

อิทธิพลของการเจือ โนโอเบียม อินเดียม และ อะลูมิเนียม ในไทเทเนียมไดออกไซด์เซรามิกต่อ  
สมบัติทางไดอิเล็กทริก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Influence of doping Nb, In and Al in TiO<sub>2</sub> ceramic on dielectric properties



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

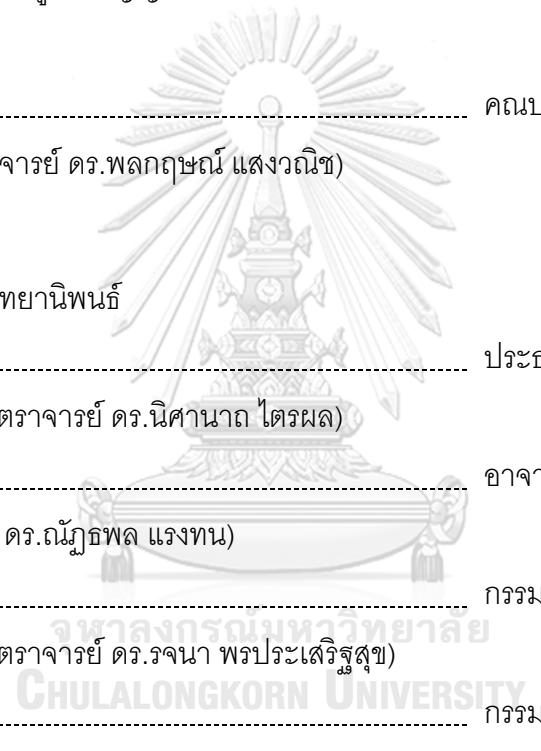
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการเจือ โนโอเปียม อินเดียม และ อะลูมิเนียม
	ในไทเทเนียมไดออกไซด์เซรามิกต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริก
โดย	นายยุทธพิชัย ชำมณี
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ณัฐพล แรงทน

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรนล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ณัฐพล แรงทน)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รจนา พรประเสริฐสุข)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นราธิป วิทยากร)	



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ยุทธพิชัย ขำภณี : อิทธิพลของการเจือ โนโอเบียม อินเดียม และ อะลูมิเนียม ในไทเทเนียม ไดออกไซด์เซรามิกต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริก. ( Influence of doping Nb, In and Al in  $TiO_2$  ceramic on dielectric properties) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ณัฐพล แรงทน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกไทเทเนียมไดออกไซด์เซรามิกส์ ด้วยการเจือ โนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ การสังเคราะห์ทำได้ด้วยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ยี่สิบแปดชั่วโมง ได้มีการแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 การเจือไทเทเนียม ไดออกไซด์ด้วยโนโอเบียมและอินเดียมร่วมกันที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงเพิ่มสูงขึ้นจาก 400 เป็น 600, 8,000 และ 14,000 ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโนโอเบียมและอินเดียมที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และปรับองค์ประกอบของอินเดียมแบบขาดและเกินอัตราส่วนของ โนโอเบียมและอินเดียม ได้แก่ 0.50:0.47, 0.50:0.48, 0.50:0.49, 0.50:0.51, 0.50:0.52 และ 0.50:0.53 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของอินเดียมขาด มีค่า 28,000, 22,000 และ 30,000 ตามลำดับซึ่งโดยรวมมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของอินเดียมเกินซึ่งมีค่า 17,000, 12,000 และ 13,000 ตามลำดับ กลุ่มที่ 3 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโนโอเบียม อินเดียมและอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล อัตราส่วนของ โนโอเบียม อินเดียมและอะลูมิเนียม ได้แก่ 0.005:0.475:0.025, 0.005:0.450:0.050 และ 0.005:0.425:0.075 มีสมบัติที่โดดเด่นทางกายภาพและไฟฟ้า การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเฟส หรือการเกิดเฟสที่แปลกปลอม ขนาดเกรนเฉลี่ย 25.94, 23.24 และ 40.20 ไมโครเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 27,000, 25,000 และ 43,000 ตามลำดับและมีความเสถียรในช่วงความถี่  $10^2$ - $10^6$  เฮิร์ต และ จากอุณหภูมิห้อง ถึง 300 องศาเซลเซียส

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่ออนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

## 5872028623 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: Titanium dioxide, Doping, Niobium Indium Aluminium, Dielectric

Yuttapichai Kummanee : Influence of doping Nb, In and Al in  $\text{TiO}_2$  ceramic on dielectric properties. Advisor: Natthaphon Raengthon, Ph.D.

In this work, it is of interest to develop electrical properties of titanium dioxide dielectric ceramics by doping with niobium (Nb), indium (In), and aluminium (Al). Samples were synthesized by solid-state reaction method. Samples were sintered at  $1,450^\circ\text{C}$  for 10 hours. Samples were divided into 3 group. The first group is 1, 5, and 7 mol% (In,Nb) co-doped  $\text{TiO}_2$ . Dielectric permittivity of undoped is 400 when doping at 1, 5, and 7 mol% of (In,Nb), it increased to 600, 8,000 and 14,000, respectively. The second group is 5 mol% (In,Nb) co-doped  $\text{TiO}_2$ , which indium concentration was adjusted to be deficient and excess. The ratios of Nb:In used in this doping condition are 0.50:0.47, 0.50:0.48, 0.50:0.49, 0.50:0.51, 0.50:0.52 and 0.50:0.53. Dielectric permittivity of indium-deficient conditions are 28,000, 22,000 and 30,000, respectively. It showed higher value than indium-excess conditions, which are 17,000, 12,000 and 13,000, respectively. The third group is 5 mol% (Nb,In,Al) co-doped  $\text{TiO}_2$ , the ratios of Nb:In:Al dopants are 0.005:0.475:0.025, 0.005:0.450:0.050 and 0.005:0.425:0.075. It exhibited outstanding physical and electric properties. XRD results confirm that all sample formed a single phase. It exhibited average grain size of 25.94, 23.24 and 40.20 micrometer, respectively, and dielectric permittivity of 27,000, 25,000 and 43,000, respectively. Dielectric properties of this group show frequency independent over a wide range of frequency from 100 Hz up to 1 MHz and temperature independent over a wide range of temperature from room temperature up to  $300^\circ\text{C}$ .

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยและการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้รับความเมตตาจาก  
อาจารย์ ดร. ณัฐพล แรงทน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่แนะนำ อบรม สั่งสอน ให้คำปรึกษา  
ตลอดระยะเวลาในทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน สำหรับการตรวจ  
แก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์และคำแนะนำต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและ  
สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาและงานวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปี  
โทรเคมีและวัสดุ ระดับปริญญาโท ปี 2559

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษา “ทุนวิทยบัณฑิต”

ขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการเซรามิกส์ขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์วิจัย

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการวิเคราะห์ทดสอบ

ขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อน ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจมาโดย  
ตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ยุทธพิชัย ขำมณี

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) .....	3
2.1.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) .....	4
2.2 ไนโอเบียมออกไซด์ (Niobium oxide).....	5
2.2.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) .....	6
2.3 อินเดียมออกไซด์ (Indium oxide) .....	6
2.3.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) .....	7
2.4 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) .....	7

2.4.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) .....	8
2.5 การเจือ (Doping).....	8
2.5.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) .....	9
2.5.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) .....	9
2.5.2.1 สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (n-type semiconductor) .....	10
2.5.2.1 สารกึ่งตัวนำประเภทพี (p-type semiconductor) .....	10
2.5.3 ผลกระทบของการเจือในไททาเนียมไดออกไซด์.....	11
2.5.3.1 การเจือแบบเข้าไปแทนที่ (Substitute solid solution) .....	11
2.5.3.2 การเจือแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) .....	12
2.6 ตัวเก็บประจุ (Capacitor).....	12
2.6.1 หลักการเบื้องต้นของตัวเก็บประจุ.....	12
2.6.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ.....	13
2.6.3 ชนิดของตัวเก็บประจุ.....	14
2.7 ไดอิเล็กทริก (Dielectric).....	17
2.7.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุไดอิเล็กทริก .....	20
2.7.3 ไดอิเล็กทริกเซรามิก (Dielectric ceramic) .....	21
2.8 กระบวนการเตรียมเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) .....	23
2.8.1 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอลความเร็วสูง (Planetary ball-milling) .....	24
2.8.2 การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว (Uniaxial pressing).....	24
2.8.3 กระบวนการเผาผนึก (Sintering).....	25
2.9 การแบ่งระดับชั้นของตัวเก็บประจุเซรามิก .....	27
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27



