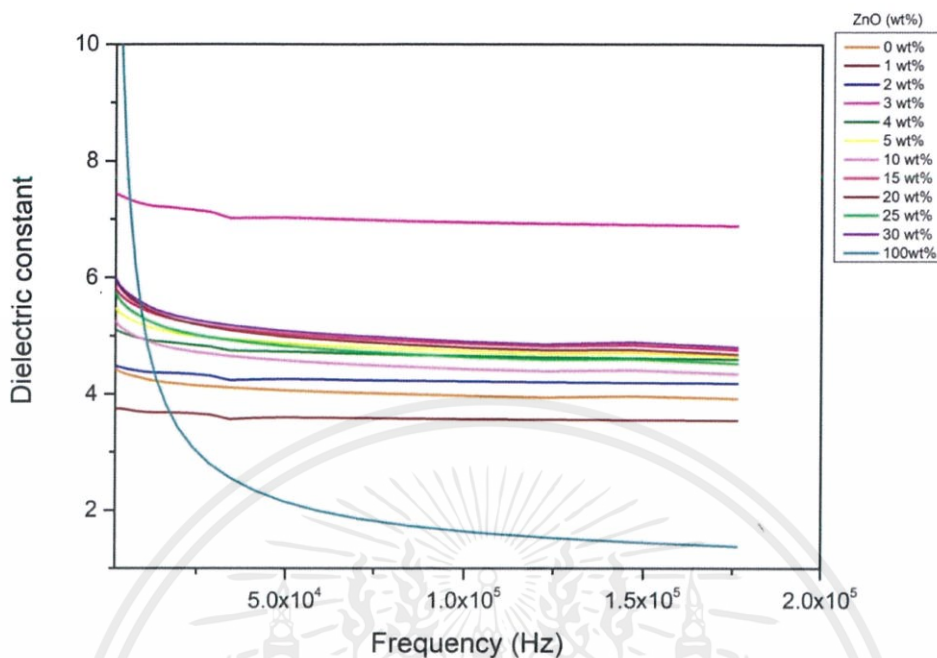
ภาพที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆของ ZnO (ต่อ)

4.1.4 สมบัติทางไฟฟ้า

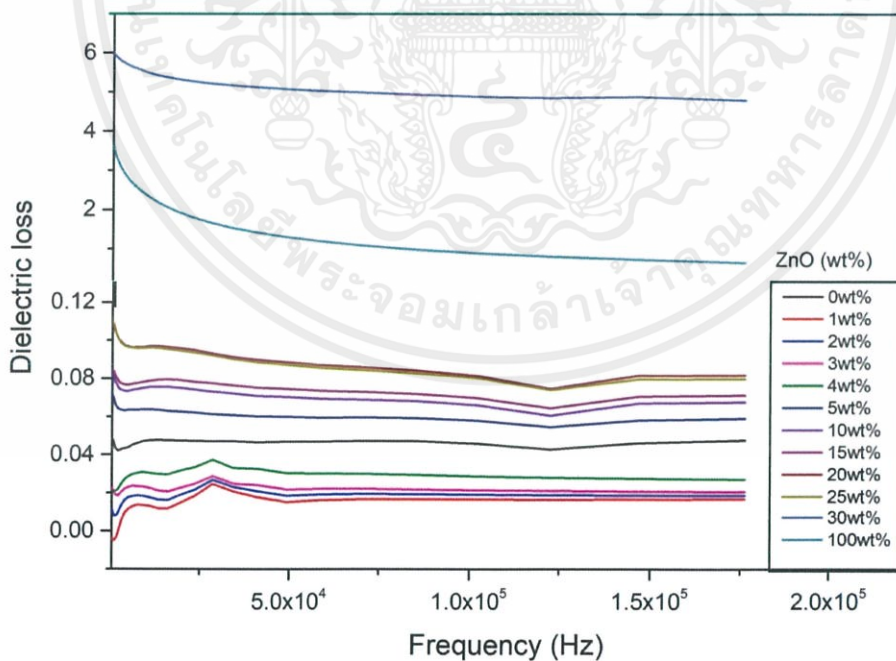
4.1.4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss)

จากการนำชิ้นงานไปวัดสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า ได้ผลดังภาพที่ 4.6 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำค่าสูงขึ้นเล็กน้อยแต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นนั้นหมายความว่าความถี่ไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งในสัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดและในขณะที่สัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำสุดสำหรับค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกพบว่าที่สัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่ามากที่สุดเช่นกัน

จากนั้นทำการเลือกค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1000 Hz มาพล็อตเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมของ ZnO พบว่าผลที่ได้แสดงในภาพที่ 4.8 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าเมื่อเติม ZnO ลงในอีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์ (0wt% ZnO) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณ ZnO ที่สูงขึ้น