บทที่ 3 ขั้นตอนวิธีการทดลอง .....	32
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	34
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	35
3.3 ขั้นตอนการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	36
3.4 ขั้นตอนการเตรียมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ .....	37
3.5 ขั้นตอนการอัดเม็ดเซรามิกและเผาขึ้น .....	38
3.6 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	39
3.7 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างฐานไทเทเนียมไดออกไซด์หลังจากการเผาขึ้น .....	39
3.7.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเฟส .....	39
3.7.2 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค .....	40
3.7.3 การตรวจวัดความหนาแน่น .....	41
3.6.4 การทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก .....	41
3.6.5 ทดสอบสภาพต้านทานทางไฟฟ้า .....	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล .....	44
4.1 กลุ่มที่ 1 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารประกอบเดี่ยว รวมถึงไนโอเบียมออกไซด์ และอินเดียมออกไซด์ .....	45
4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก .....	45
4.1.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	46
4.1.1.2 ผลการเฟสของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ .....	46
4.1.1.3 ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ ....	49
4.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าทางของเซรามิก .....	51
4.1.2.1 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและความถี่ .....	51
4.1.2.2 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ .....	54

4.1.2.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้า.....	56
4.2 กลุ่มที่ 2 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ โดยที่ ความเข้มข้นของอินเดียมออกไซด์ขาด และ เกิน .....	59
4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก.....	59
4.2.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์.....	59
4.2.1.2 ผลการทดสอบเฟสของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	61
4.2.1.3 ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ ....	62
4.2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก .....	64
4.2.2.1 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและความถี่ .....	64
4.2.2.2 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ .....	67
4.2.2.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้า.....	69
4.2.3 การทดสอบเคมีพื้นผิวของชิ้นงานด้วย XPS .....	71
4.3 กลุ่มที่ 3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์ โดยที่อะลูมิเนียมออกไซด์มีความเข้มข้นน้อยกว่ากลุ่มที่ 3.....	74
4.3.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก.....	74
4.3.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์.....	74
4.3.1.2 ผลการทดสอบเฟสของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	76
4.3.1.3 ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ ....	77
4.3.2 สมบัติทางไฟฟ้าทางของเซรามิกกลุ่มที่ 3 .....	78
4.3.2.1 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและความถี่ .....	78
4.3.2.2 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ .....	79
4.3.2.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้า.....	80

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	83
5.1.1 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารประกอบเดี่ยว รวมถึงไนโอเบียมออกไซด์และ อินเดียมออกไซด์ .....	84
5.1.2 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ โดยที่ ความเข้มข้นของอินเดียมออกไซด์ขาด และ เกิน .....	85
5.1.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์ .....	86
5.1.4 ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ .....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	87
บรรณานุกรม .....	88
บรรณานุกรมรูปภาพ.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	94

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของไททาเนียมไดออกไซด์ .....	4
ตารางที่ 2.2 สมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ .....	5
ตารางที่ 2.3 สมบัติของไนโอเบียมออกไซด์ .....	6
ตารางที่ 2.4 สมบัติของอินเดียมออกไซด์ .....	7
ตารางที่ 2.5 สมบัติของอะลูมิเนียมออกไซด์ .....	8
ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของออกไซด์บริสุทธิ์ .....	20
ตารางที่ 2.7 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ถูกเจือด้วยธาตุ 2 ชนิดพร้อมกัน ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 kHz .....	23
ตารางที่ 3.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 .....	32
ตารางที่ 3.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 .....	33
ตารางที่ 3.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3 .....	33
ตารางที่ 4.1 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 .....	46
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 .....	51
ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 ทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต .....	56
ตารางที่ 4.4 แสดงสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 1 .....	58
ตารางที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 .....	60
ตารางที่ 4.6 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 .....	64
ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 ทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต .....	69

ตารางที่ 4.8 แสดงสภาพด้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่ม  
ที่ 2 ..... 70

ตารางที่ 4.9 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3..... 75

ตารางที่ 4.10 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3..... 78

ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3 ทดสอบที่  
อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต..... 80

ตารางที่ 4.12 แสดงสภาพด้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์  
กลุ่มที่ 3..... 82



## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	แบบจำลองโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	4
รูปที่ 2.2	แบบจำลองโครงสร้างสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์.....	9
รูปที่ 2.3	แบบจำลองโครงสร้างสารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น.....	10
รูปที่ 2.4	แบบจำลองโครงสร้างสารกึ่งตัวนำประเภทพี.....	11
รูปที่ 2.5	แบบจำลองการเจือแบบเข้าไปแทนที่.....	11
รูปที่ 2.6	แบบจำลองการเจือแบบแทรกตัว .....	12
รูปที่ 2.7	แบบจำลองโครงสร้างตัวเก็บประจุเมื่อต่อกับวงจรไฟฟ้ากระแสตรง .....	13
รูปที่ 2.8	ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์.....	14
รูปที่ 2.9	ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์ .....	15
รูปที่ 2.10	ตัวเก็บประจุชนิดโพลีลาร์ .....	15
รูปที่ 2.11	ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก .....	15
รูปที่ 2.12	ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้.....	16
รูปที่ 2.13	ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้.....	16
รูปที่ 2.14	วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโมเลกุลไม่มีขั้ว รูปซ้าย ขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า รูปขวา ขณะได้รับสนามไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 2.15	วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโมเลกุลมีขั้ว รูปซ้าย ขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า รูปขวา ขณะได้รับสนามไฟฟ้า.....	18
รูปที่ 2.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของแบเรียมไททาเนต (Barium titanate: BaTiO <sub>3</sub> ) .....	22
รูปที่ 2.17	แบบจำลองกระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอลความเร็วสูง.....	24
รูปที่ 2.18	แบบจำลองการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว .....	25

รูปที่ 2.19 แบบจำลองกระบวนการเผาผนึก .....	26
รูปที่ 2.20 แบบจำลองโครงสร้างตำหนิ.....	29
รูปที่ 2.21 แบบจำลอง “internal barrier layer capacitance mechanism”.....	30
รูปที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	35
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึก.....	38
รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อน .....	40
รูปที่ 3.4 เครื่องซึ่งสำหรับการตรวจวัดความหนาแน่น.....	41
รูปที่ 3.5 เครื่อง LCR Meter .....	42
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 หลังจากเผาผนึก.....	45
รูปที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 1 .....	47
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 โดยมี T, NT, IT และ AT. 49	
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 โดยมี T, NIT1, NIT5 และ NIT7 .....	50
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 1 (ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยธาตุเดี่ยว).....	52
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 2 (เจือด้วย ไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ).....	53
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 1 (ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยธาตุเดี่ยว).....	54
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 2 (เจือด้วย ไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ).....	55
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์สภาพต้านทานเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของตัวอย่างของกลุ่มที่ 1 .....	57
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 หลังจากเผาผนึก.....	59
รูปที่ 4.11 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 2.....	61

รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 ระบบที่อินเดียมขาด โดยมี NIT47, NIT48, NIT49 และ NIT5 .....	62
รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 ระบบที่อินเดียมเกิน โดยมี NIT5, NIT51, NIT52 และ NIT53 .....	63
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1 .....	65
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 2 .....	66
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1 .....	67
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 2 .....	68
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์สภาพต้านทานเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวอย่างของกลุ่มที่ 2 ...	69
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของ Ti2p scan ในพื้นผิวของตัวอย่าง NIT49, NIT5 และ NIT51 .....	71
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของ O1s scan ในพื้นผิวของตัวอย่าง NIT49, NIT5 และ NIT51.....	72
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างกลุ่มที่ 3 หลังจากเผาผนึก .....	74
รูปที่ 4.22 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 3.....	76
รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3.....	77
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 3 ...	78
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 3 .	79
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์สภาพต้านทานเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวอย่างของกลุ่มที่ 3 ...	81



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญเป็นอย่างมากและมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว วัสดุที่สำคัญประเภทหนึ่งซึ่งช่วยส่งเสริมความก้าวหน้าอุตสาหกรรมดังกล่าว คือ วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) ซึ่งพบว่ามีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยมและสามารถพัฒนาได้ตามความต้องการในปัจจุบัน คือ การลดขนาดของวัสดุโดยที่วัสดุมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น<sup>[1]</sup>

ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่เกิดจากปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าวัสดุนี้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) สูงมากกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกอื่น ๆ เช่น  $\text{BaTiO}_3$ <sup>[2]</sup>,  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ <sup>[3]</sup>,  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ <sup>[4]</sup> และ  $\text{ZnO}$ <sup>[5]</sup> ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีย่านอุณหภูมิที่ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่มาก ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจาก หากนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้งานในอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเป็นอย่างมากและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) จะเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นเรื่องยากในการผลิตวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงและมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำในเชิงอุตสาหกรรม<sup>[6]</sup> แต่วัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถใช้งานในอุณหภูมิที่หลากหลายโดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงน้อย วัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นที่นิยมนำมาศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติไดอิเล็กทริก

เซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้จะถูกทำการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในระบบต่าง ๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์เพียงธาตุเดียว ( $\text{TiO}_2$ ),  $(\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$ ,  $(\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$  และ  $(\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$  รวมถึง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์  $((\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_x(\text{TiO}_2)_{1-x})$  โดยที่ x มีค่าเป็น 0.01, 0.05 และ 0.07 กลุ่มที่ 2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่ขาด