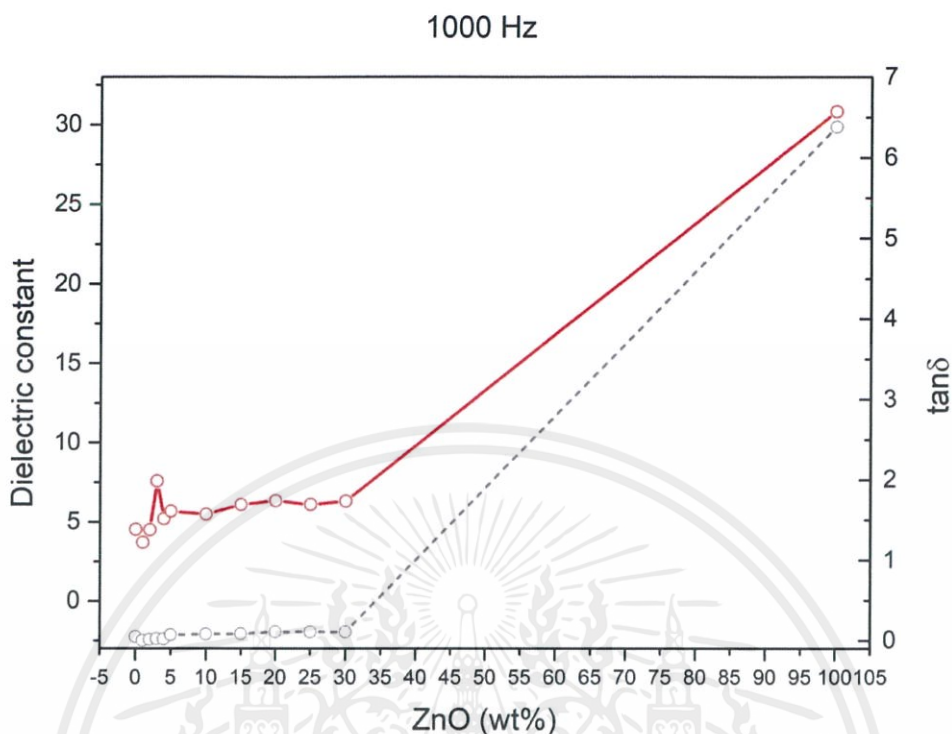


ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกกับความถี่ของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ

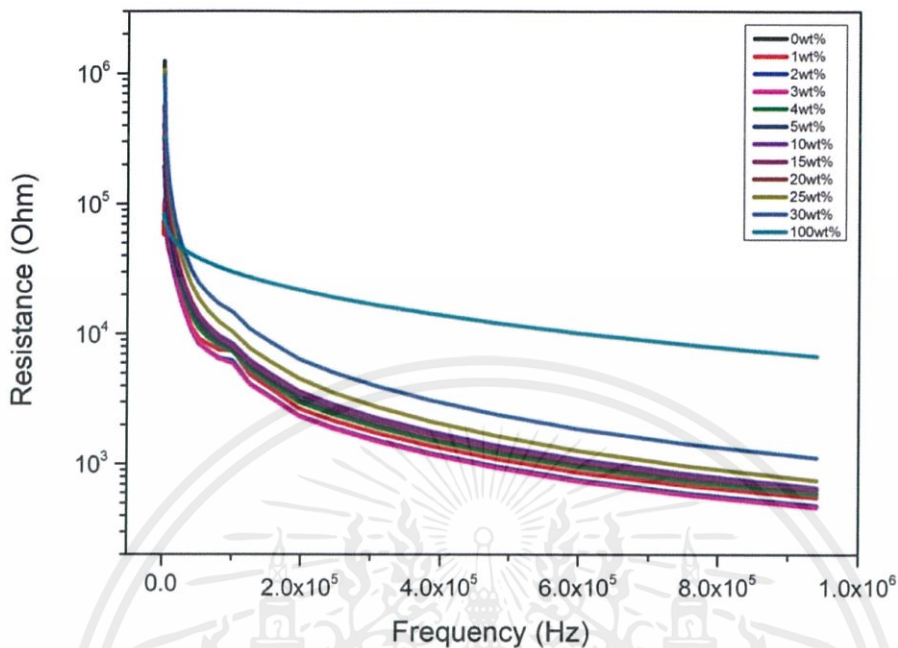
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



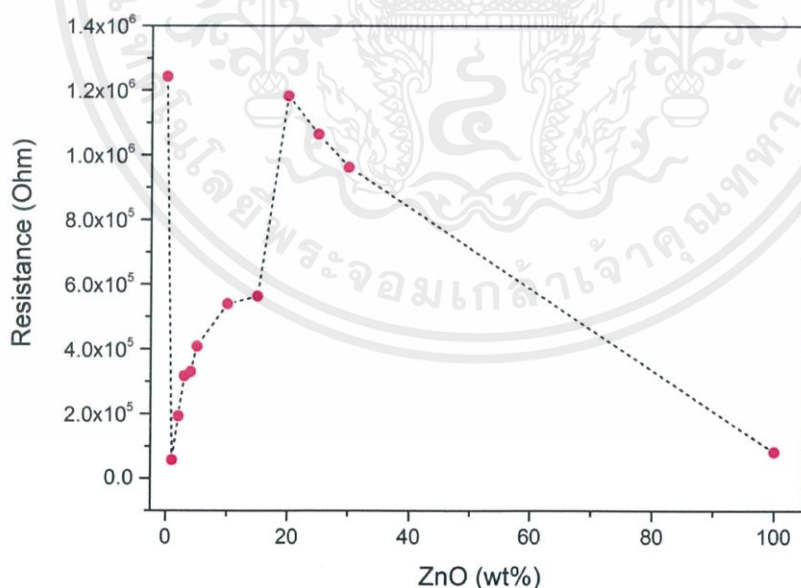
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz

4.1.4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R)

เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (R) พบว่าผลที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R ที่ความถี่ต่างๆซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำๆ ค่า R มีค่าสูงในทุกสัดส่วนองค์ประกอบแต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่า R กลับค่อยๆลดลง จนเกือบคงที่โดยที่สัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความต้านทานมากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานของอัตราส่วนต่างๆโดยขึ้นกับความถี่ที่ 1000 Hz พบว่าแสดงผลดังภาพที่ 4.10 โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเติม ZnO ลงไปในอีพ็อกซีเรซินแล้วค่า R ลดลงอย่างมากแต่เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO ขึ้นอีกพบว่าค่า R ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนที่ ZnO 20 wt% พบว่าค่า R สูงเทียบเท่ากับอีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO เข้าไปอีกพบว่าค่า R กลับลดลง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าที่คอมโพสิตสัดส่วน ZnO เท่ากับ 20 wt% นี้แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ดีเทียบเท่ากับอีพ็อกซีเรซินบริสุทธิ์ทีเดียว



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับความถี่ของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ



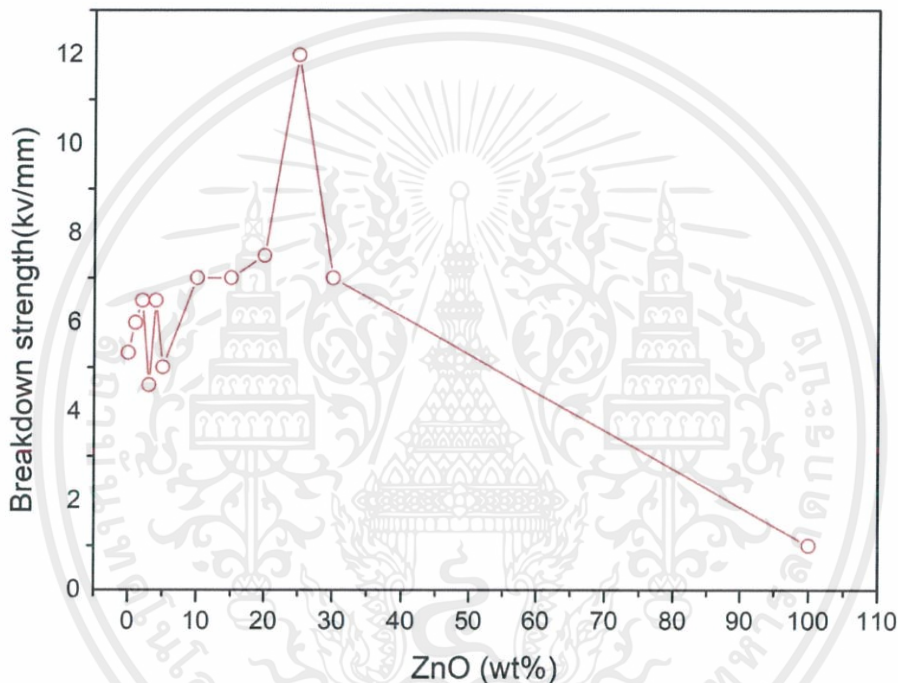
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าและนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz

4.1.4.3 ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength)

เมื่อนำชิ้นงานคอมโพสิตทั้งหมดไปตรวจสอบค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength)

พบว่าผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.11 จากภาพจะเห็นว่าเมื่อเติม ZnO ลงไปในอีพ็อกซีเรซินแล้วค่าความไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คองทนไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้นเกือบทุกสัดส่วน โดยเฉพาะที่ปริมาณ ZnO เท่ากับ 25 wt% นั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วนนี้ก็พบว่าสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า การเติมอนุภาคนาโน ZnO ลงไปในอีพ็อกซีเรซินนั้นแม้ว่าจะไม่ช่วยให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นแต่ก็ช่วยให้คองทนไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นในส่วนถัดไปจะเป็นการเลือกเตรียมคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ในบางสัดส่วนมาปรับปรุงและพัฒนาให้มีการกระจายตัวดีขึ้นโดยได้เลือกที่ปริมาณ ZnO เท่ากับ 20 25 และ 30 wt% เนื่องจากให้ค่า R และค่าคองทนไดอิเล็กทริกสูงสุด



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคองทนไดอิเล็กทริกและนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่สัดส่วนต่างๆ

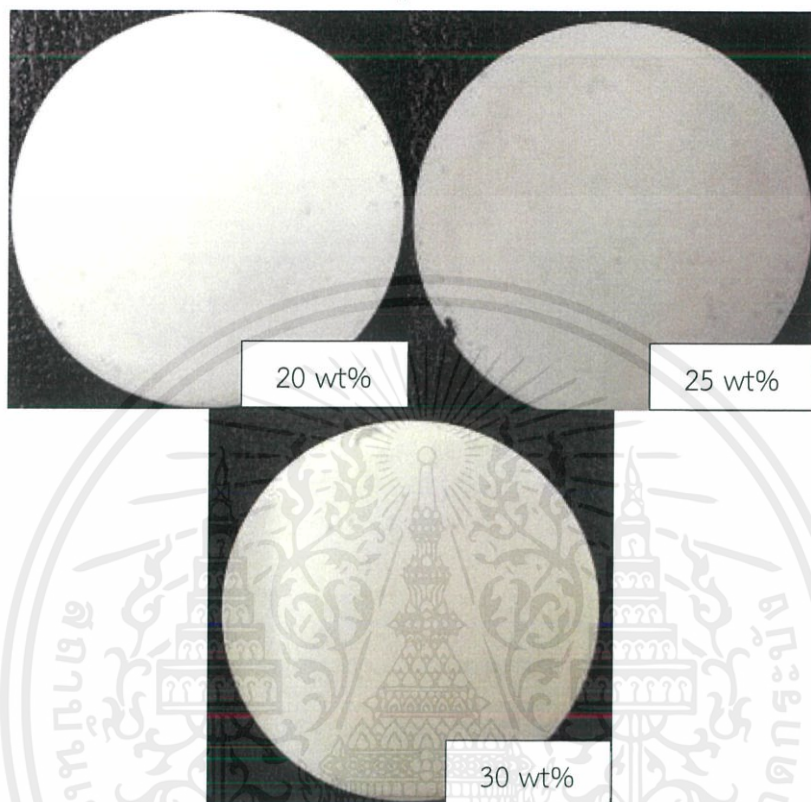
4.2 ผลการปรับปรุงโครงสร้างของ Epoxy กับ ZnO Nanocomposite

ในส่วนนี้จะเป็นการปรับปรุงลักษณะการกระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน โดยได้เลือกที่สัดส่วนปริมาณ ZnO เท่ากับ 20 25 และ 30 wt% มาปรับปรุงด้วยการผสมสารช่วยกระจายซึ่งก็คือ Span 80 ลงไปในปริมาณ 1 wt% โดยผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