$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่เกิดขึ้น  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5+x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  โดยที่  $x$  มีค่าเป็น 0.01, 0.02 และ 0.03 กลุ่มที่ 3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยที่  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-y}\text{Al}_y)_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  โดยที่  $y$  มีค่าเป็น 0.025, 0.050 และ 0.075 โดยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state) เพื่อทำการศึกษาลักษณะการนำ ไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมถึงอัตราส่วนของธาตุที่เจือส่งผลกระทบท่อสมบัติต่าง ๆ โดยการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และ สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและพัฒนาสมบัติทางไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาผลกระทบของการเจือ ไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ในไทเทเนียมไดออกไซด์
- 2) ศึกษาผลกระทบของปริมาณอินเดียมที่ไม่เป็นไปตามปริมาณสารสัมพันธ์ทั้งแบบ ที่เกินและแบบที่ขาดต่อสมบัติทางไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์
- 3) สังเคราะห์เซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์
- 4) ตรวจสอบโครงสร้างผลึก สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และ สัณฐานวิทยา ของไทเทเนียมไดออกไซด์ทุก ๆ องค์ประกอบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้วัสดุเซรามิกไดอิเล็กทริกฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$

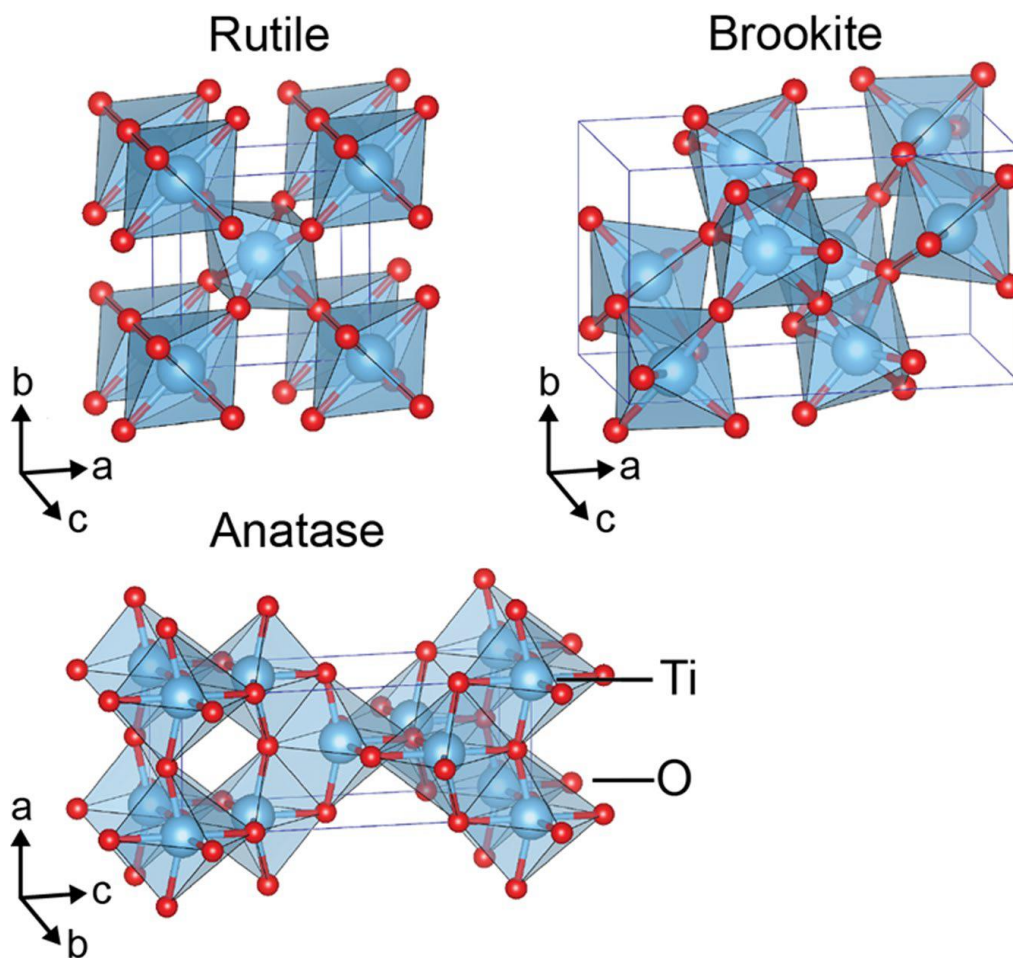
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยต่อสมบัติทางกายภาพรวมถึงสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide:  $\text{TiO}_2$ ) ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ ( $\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) อินเดียมออกไซด์ ( $\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) เพียงธาตุเดียว รวมถึงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ ( $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ ) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-y}\text{Al}_y)_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) หรือ ไททานีย (Titania)<sup>[7]</sup> มีอยู่ทุกหนทุกแห่งบนพื้นโลก ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเฉพาะตัวหลายประการเช่น ทนความร้อนสูง ทนต่อการถูกกัดกร่อน ทนความเค้นสูง และมีสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ดี (Dielectric) เป็นต้น วัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำมาใช้งานเป็นส่วนผสมในอุปกรณ์หลายอย่าง เช่น กระดาษแปลงสีพื้น อุปกรณ์เวชภัณฑ์ เครื่องสำอาง และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีโครงสร้างผลึก 3 แบบหลักดังรูปที่ 2.1 แบบที่ 1 คือ อนาเทส (Anatase) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ แบบที่ 2 คือ รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดทางธรรมชาติ มีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ผลึกรูไทล์ได้แสดงสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ดีคือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง<sup>[8]</sup> และ แบบที่ 3 คือ บรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) เป็นชนิดที่พบน้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนอุณหภูมิมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์<sup>[9]</sup>



รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[1]</sup>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของไททาเนียมไดออกไซด์

TiO <sub>2</sub>	Anatase	Rutile	Brookite
โครงสร้างผลึก	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
a(Å)	3.733	4.584	0.543
b(Å)	3.733	4.584	0.916
c(Å)	0.937	0.295	0.513

### 2.1.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

ไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรสูงที่สุดในทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับผลึกทั้ง 3 แบบ

## ตารางที่ 2.2 สมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์

สูตรทางเคมี	TiO <sub>2</sub>
ลักษณะ	ของแข็ง
สี	ขาว
มวลโมเลกุล	79.9 g/mol
จุดหลอมเหลว	1870 °C
จุดเดือด	2927 °C
รัศมีไอออน Ti <sup>4+</sup>	74.5 pm
รัศมีไอออน Ti <sup>3+</sup>	84.5 pm
รัศมีไอออน O <sup>2-</sup>	128 pm

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและวิจัยไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อพัฒนาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการเจือธาตุ หมู่ 3 และ หมู่ 5 เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามความต้องการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือ ได้แก่ ตัวเก็บประจุ และ โซลาร์เซลล์ เป็นต้น

## 2.2 ไนโอเบียมออกไซด์ (Niobium oxide)

ไนโอเบียมออกไซด์ (Niobium oxide) หรือ ไนโอเบียมเพนตอกไซด์ (Niobium pentoxide)<sup>[10]</sup> เป็นสารที่มีการศึกษาและค้นคว้าตั้งแต่ก่อนคริสต์ศักราช 1940 เพราะว่ามีเฟสหลายรูปแบบที่น่าสนใจ พบได้ง่ายตามธรรมชาติ มีสมบัติที่น่าสนใจคือ ทนต่อทานการกัดกร่อน มีความคงตัวเชิงเทอร์โมไดนามิคสูง มีโครงสร้างเฟสมากถึง 15 รูปแบบ โครงสร้างผลึกที่พบได้มากที่สุดมีด้วยกัน 3 แบบ คือ ชูโดเฮกซะโกนอล (Pseudo-hexagonal) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) และ โมโนคลินิก (monoclinic)

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

#### ตารางที่ 2.3 สมบัติของไนโอเบียมออกไซด์

สูตรทางเคมี	$\text{Nb}_2\text{O}_5$
ลักษณะ	ของแข็ง
สี	ขาว
มวลโมเลกุล	265.81 g/mol
จุดหลอมเหลว	1520 °C
จุดเดือด	-
รัศมีไอออน $\text{Nb}^{5+}$	78 pm

ในปัจจุบันไนโอเบียมออกไซด์นิยมใช้เป็นสารเจือในวัสดุกึ่งตัวนำเพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับแสงอย่างแพร่หลาย เช่น โซล่าเซลล์ ไดโอดเปล่งแสง อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ แบตเตอรี่ และ ตัวเก็บประจุ เป็นต้น

### 2.3 อินเดียมออกไซด์ (Indium oxide)

อินเดียมออกไซด์ (Indium oxide)<sup>[11]</sup> เป็นสารที่สำคัญต่อวัสดุออกไซด์ตัวนำโปร่งใสได้ (transparent conducting oxide) ตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะว่ามีสมบัติที่น่าสนใจคือ มีการนำไฟฟ้าที่ดีและมีค่าการส่องผ่านแสงที่สูง โครงสร้างผลึกของอินเดียมออกไซด์คือ ลูกบาศก์แบบกลางตัว (Body-Centered Cubic) เป็นสารที่มีมวลค่าสูง เนื่องจากนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย