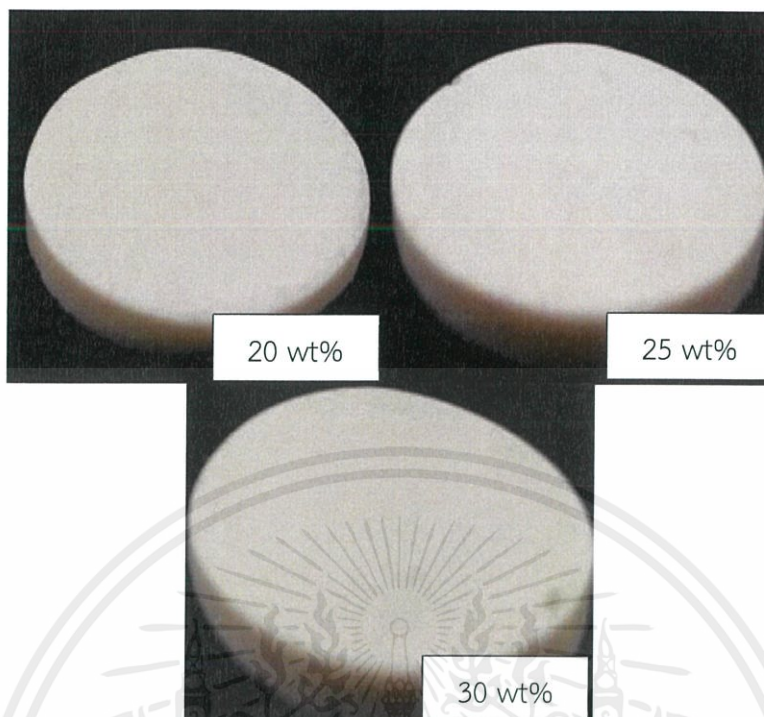
นำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ที่สัดส่วน 20 25 และ 30 wt% ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ของผิวหน้าและภาพตัดขวางของชิ้นงานทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ โดยจากภาพจะเห็นว่าที่สัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะเห็นว่าสีของชิ้นงานเป็นสีขาวขุ่นความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 0.002 กรัมต่อเซนติเมตร ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 2.2 เซนติเมตร และน้ำหนักโดยรวมอยู่ที่ 1.012 กรัม จากนั้นเมื่อเติม ZnO ลงไปในอีพ็อกซีเรซินในปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าสีของชิ้นงานมีลักษณะขาวเนื้อเนียนและเมื่อเติม ZnO มากขึ้นเรื่อยๆสีก็มีความขุ่นมากขึ้น



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายผิวหน้าของนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างด้วย Span 80

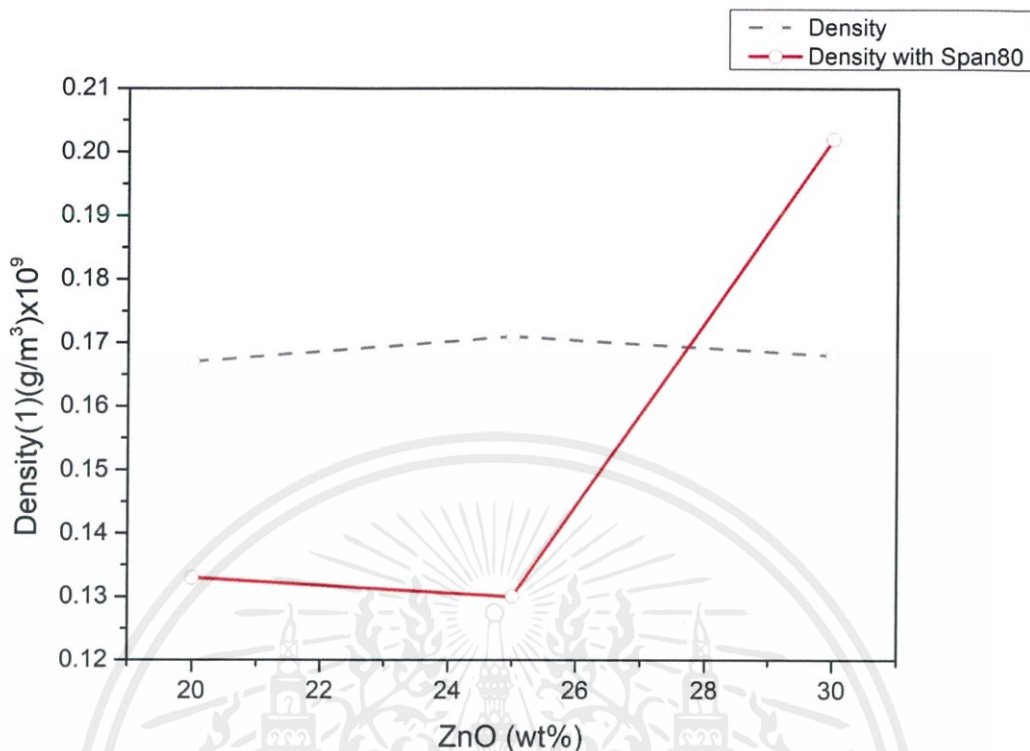
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของนาโนคอมโพสิต ZnO/อัลจิเนตไคโตซินที่อัตราส่วนต่างๆที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างด้วย Span 80

4.2.2 ความหนาแน่น

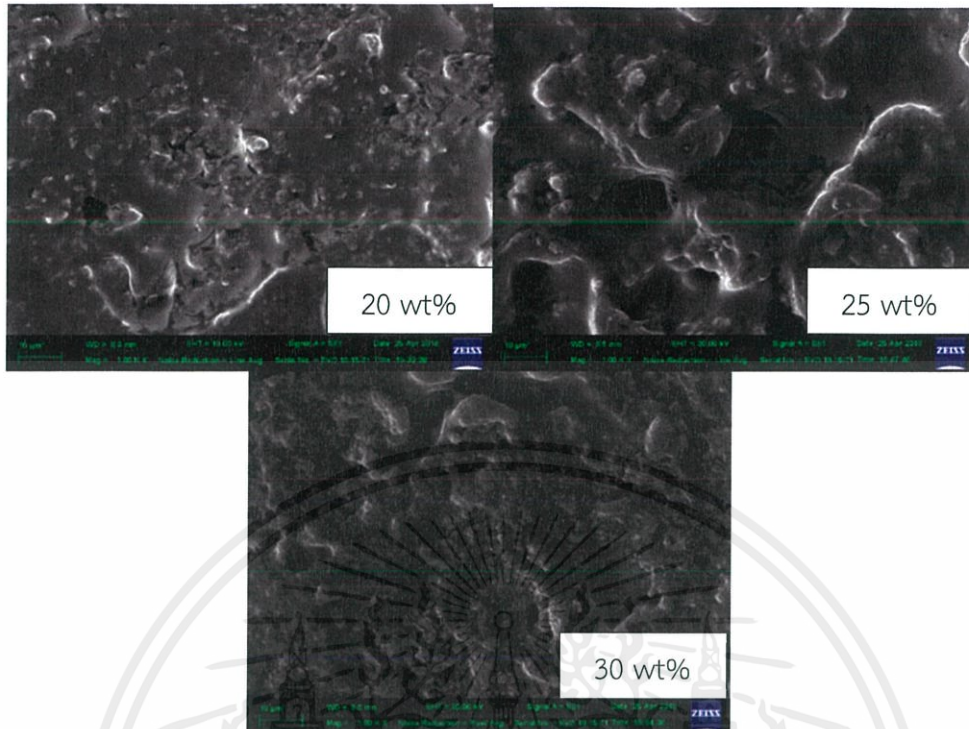
นำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อัลจิเนตไคโตซิน ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว มาคำนวณหา ค่าความหนาแน่นตามสมการที่ 3.4 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.14 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่า ที่สัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น 20 wt% ชิ้นงานมีความหนาแน่นเท่ากับ $0.133 \times 10^9 \text{ g/m}^3$ และเมื่อเติม ZnO ลงไป ก็พบว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ZnO ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.202 \times 10^9 \text{ g/m}^3$ ที่สัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น ซึ่งคาดว่าเป็นเพราะชิ้นงานมีการกระจายตัวของอนุภาค ZnO ที่ดีจึงทำให้รูพรุนภายในน้อยส่งผลต่อค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นนั่นเองแต่ทั้งนี้เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ได้ปรับปรุงโครงสร้าง (เส้นประ) พบว่ามีค่าต่ำกว่าในสัดส่วน ZnO เป็น 20 และ 25 wt% ในขณะที่ ที่ 30 wt% มีค่าสูงขึ้นกว่าเดิม ซึ่งคาดว่านอกจากสารช่วยกระจาย (Span 80) แล้วยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่ต้องคำนึงถึงอีกด้วยไม่ว่าจะเป็นความเข้ากันได้ของวัสดุผสม และรูพรุนที่เกิดขึ้น



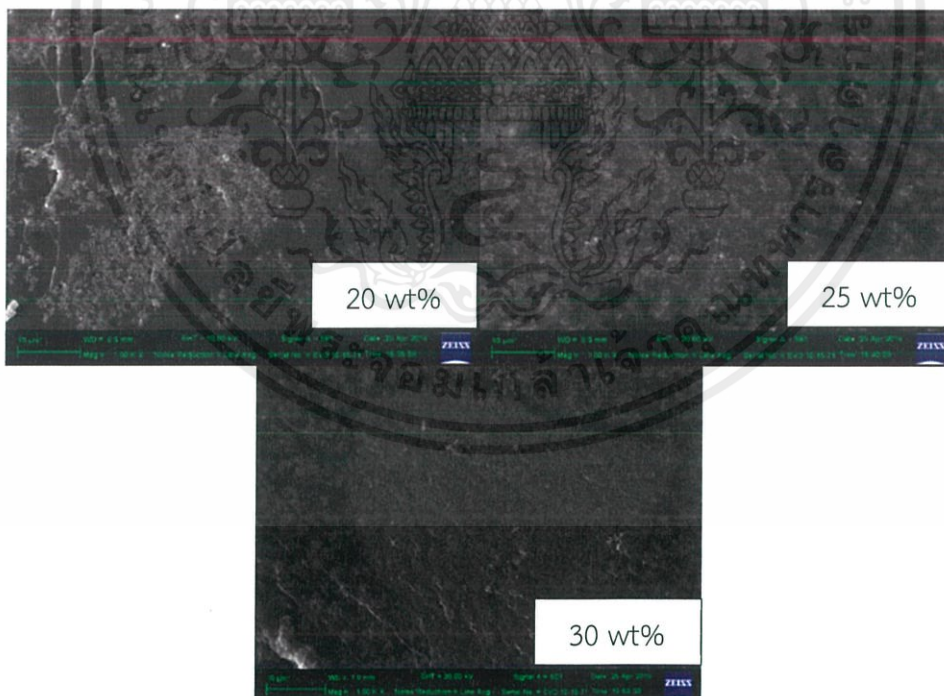
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นก่อนและหลังการปรับปรุงโครงสร้างกับนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่างๆ

4.2.3 ลักษณะโครงสร้าง

นำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซิน ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผิวหน้าและภาพตัดขวางของชิ้นงานทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ โดยจากภาพจะเห็นว่าที่สัดส่วนซิงค์ออกไซด์เป็น 30 พบว่าบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานมีความขรุขระและมีรูพรุนอยู่จำนวนมากแต่มีแนวโน้มการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนต่างๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อนำชิ้นงานมาปรับปรุงโครงสร้างแล้วมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ดีขึ้น