### 2.3.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

#### ตารางที่ 2.4 สมบัติของอินเดียมออกไซด์

สูตรทางเคมี	$\text{In}_2\text{O}_3$
ลักษณะ	ของแข็ง
สี	เหลือง
มวลโมเลกุล	277.64 g/mol
จุดหลอมเหลว	1910 °C
จุดเดือด	3300 °C
รัศมีไอออน $\text{In}^{3+}$	94 pm

การประยุกต์ใช้อินเดียมออกไซด์ในปัจจุบันนอกจากออกไซด์ตัวนำสองผ่านแล้ว ยังเป็นที่นิยมนำมาเป็นสารเจือในวัสดุไดอิเล็กทริกเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติทางไฟฟ้า

#### 2.4 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide)

อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) หรือ อะลูมินา (alumina)<sup>[12]</sup> ในธรรมชาติจัดเป็นแร่ธาตุ ที่พบในรูปของ คอรันดัม (Corundum) ไดอะสโปร์ (Diaspore) และ กิบบไซต์ (Gibbsite) โดยแร่คอรันดัม ที่พบจะเป็นแร่รัตนชาติ เช่น ทับทิม (Ruby) ไพลิน (Sapphire) นุชราคัม (Yellow sapphire)

อะลูมิเนียมออกไซด์สามารถสกัดได้จาก แร่บอกไซต์ และ ดินลูกรังโดยวิธีของ เบเยอร์ (Bayer process) คือการนำแร่มาบดแล้วหลอมด้วยโซดาไฟ (Caustic soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผา

### 2.4.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

ตารางที่ 2.5 สมบัติของอะลูมิเนียมออกไซด์

สูตรทางเคมี	$\text{Al}_2\text{O}_3$
ลักษณะ	ของแข็ง
สี	ขาว
มวลโมเลกุล	101.96 g/mol
จุดหลอมเหลว	2053 °C
จุดเดือด	3000 °C
รัศมีไอออน $\text{Al}^{3+}$	53 pm

เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีค่าความแข็งสูง ความหนาแน่นสูง ความต้านทานต่อการขีดสีและสึกกร่อนสูง ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดีและมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเซรามิก และอื่น ๆ ซึ่งแนวโน้มในการนำ อะลูมินาไปใช้งานได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อุตสาหกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าเอาอะลูมิเนียมออกไซด์ไปพัฒนาใช้คืออุตสาหกรรมเซรามิก ทั้งเซรามิกดั้งเดิมที่ใช้วัตถุดิบในธรรมชาติซึ่งมีอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบและเซรามิกสมัยใหม่ โดยสามารถนำอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภท เช่น อุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้าและอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น

### 2.5 การเจือ (Doping)

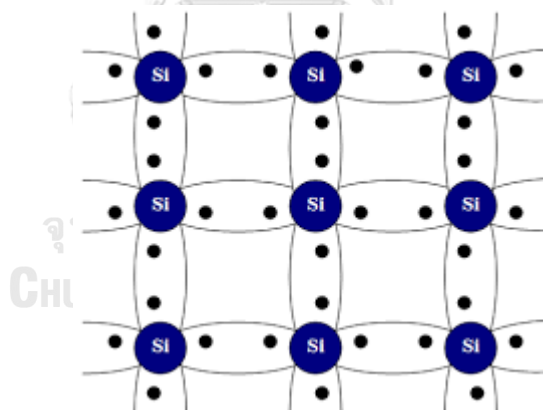
การเติมสารหรือการเจือธาตุลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) เรียกว่าการเจือหรือการโด๊ป ซึ่งสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์เมื่อผ่านการเจือปนแล้วจะถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำเจือปนหรือสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) สารที่นำมาเจือสามารถทำหน้าที่เป็นผู้ให้ (Donor) หรือผู้รับ (Acceptor) เมื่อทำการเจือจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นไปยังแถบนำได้ง่ายขึ้นจากการเจือสารผู้ให้ที่เป็นธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนสูงกว่าลงไปในสารกึ่งตัวนำ การนำไฟฟ้าจึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของ



ประจุลบ สารกึ่งตัวนำที่เจือปนแบบนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ในทางกลับกันสารกึ่งตัวนำที่เจือด้วยธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนน้อยกว่าลงไป สารกึ่งตัวนำ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือปนแบบนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ซึ่งการเจือแบบนี้จะทำให้เกิดโฮลขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของแถบช่องว่างที่ใกล้กับเวเลนซ์อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นไปโฮลที่เกิดจากสารเจือ การนำไฟฟ้าจึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของโฮลในแถบเวเลนซ์

### 2.5.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

ในสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีสารเจือปน (Dopants) และ ความพร่อง (Defects) ใด ๆ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำอินทรินสิค (Intrinsic semiconductors) ที่อุณหภูมิต่ำมากอิเล็กตรอนจะอยู่ในแถบเวเลนซ์ทั้งหมด ส่วนในแถบการนำจะเป็นที่ว่าง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความร้อนจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์เคลื่อนที่ ขึ้นไปยังแถบการนำได้ ทำให้เกิดไอออนบวกหรือโฮลในแถบเวเลนซ์ เรียกว่าเกิดคู่อิเล็กตรอน โฮล ธาตุกึ่งตัวนำที่นิยมอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ทำเป็นสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น ซิลิกอน (Si) และเจอร์เมเนียม (Ge) ดังรูป



รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์<sup>[2]</sup>

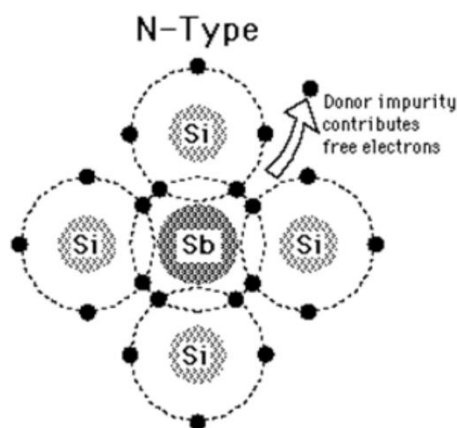
### 2.5.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันดี คือ ซิลิกอน และ เจอร์มาเนียม ซึ่งเป็นธาตุกลุ่ม IV เมื่อมีการเจือด้วยธาตุ กลุ่ม III หรือ กลุ่ม V จะทำให้ประจุพาหะแตกต่างไปจากกรณีสารกึ่งตัวนำอินทรินสิค ซึ่งการเจือจะทำให้ประจุพาหะหลักเป็นอิเล็กตรอนอย่างเดียว หรืออาจเป็นโฮลอย่างเดียว เช่น การเจือซิลิกอนด้วยฟอสฟอรัส หรืออาร์เซนิก ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ V จะทำให้พันธะโควาเลนซ์เกิด

อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีพันธะและสามารถเคลื่อนที่ในผลึกสารกึ่งตัวนำคล้ายอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ เรียกว่าสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิค (Extrinsic semiconductors) ชนิดเอ็น (n-type) ทำนองเดียวกัน ถ้ามีการเจือด้วยธาตุกลุ่ม III เช่น โบรอน (Boron; B) หรือ อินเดียม (Indium; In) ในพันธะโควาเลนต์ของซิลิกอน ตำแหน่งของสารเจือจะเกิดแขนที่ว่าง เรียกว่าโฮล (hole) เรียกว่าสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิคชนิดพี (p-type)

### 2.5.2.1 สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (n-type semiconductor)

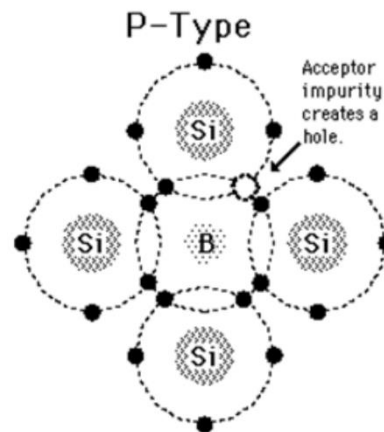
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการเติมสารเจือปนที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวของธาตุหมู่ VI เช่น ฟอสฟอรัส (P), อาร์เซนิก (As) หรือแอนติโมนี (Sb) ลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ทำให้เกิดเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่ไม่มีพันธะขึ้นเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอจะทำให้กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจึงมีสภาพนำไฟฟ้าได้เป็นลบ (Negative) เนื่องจากมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมาก



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างสารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น<sup>[3]</sup>

### 2.5.2.1 สารกึ่งตัวนำประเภทพี (p-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการเติมสารเจือปนที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวของธาตุหมู่ III เช่น โบรอน (B), อินเดียม (In) หรือแกลเลียม (Ga) ลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เมื่ออะตอมของสารเจือที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว มีพันธะโควาเลนต์กับอะตอมที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ทำให้เกิดโฮลอิสระขึ้น 1 ตัว ทำให้เกิดเป็นช่องว่างขึ้นในโครงสร้าง ทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวกตามรูปที่ 2.4