ภาพที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว



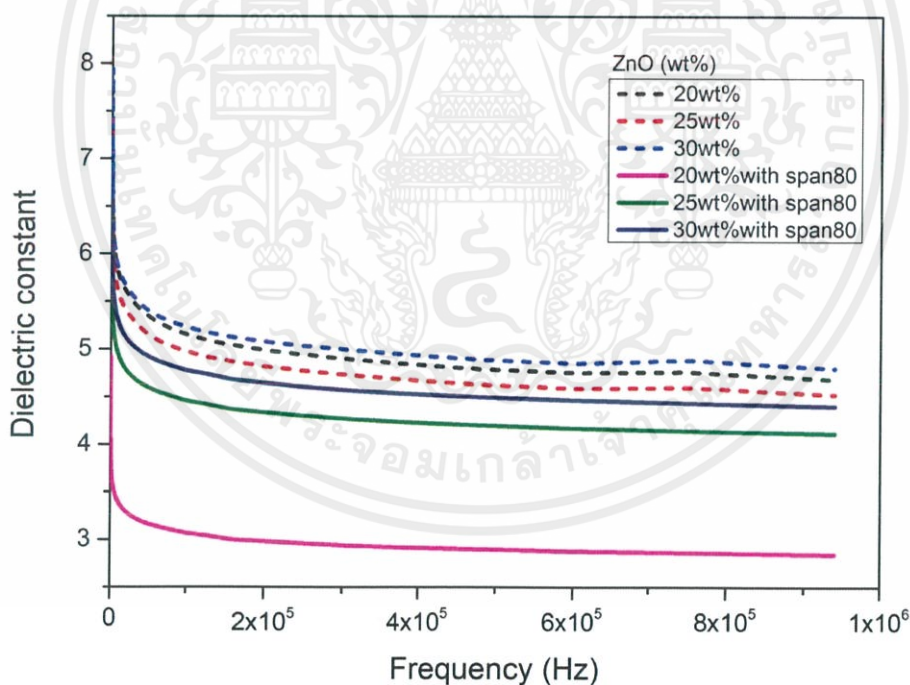
ภาพที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

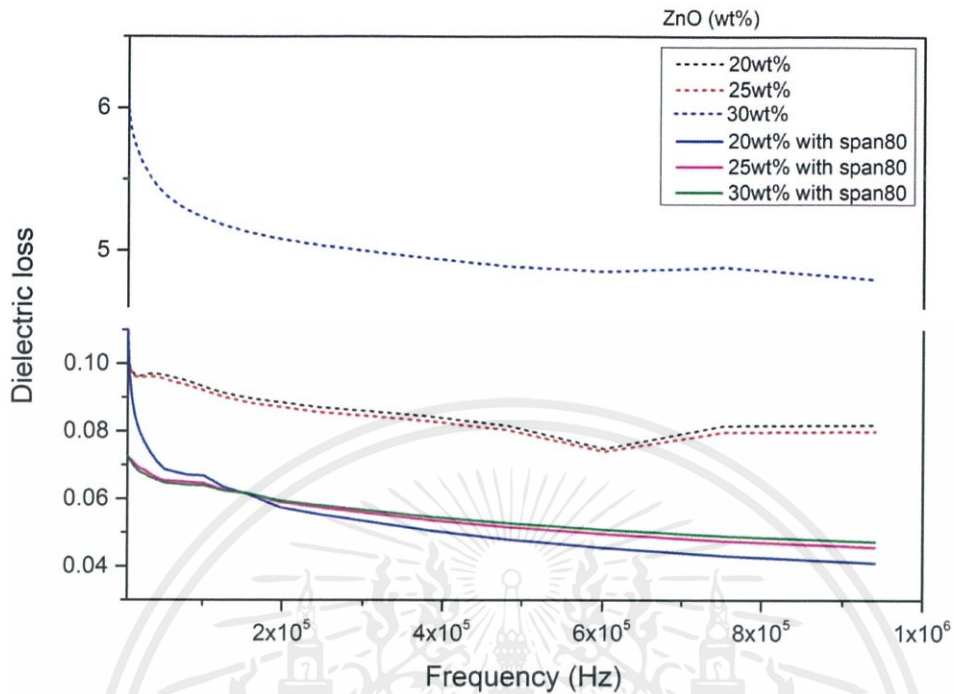
4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้า

4.2.4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss)

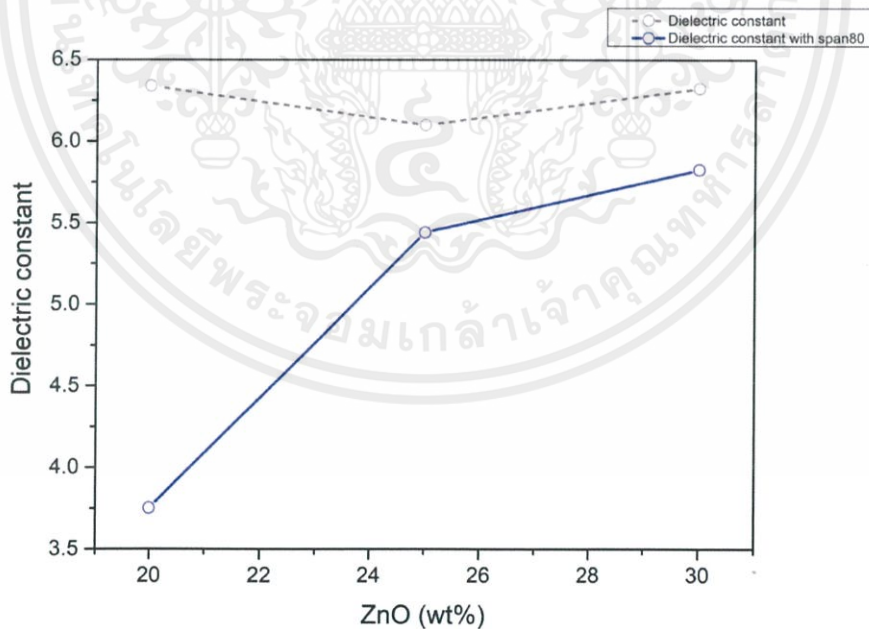
เมื่อนำนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้วไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า สัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มากที่สุด และมีพฤติกรรมเปลี่ยนกับความถี่เช่นเดียวกับกับนาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ปรับปรุงโครงสร้าง แต่ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (ภาพที่ 4.18) ร่วมด้วยพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยกว่านาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงมาก ซึ่งก็ถือว่าเป็นสัญญาณที่ดี ในการพัฒนาปรับปรุง และเมื่อทำการพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่คงที่ (1000 Hz) พบว่าผลที่ได้แสดงในกราฟที่ 4.19 และ 4.20 ซึ่งก็ยืนยันว่าแม้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเล็กน้อยแต่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกก็ลดลงเช่นกันเมื่อนาโนคอมโพสิตผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความถี่ของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว

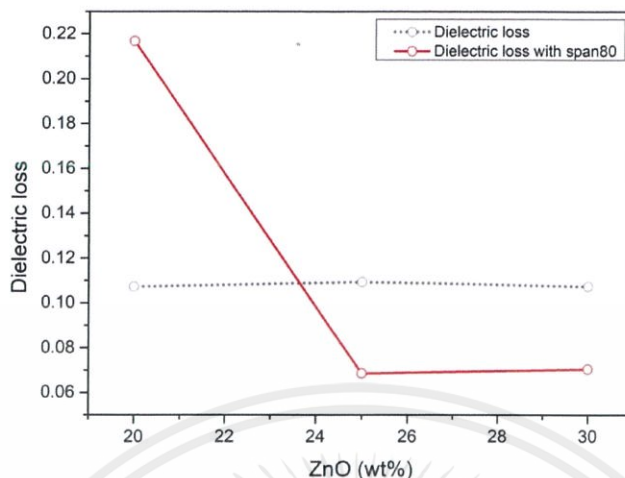


ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและความถี่ของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณ ZnO ของนาโนคอมโพสิตก่อนและหลังทำการปรับปรุงโครงสร้างในอัตราส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz

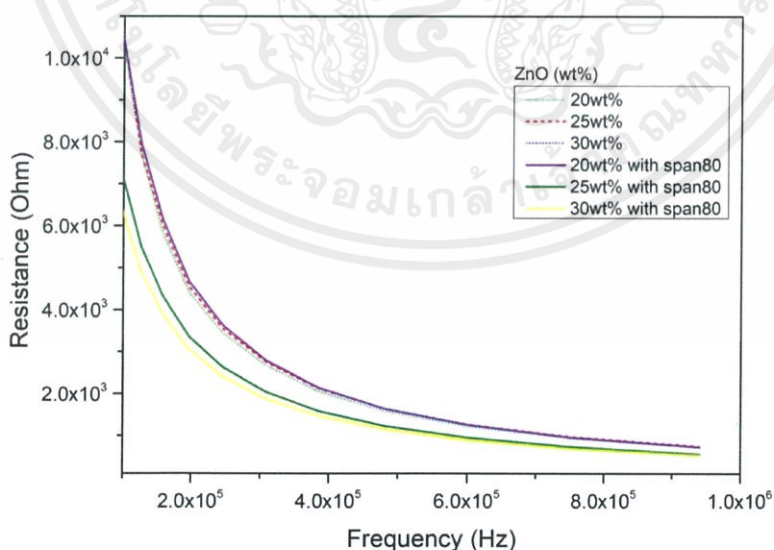
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับปริมาณ ZnO ของนาโนคอมโพสิตก่อนและหลังทำการปรับปรุงโครงสร้างในอัตราส่วนต่างๆที่ความถี่ 1000 Hz

4.2.4.2 ความต้านทาน (R)

เมื่อนำนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้วไปตรวจสอบค่าความต้านทานพบว่าผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.21 ซึ่งจากกราฟพบว่าค่า R ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักในทุกสัดส่วนและค่าลดลงจากนาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ได้ปรับปรุงโครงสร้างเล็กน้อย

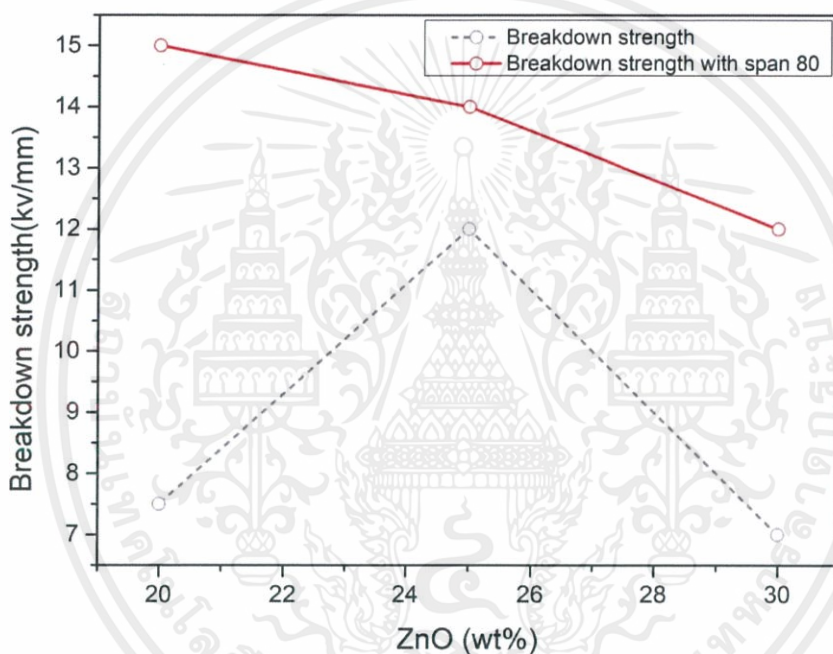


ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความถี่ของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.3 ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength)