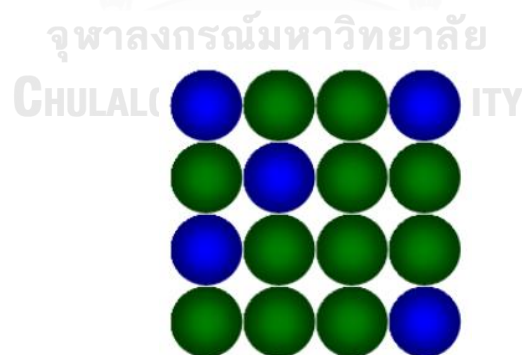
รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างสารกึ่งตัวนำประเภทพี<sup>[3]</sup>

### 2.5.3 ผลกระทบของการเจือในไททาเนียมไดออกไซด์

ผลของการเจือสารในไททาเนียมไดออกไซด์จะทำให้ในไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือนั้นมีสมบัติที่แตกต่างไป เนื่องจากสารที่ใช้เจือแต่ละชนิดนั้นมีสมบัติและลักษณะที่เฉพาะตัวแตกต่างกัน เช่น โครงสร้างของผลึก, ขนาดของอะตอม, ขนาดของไอออน หรือ เวเลนซ์อิเล็กตรอน โดยที่สารเจือสามารถเข้าไปอยู่ในแลตทิซของไททาเนียมไดออกไซด์ได้ 2 ลักษณะ

#### 2.5.3.1 การเจือแบบเข้าไปแทนที่ (Substitute solid solution)

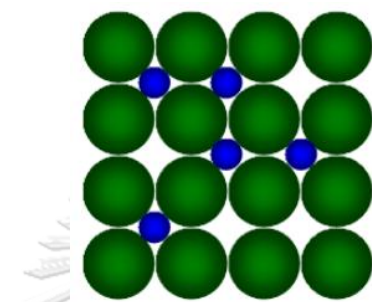
อะตอมของสารเจือจะเข้าไปอยู่ในแลตทิซโดยจะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมภายในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการเจือแบบเข้าไปแทนที่<sup>[4]</sup>

### 2.5.3.2 การเจือแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution)

อะตอมของสารเจือจะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำโดยที่ไม่ได้เข้าไปแทนที่ของอะตอม กล่าวคืออะตอมหรือไอออนของสารเจือนั้นจะต้องมีขนาดเล็กพอเพื่อที่จะเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างที่ว่างของอะตอมของสารกึ่งตัวนำ ทำให้โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำนั้นไม่เกิดการผิดรูปหรือถูกทำลายไป การเจือสารในลักษณะนี้สามารถได้ในปริมาณที่น้อยมากๆ



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการเจือแบบแทรกตัว<sup>[4]</sup>

ในปัจจุบันไททาเนียมไดออกไซด์นั้นเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความเสถียรทางเคมี, ราคาถูกและเมื่อเจือธาตุหมู่ 3 และ หมู่ 5 ในไททาเนียมไดออกไซด์พบว่าสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติทางไดอิเล็กทริก (Dielectric) เพื่อให้ตรงตามความต้องการต่อการใช้งานได้ด้วยวิธีการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

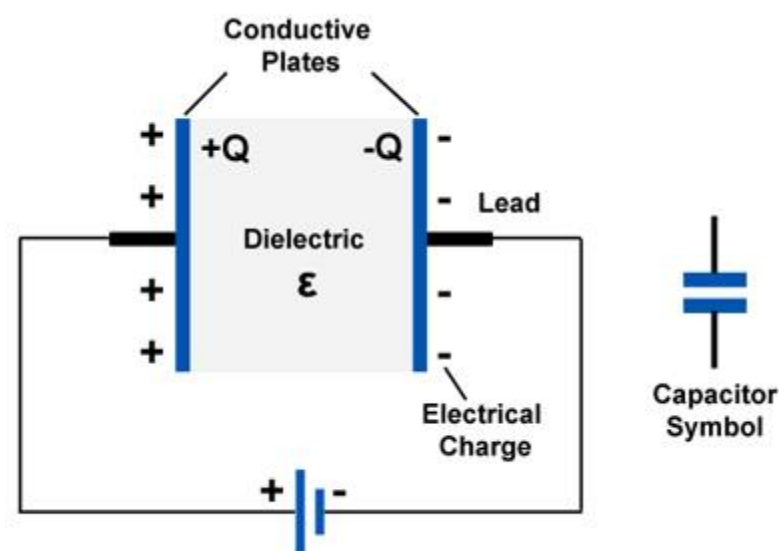
## 2.6 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ทำหน้าที่เก็บพลังงานในสนามไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นระหว่างคู่ขนาน โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน แต่มีชนิดของประจุตรงข้ามกัน เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในงานอิเล็กทรอนิกส์ เป็นวัสดุที่พบได้ในวงจรไฟฟ้า

### 2.6.1 หลักการเบื้องต้นของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ตัวอย่างเช่น วงจรกรองกระแส (Filter) วงจรผ่านสัญญาณ (by-pass) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) เป็นต้น

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้โดยนำสารตัวนำ 2 ชิ้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ๆ กัน แต่ไม่ได้ต่อกันระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งไดอิเล็กทริกนี้อาจจะเป็นอากาศ ไม้ พลาสติก เซรามิกหรือสารที่มีเป็นฉนวนทางไฟฟ้าอื่น ๆ เป็นต้น ความจุทางไฟฟ้าเกิดจากการป้อนแรงเคลื่อนให้กับขั้วทั้งสองของจุดที่ต่อใช้งานของสารตัวนำซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสารตัวนำที่เป็นแผ่นเพลท จะทำให้เกิดค่าความจุทางไฟฟ้าขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่าการเก็บประจุ (Charge) เมื่อต้องการนำไปใช้งานเรียกว่าการคายประจุ (Discharge) ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นเพลทมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ส่วนค่าความจุทางไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างตัวเก็บประจุเมื่อต่อกับวงจรไฟฟ้ากระแสตรง<sup>[5]</sup>

### 2.6.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุมีอยู่ 3 ประการคือ

1. พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นแผ่นที่ใช้ประกบวัสดุไดอิเล็กทริก เขียนแทนด้วย  $A$  ถ้าพื้นที่หน้าตัดมากแสดงว่าสามารถเก็บประจุได้มาก ถ้าพื้นที่หน้าตัดน้อยแสดงว่าเก็บประจุน้อย

2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง เขียนแทนด้วย  $d$  ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กัน ความจุจะมีค่ามาก แต่ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ไกลกันความจุจะมีค่าน้อย

3. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\epsilon$  เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการเก็บประจุเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นตัวนำ ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกแต่ละตัวจะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกต่างกันถึงแม้จะมีขนาดเท่ากัน ค่าความจุและอัตราทนแรงดันไฟฟ้าอาจแตกต่างกันออกไป ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแปรผันตรงกับค่าการเก็บประจุ

### 2.6.3 ชนิดของตัวเก็บประจุ

เราสามารถแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุตามลักษณะทางโครงสร้างหรือตามสารที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กทริก เพื่อเป็นตัวกำหนดค่าตัวเก็บประจุตัวนั้น ๆ ว่าจะนำไปใช้งานในลักษณะใด แบ่งตัวเก็บประจุได้เป็น 3 แบบ

1. คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติจะมีรูปลักษณะเป็นวงกลมหรือเป็นทรงกระบอก แผ่นตัวนำมักใช้โลหะและมีไดอิเล็กทริกประเภท ไมก้า เซรามิก อิเล็กโตรไลติกคั่นกลาง เป็นต้น การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กทริกที่ใช้ ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte Capacitor) เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ค่าความจุสูง มีขั้วบวกลบ โครงสร้างภายในเหมือนกับแบตเตอรี่ นิยมใช้กับที่ความถี่ต่ำหรือใช้สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง มีข้อเสียคือกระแสรั่วไหลและความผิดพลาดสูงมาก



รูปที่ 2.8 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลต์<sup>[6]</sup>

ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโตรไลต์ (Tantalum Electrolyte Capacitor) นิยมใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความผิดพลาดน้อยใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นตัวนำทำมาจากแทนทาลัมและแทนทาลัมเปอร์ออกไซด์อีกแผ่น



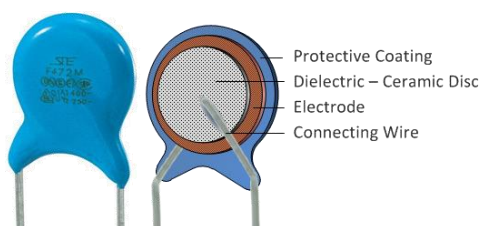
รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์<sup>[7]</sup>

ตัวเก็บประจุชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Capacitor) ใช้ในวงจรภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องขยายเสียง เป็นตัวเก็บประจุจำพวกเดียวกับชนิดตัวเก็บประจุอิเล็กโทรไลต์ แต่ไม่มีขั้วบวกและลบ



รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุชนิดไบโพลาร์<sup>[8]</sup>

ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้เซรามิกมาทำเป็นแผ่นไดอิเล็กทริก โดยทั่วไปมีลักษณะกลมแบน บางครั้งอาจพบแบบสี่เหลี่ยมแบน นิยมใช้กันทั่วไป เพราะมีราคาถูก เหมาะสำหรับวงจรประเภทคัปปลิ่งความถี่วิทยุ ส่วนใหญ่ตัวเก็บประจุชนิดนี้ มีค่าน้อยกว่า 1 พิโกฟารัด (pF) เป็นชนิดที่ไม่มีขั้วและสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 50 ถึง 100 โวลต์ แต่มีข้อเสียคือมีการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูง



รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก<sup>[9]</sup>

2. ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor) คือตัวเก็บประจุที่มีตัวถังเดียว แต่สามารถเลือกใช้งานตามค่าการเก็บประจุมากกว่าหนึ่งค่าได้



รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้<sup>[10]</sup>

3. ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน โครงสร้างภายในประกอบด้วย แผ่นโลหะ 2 แผ่นหรือมากกว่าวางใกล้กัน แผ่นหนึ่งจะอยู่กับที่ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้ ไดอิเล็กทริกที่ใช้มีหลายชนิดด้วยกันคือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้อีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดีคือทริมเมอร์และแพดเดอร์ โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางขนานกัน ปรับค่าความจุ โดยใช้ไขควงหมุนสลักตรงกลางค่าที่ปรับจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 พิโกฟารัด (pF) ถึง 20 พิโกฟารัด (pF) การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบนี้ว่าทริมเมอร์หรือแพดเดอร์นั้นขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปต่อในลักษณะใด ถ้านำไปต่อขนานกับตัวเก็บประจุตัวอื่นจะเรียกว่า ทริมเมอร์ แต่ถ้านำไปต่ออนุกรมจะเรียกว่า แพดเดอร์

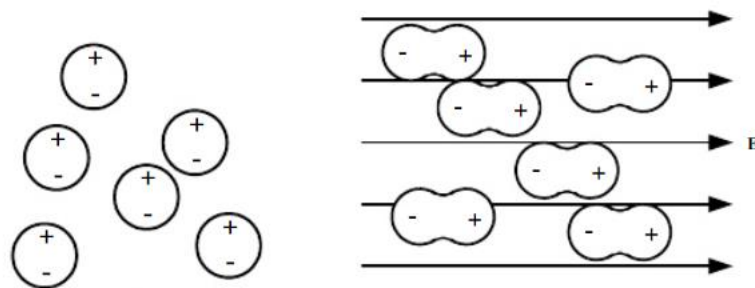


รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้<sup>[11]</sup>



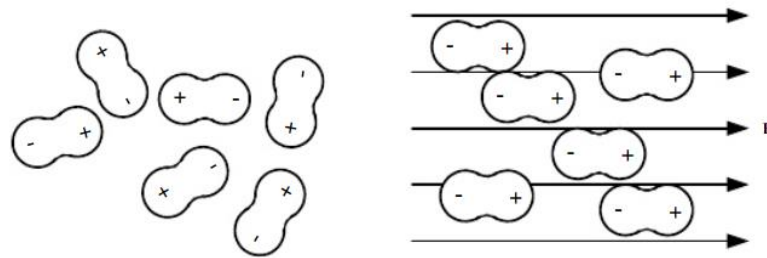
## 2.7 ไดอิเล็กทริก (Dielectric)

ไดอิเล็กทริก (dielectric) มีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับตัวนำ สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลมีขั้วคู่ของวัสดุไดอิเล็กทริกรวมตัวกันเป็นขั้ว และสามารถจัดเรียงตัวได้ภายใต้สนามไฟฟ้า เรียกว่าโพลาไรเซชัน (Polarization) วัสดุหรือสารทุกชนิดล้วนประกอบด้วยโมเลกุลที่มีกลุ่มโปรตอนและกลุ่มอิเล็กตรอนโดยถูกแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมยึดไว้ที่จุดศูนย์กลางมวล<sup>[13]</sup> เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ากระทำต่อวัสดุ จะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศของสนามไฟฟ้า และกลุ่มประจุลบจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศตรงข้ามของสนามไฟฟ้า ทำให้ทุกโมเลกุลภายในวัสดุรวมตัวเป็นโมเลกุลที่มีขั้วคู่ (Dipole moment) ซึ่งเป็นขั้วเล็ก ๆ จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบไปในทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้า วัสดุไดอิเล็กทริกถูกจำแนกตามการจัดเรียงขั้วได้ 2 แบบ คือ วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule)



รูปที่ 2.14 วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโมเลกุลไม่มีขั้ว รูปซ้ายขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า รูปขวา ขณะได้รับสนามไฟฟ้า<sup>[12]</sup>

วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโมเลกุลมีขั้วคู่ไฟฟ้า (Dielectric dipolar) ซึ่งตอนที่ยังไม่ได้รับแรงจากสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางเรียงตัวกันของขั้วคู่ไฟฟ้าที่ไม่เป็นระเบียบ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะทำให้ขั้วคู่จัดเรียงทิศอย่างเป็นระเบียบและจัดเรียงตัวถาวรเรียกโมเลกุลชนิดนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (Permanent dipole)



รูปที่ 2.15 วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโมเมนต์ขั้วคู่ รูปซ้าย ขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า รูปขวา ขณะได้รับสนามไฟฟ้า<sup>[12]</sup>

วัสดุไดอิเล็กทริกทั้งแบบที่มีขั้วและที่ไม่มีขั้วเวลาได้รับสนามไฟฟ้าจะทำให้ขั้วคู่จัดเรียงทิศทางอย่างเป็นระเบียบเหมือนกัน

มีการกำหนดสมการเพื่อหาจำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของวัสดุไดอิเล็กทริกเมื่อเกิดการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization) ภายใต้สนามไฟฟ้าหรือเกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบโดยมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ต่อหน่วยปริมาตร ดังนี้

$$P = Np \quad 2.1$$

เมื่อ  $N$  คือ โมเมนต์ขั้วคู่ของวัสดุไดอิเล็กทริกต่อหน่วยปริมาตร

$p$  คือ ขั้วคู่ในแต่ละโมเมนต์

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดการโพลาไรเซชันจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง โพลาไรเซชัน  $P$  ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า  $D$  ความเข้มสนามไฟฟ้า  $E$  และ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ  $\epsilon_0$  ตามสมการ 2.2

$$D = \epsilon_0 E + P \quad 2.2$$

เมื่อ  $D$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์

$E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m)

วัสดุที่มีคุณสมบัติสมมาตรเหมือนกัน (Isotropic material) การเกิดโพลาไรเซชันจะขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้าทุกจุดโดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ 2.3

$$P = \chi \epsilon_0 E \quad 2.3$$

เมื่อ  $\chi$  คือ ความว่องไวหรือความซึมซาบทางไฟฟ้า (Electric susceptibility)

ที่สุญญากาศไม่มีการเกิดการโพลาไรเซชันดังนั้น ( $P = 0$ ) เพราะฉะนั้น  $\chi$  จึงมีค่าเป็นศูนย์ ค่า  $D$  จึงมีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอก เมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกเป็น  $E_0$  จะดังสมการได้สมการ 2.4

$$D = \epsilon_0 E_0 \quad 2.4$$

จาก สมการที่ 2.2 2.3 และ 2.4 จะได้ดังนี้

$$D = \epsilon_0 E_0 + \chi \epsilon_0 E \quad 2.5$$

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi) E \quad 2.6$$

เมื่อ  $\epsilon_r \equiv (1 + \chi)$  ซึ่ง  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์

ดังนั้น

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad 2.7$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m)

$\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หรือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุ

วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนไว้สำหรับคั่นระหว่างแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นค่าคงที่ของตัวเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกที่เพิ่มเป็นกึ่งเท่าของตัวเก็บประจุอากาศดังสมการนี้

$$C = \epsilon C_0 \quad 2.8$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าความจุตัวเก็บประจุสุญญากาศ

$C_0$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงค่าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ  $\epsilon_0$  คือ ดังสมการนี้คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad 2.9$$

จากสมการของ  $C = \frac{Q}{V}$  ในตัวเก็บประจุสุญญากาศ จะได้

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad 2.10$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ

d คือ ความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริกที่นำมาชั้นตรงกลางระหว่างแผ่นตัวนำ

ในตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกจะได้เป็น

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad 2.11$$

### 2.7.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุไดอิเล็กทริก

1) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) หรือ (Dielectric permittivity) ถือเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ยิ่งวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงจะมีค่าความจุของตัวเก็บประจุสูง สมการที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก  $\epsilon_r$  ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุ กล่าวคือทุกวัสดุจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจำเพาะเจาะจงแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งถ้าวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้มาก จึงสามารถสร้างตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กลงและมีค่าความจุที่เพิ่มขึ้น หรือ เพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุโดยที่ขนาดของตัวเก็บประจุคงเดิม

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของออกไซด์บริสุทธิ์

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	อ้างอิง
ซิลิคอนไดออกไซด์ $\text{SiO}_2$	3.9	[14]
อะลูมิเนียมออกไซด์ $\text{Al}_2\text{O}_3$	8.5	[15]
ซิลิคอนไนไตรต์ $\text{Si}_3\text{N}_4$	6.2	[16]
ฮาฟเนียมออกไซด์ $\text{HfO}_2$	22	[15]
แมกนีเซียมออกไซด์ $\text{MgO}$	9.8	[15]
เซอร์โคเนียมออกไซด์ $\text{ZrO}_2$	25	[15]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ $\text{TiO}_2$	80-100	[15]
แทนทาลัมเพนตอกไซด์ $\text{Ta}_2\text{O}_5$	26	[15]

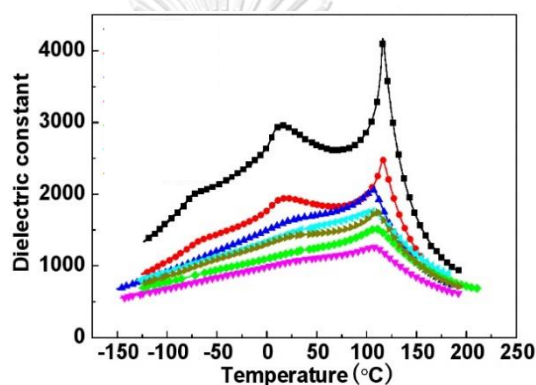
2) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณที่สูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน จากการเคลื่อนที่ของประจุของตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้า กระแสสลับกล่าวคือ เมื่อที่ความถี่สูง ไดโพลกลับทิศไม่ทัน จึงไม่สามารถกลับทิศได้ แต่ยังได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่ พลังงานที่ได้รับเกิดการสะสมขึ้นเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ซึ่งค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเป็นค่าจำเพาะของแต่ละวัสดุ

3) ค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริก (Dielectric breakdown strength) เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกได้รับความต่างศักย์ที่สูงๆ จะทำให้ความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าลดลงหรือกลายเป็นตัวนำทางไฟฟ้าซึ่งค่าการต้านทานไฟฟ้าทางไดอิเล็กทริกเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุยังคงรักษาสภาพความเป็นฉนวนไว้ได้ โดยมีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร kV/mm

### 2.7.3 ไดอิเล็กทริกเซรามิก (Dielectric ceramic)

วัสดุไดอิเล็กทริกประเภทเซรามิกสามารถเกิดโพลาไรเซชัน นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในวงจรไฟฟ้าเป็นตัวเก็บประจุ สมบัติที่ต้องคำนึงถึงในการนำวัสดุไดอิเล็กทริกประเภทเซรามิก คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ค่าการสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical loss) ค่าความเสถียรของความถี่ (Frequency stability) ค่าความเสถียรของอุณหภูมิ (Temperature stability) และ ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) จากตารางที่ 2.6 พบว่าวัสดุไดอิเล็กทริกประเภทเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่โดดเด่นในหมู่ไดออกไซด์บริสุทธิ์ จึงมีการศึกษาค้นคว้าการพัฒนาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือธาตุ เช่น อะลูมิเนียม (Aluminium)<sup>[17]</sup> โครเมียม (Chromium)<sup>[17]</sup> นิกเกิล (Nickel)<sup>[17]</sup> วาเนเดียม (Vanadium)<sup>[18]</sup> ไนโอเบียม Niobium<sup>[18]</sup> และ แทนทาลัม Tantalum<sup>[18]</sup> เป็นต้น รวมถึงการสังเคราะห์ธาตุใหม่ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างจากไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นมาคือ แบเรียมไททาเนต (Barium titanate:  $\text{BaTiO}_3$ )<sup>[19]</sup> เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในนามวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) มีการค้นพบมาแล้วมากกว่า 60 ปีที่ผ่านมา โดยแบเรียมไททาเนตนั้นเป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

(Ferroelectric) จะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยโครงสร้างของสาร  $\text{BaTiO}_3$  ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอุณหภูมิคูรี 120 องศาเซลเซียส ( $T_c$ ) ลงมานั้น จะเกิดการบิดเบี้ยวไปเป็นเฟสเตตระโกนอล โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน c จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาถึงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส จึงเปลี่ยนจากเฟสเตตระโกนอล ไปเป็นเฟสอโรโธมบิก และที่อุณหภูมิต่ำกว่า -90 องศาเซลเซียส ก็จะเปลี่ยนจากเฟสอโรโธมบิก ไปเป็นเฟสโรมโบฮีดรอล ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสาร  $\text{BaTiO}_3$  ตามอุณหภูมิดังที่กล่าวมานี้จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าที่มีขั้วในตัวเอง (Spontaneous polarization) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ได้แสดงดังรูปที่ 2.16<sup>[20]</sup>



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของแบเรียมไททาเนต (Barium titanate:  $\text{BaTiO}_3$ )<sup>[13]</sup>

จากรูปที่ 2.16 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แสดงค่าสูงสุดมีเพียงช่วงอุณหภูมิแคบประมาณ 120 องศาเซลเซียสถือว่ามีช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุแคบ ต่อมาในปัจจุบันพบว่า การเจือธาตุหนึ่งธาตุขึ้นไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้สมบัติทางไดอิเล็กทริกพัฒนาได้เป็นอย่างมาก<sup>[21]</sup>

ตารางที่ 2.7 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ถูกเจือด้วยธาตุ 2 ชนิดพร้อมกัน ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 kHz

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	อ้างอิง
$(\text{Ga}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})_{0.005}\text{Ti}_{0.995}\text{O}_2$	$10^4$ - $10^5$	0.05-0.1	[22]
$(\text{In}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})_{0.005}\text{Ti}_{0.995}\text{O}_2$	$> 10^4$	$< 0.02$	[23]
$(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.01}\text{Ti}_{0.99}\text{O}_2$	38,700	0.0083	[24]
$(\text{Ta}_{0.5}\text{Sm}_{0.5})_{0.02}\text{Ti}_{0.98}\text{O}_2$	23,000	0.11	[25]
$(\text{Ga}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})_{0.025}\text{Ti}_{0.975}\text{O}_2$	5500-35,000	0.017-0.079	[26]
$(\text{Bi}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})_{0.005}\text{Ti}_{0.995}\text{O}_2$	23,000	0.535	[27]
$(\text{Sc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_2$	1,000-10,000	0.016-0.035	[28]
$\text{Al}_{0.03}\text{Nb}_{0.03}\text{Ti}_{0.97}\text{O}_2$	40,000	0.1	[29]
$(\text{In}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})_{0.01}\text{Ti}_{0.99}\text{O}_2$	10,000	0.01	[30]
$(\text{In}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})_{0.015}\text{Ti}_{0.985}\text{O}_2$	42,376	0.06	[31]

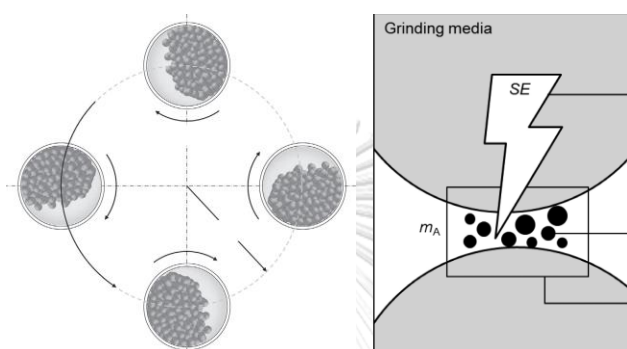
## 2.8 กระบวนการเตรียมเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction)

การเตรียมเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมี ของวัสดุที่ผลิตขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติ ตามที่ต้องการและสามารถนำมาใช้งานได้มีประสิทธิภาพ การเตรียมเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์มีวิธีสังเคราะห์หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากคือการสังเคราะห์เซรามิกจากการใช้ผง (Powder) เป็นวัตถุดิบ โดยคุณภาพของผงวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของเซรามิกที่ได้จากการสังเคราะห์

ในการสังเคราะห์ผงเซรามิกนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) โซล-เจล (Sol-gel) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) การทำให้แห้งแบบละออง (Spray-drying) และการทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze drying) ซึ่งการเลือกวิธีการสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารตั้งต้น และ ลักษณะของเซรามิกที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเตรียมโดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เพราะว่าเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถเตรียมขึ้นงานได้จำนวนมาก

### 2.8.1 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอลความเร็วสูง (Planetary ball-milling)

กระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอลความเร็วสูง<sup>[32]</sup> คือ การบดผงของสารตั้งต้นให้มีขนาดอนุภาคเล็กกลงและละเอียดมาก (Pulverization) ในระหว่างบดผงของสารตั้งต้นจะมีการผสมผสานกันกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอในหม้อบด โดยใช้หลักการหมุนของหม้อบดหมุนทิศตรงข้ามกับฐานเครื่องบดความเร็วสูงเพื่อให้ได้การบดมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีลูกบด (Grinding Media) และสารที่ช่วยในการหล่อลื่นอยู่ภายในช่วยในการบดดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แบบจำลองกระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอลความเร็วสูง<sup>[14]</sup>