เมื่อนำนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้วไปตรวจสอบค่าความคงทนไดอิเล็กทริกในทุกสัดส่วนมีค่าสูงกว่านาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ผลการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน ZnO ในคอมโพสิตโดยใช้สารช่วยกระจาย (Span 80) นั้นช่วยให้การกระจายตัวของ ZnO ดีขึ้นจริงและแม้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะไม่ได้ดีขึ้นแต่ก็ไม่ได้ทำให้ค่าแตกต่างไปจากเดิมมากนักในขณะที่ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูงขึ้นอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงทนไดอิเล็กทริกและนาโนคอมโพสิต ZnO/อีพ็อกซีเรซินที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้ว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการทดลอง

นาโนคอมโพสิต ZnO/อีพอกซีเรซินในสัดส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้นั้นแสดงค่าทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณ ZnO ที่เปลี่ยนแปลงซึ่งในช่วงของความถี่ต่ำๆค่า R มีค่าสูงในทุกสัดส่วนองค์ประกอบแต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่า R กลับค่อยๆลดลง จนเกือบคงที่โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดที่สัดส่วนปริมาณ ZnO เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ดีเทียบเท่ากับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ที่เดียวและค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูงที่สุดที่สัดส่วนปริมาณ ZnO เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองในส่วนนี้ก็พบว่าสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า การเติมอนุภาคนาโน ZnO ลงไปในอีพอกซีเรซินนั้นแม้ว่าจะไม่ช่วยให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นแต่ก็ช่วยให้ความคงทนไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงเลือกเตรียมคอมโพสิต ZnO/อีพอกซีเรซินในบางสัดส่วนมาปรับปรุงและพัฒนาให้มีการกระจายตัวดีขึ้นโดยได้เลือกที่ปริมาณ ZnO เท่ากับ 20 25 และ 30 wt% เนื่องจากให้ค่า R และค่าคงทนไดอิเล็กทริกสูงสุด

เมื่อนำนาโนคอมโพสิตสัดส่วนปริมาณ ZnO เท่ากับ 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาปรับปรุงโครงสร้างและการกระจายตัวด้วยสารช่วยกระจาย (Span80) และพบว่าสัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มากที่สุดและมีพฤติกรรมการเปลี่ยนกับความถี่เช่นเดียวกับกับนาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ปรับปรุงโครงสร้าง แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาว่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกร่วมด้วยพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยกว่านาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงมาก ซึ่งก็ถือว่าเป็นสัญญาณที่ดี ในการพัฒนาปรับปรุง และเมื่อทำการพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่คงที่ (1000 Hz) ซึ่งก็ยืนยันว่าแม้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเล็กน้อยแต่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกก็ลดลงเช่นกันเมื่อนำนาโนคอมโพสิตผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้วและค่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักในทุกสัดส่วนและค่าลดลงจากนาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ได้ปรับปรุงโครงสร้างเล็กน้อยจากนั้นเมื่อนำไปตรวจสอบค่าความคงทนไดอิเล็กทริกในทุกสัดส่วนมีค่าสูงกว่านาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้าง

โดยสรุปชิ้นงานทั้งหมดมีการกระจายของเฟสรองดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกและค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นไม่แตกต่างจากก่อนที่จะปรับปรุงมากนัก แต่ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกนั้นมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

5.2 แนวทางการพัฒนา

5.2.1 นำสัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ปรับปรุงแล้วไปศึกษาและปรับปรุงโครงสร้างต่อเนื่องจากมีค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกสูงที่สุดและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยกว่านาโนคอมโพสิตที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงมาก

5.2.2 เปลี่ยนตัวปรับปรุงโครงสร้างจาก Span 80 เป็น CNT โดยปรับปรุงในสัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2.3 ในสัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ปรับปรุงโครงสร้างแล้วมีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูงที่สุดดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะนำมาศึกษาต่อในสัดส่วนที่น้อยลง เช่น สัดส่วนปริมาณของซิงค์ออกไซด์ 19 18 และ 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Wenhui Yang, Ran Yi, Xu Yang, Man Xu . Received: 4 November 2011;
Accepted: 28 March 2012. Effect of Particle Size and Dispersion On Dielectric
Properties in ZnO/Epoxy Resin Composites.
- [2] Ilona Plesca^{1,*}, Petru V. Nontinger², Sandra Schlögl¹, Christof Sumereder³
and Michael Muhr⁴. Received: 31 January 2016; Accepted: 15 April 2016;
Published: 28 April 2016. Properties of Polymer Composites Used in
High-Voltage Applications.
Available URL : <http://www.mdpi.com/2073-4360/8/5/173>
- [3] ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช.2557.วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 : ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า.
พิมพ์ครั้งที่3.กรุงเทพฯ.ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย
- [4] ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช.2557.วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 2: ตัวนำแม่เหล็ก สารกึ่งตัวนำ
ตัวนำยิ่งยวด วัสดุฉนวน.พิมพ์ครั้งที่3.กรุงเทพฯ.ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย
- [5] Available URL : <http://www.oocities.org/thana755/>
Available URL : eestaff.kku.ac.th/~amnart/HV/LectureNote/HV-5.doc
Available URL : <http://kullawat12.blogspot.com/2011/12/6.html>

ประวัติผู้เขียน

นางสาว ชลรดา จิตรประวัติ ชื่อเล่น พลอย เกิดวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ.2538 สถานที่เกิด จังหวัด
ชลบุรี สถานที่อยู่ปัจจุบัน 88/13 ม.3 ต.สุรศักดิ์ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี รหัสไปรษณีย์ 20110 ประวัติ
การศึกษา พ.ศ.2556 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนดาราสมุทร ศรีราชา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้