ก่อนทำการบดต้องศึกษาชนิดของหม้อบด และ ลูกบด เนื่องจากถ้านำสารตั้งต้นที่มีค่าความแข็ง (Hardness) มากกว่าหม้อบดและลูกบด มาใช้งานจะทำให้เกิดความเสียหายได้ รวมถึงการปรับความเร็วในการบดเพราะใช้ความเร็วที่สูงทำให้เวลาบดเกิดพลังงานจลน์เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนได้ ซึ่งถ้าใช้ความเร็วสูงจะทำให้ผงวัสดุที่นำมาบดได้รับความร้อนด้วยเช่นกัน การบดทำให้อนุภาคของผงมีขนาดลดลงเพื่อที่จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างการเผาของวัสดุบดเร็วและสมบูรณ์ขึ้น เพื่อให้ได้คุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรงหลังการเผา เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และ สมบัติทางไฟฟ้า

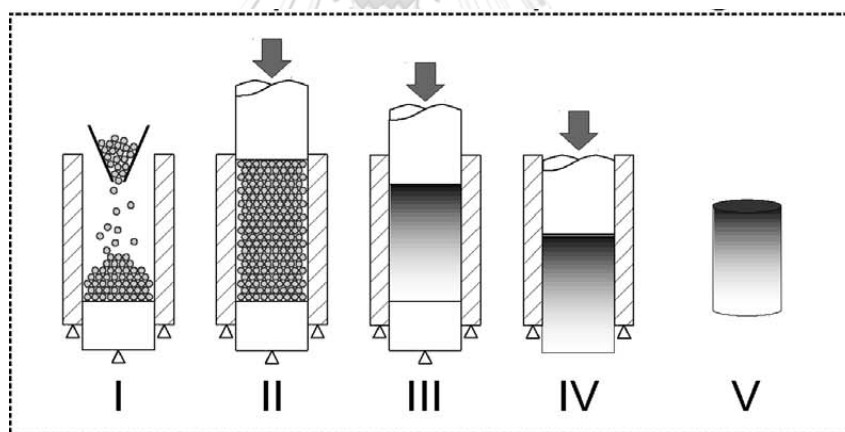
### 2.8.2 การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว (Uniaxial pressing)

การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวคือกระบวนการที่ใช้แรงอัดในทิศทางเดียวกัน เป็นการขึ้นรูปที่ง่าย และมีอัตราการผลิตสูงเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและไม่ซับซ้อน<sup>[33]</sup> เช่น วัสดุทนไฟ กระเบื้อง เซรามิกอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยการอัดเม็ดต้องใช้ผงที่มีความละเอียดและสม่ำเสมอเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดจุดบกพร่อง (Defect) หรือรอยแตกร้าว (Crack) หลังจากอัดขึ้นงาน การอัดแกนเดียวใช้ความดันในทิศทางตามแนวแกนเดียวผ่านกระบอกลูกสูบ แบ่งเป็น 2 แบบ คือการอัด



ขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวแบบแห้ง โดยที่ผงสเปร์ยแบบแห้ง ที่มีความชื้น 0-4 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสำหรับการทำงานอัตโนมัติได้ง่าย มีความคลาดเคลื่อนที่น้อย และการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวแบบเปียกมีความชื้น 10-15 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสำหรับการทำงานโดยไม่ใช้เครื่อง มีความคลาดเคลื่อนที่มาก การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.18

1. ใส่ผงวัสดุที่ต้องการอัดเม็ดลงในเครื่องอัดขึ้นรูป
2. นำหัวไดรวางไว้ด้านบนของเครื่อง
3. ทำการอัด โดยให้แรงไฮดรอลิกแล้วหัวไดจะทำการกดอัดผงตัวอย่าง
4. นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดแล้วออกมาจากเครื่อง
5. จะได้เม็ดเซรามิกที่ผ่านการมาอัดแล้วมีลักษณะทรงกระบอก



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว<sup>[15]</sup>

### 2.8.3 กระบวนการเผาผนึก (Sintering)

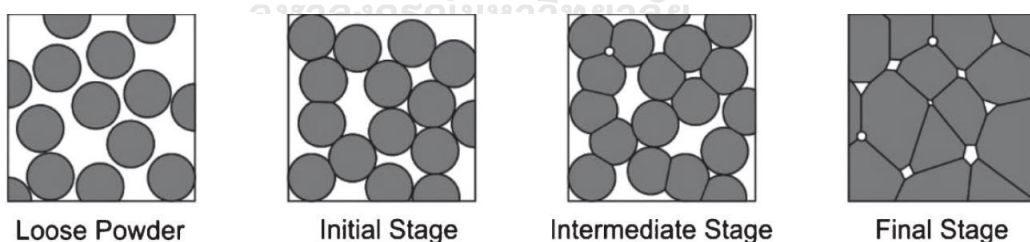
วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้ในการเตรียมผงของพวกสารประกอบออกไซด์อย่างง่าย เป็นวิธีการที่จะอาศัยการเกิดการสลายตัว หรือทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกัน ที่มีสถานะเป็นของแข็งโดยอาศัยการแพร่ระหว่างไอออน ทำให้สารเจือ (Dopants) สามารถแพร่เข้าไปในวัสดุหลักได้ (Host material) ด้วยกระบวนการทางความร้อนทำให้อณูภาค เกิดการสร้างพันธะกันอย่างสมดุล โดยมีโครงสร้างหลักเป็นของแข็ง เป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวลในระดับ

อะตอม อนุภาคของของแข็งรวมทั้งช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวออกไปของวัสดุประสาน ภายหลังการเผาไล่ตัวประสานเกิดการเชื่อมติดกัน ทำให้ระบบมีความแข็งแรงสูงขึ้น และมีพลังงานลดลง นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดรูพรุนที่อยู่ในอนุภาคเริ่มต้นได้อีก กระบวนการเผาผนึกนั้น จะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักที่มีความต่อเนื่องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ดังนี้ คือ

1) การเผาผนึกช่วงเริ่มต้น (Initial sintering) เป็นขั้นตอนการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคผงภายในชิ้นงานและการเกิดพันธะที่แข็งแรง หรือที่เรียกว่า คอ (Neck) ขึ้นมาที่ระหว่างจุดสัมผัสผิวด้านหน้าของอนุภาคผง ในขั้นตอนนี้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 50–60% เนื่องจากที่อนุภาคผงมีการแตกตัวกันมากยิ่งขึ้น

2) การเผาผนึกช่วงกลาง (Intermediate sintering) เป็นช่วงที่ขนาดของคอเริ่มโตขึ้น และ ความพรุนในชิ้นงานลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคชิดกันมากขึ้น ทำให้ชิ้นงาน มีการหดตัวอย่าง เป็นมากที่สุดในช่วงนี้ จะเริ่มมีเกรนและขอบเกรนเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานอาจเพิ่มสูงขึ้นถึง 90% ได้

3) การเผาผนึกช่วงสุดท้าย (Final stage sintering) เป็นช่วงที่รูพรุนในชิ้นงานเริ่มปิดตัวลง และค่อยๆ ถูกกำจัดไปจนหมดอย่างช้า ๆ โดยอาศัยการแพร่ของอากาศจากรูพรุนออกมาตามแนวขอบเกรน และหลุดออกไปจากขอบเกรน ขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ ในขั้นตอนนี้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.19 แบบจำลองกระบวนการเผาผนึก<sup>[16]</sup>

## 2.9 การแบ่งระดับชั้นของตัวเก็บประจุเซรามิก

เพื่อความสะดวกในการเลือกตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกเซรามิกเป็นส่วนประกอบมีความจำเป็นต้องใช้การแยกระดับชั้นของวัสดุไดอิเล็กทริกเพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แบ่งออกเป็น 3 ระดับได้แก่

1. ตัวเก็บประจุเซรามิกชั้น 1 ตัวเก็บประจุเซรามิกเหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงสุดในด้านความเสถียรสูง มีความแม่นยำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และอุณหภูมิในการใช้งานที่อุณหภูมิ -55 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่มีการเปลี่ยนแปลง และ ค่าการสูญเสีย ไดอิเล็กทริกต่อน้อยกว่า 0.05 เหมาะสำหรับการใช้วงจรเรโซแนนซ์

2. ตัวเก็บประจุเซรามิกชั้น 2 มีความเสถียรและความแม่นยำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และอุณหภูมิในการใช้น้อยกว่าตัวเก็บประจุเซรามิกชั้น 1 โดยอุณหภูมิในการใช้งานที่อุณหภูมิ -55 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสามารถคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 15% และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่อน้อยกว่า 0.035

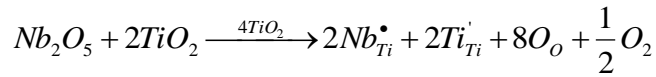
3. ตัวเก็บประจุเซรามิกชั้น 3 มีความเสถียรและความแม่นยำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และอุณหภูมิในการใช้น้อยกว่าตัวเก็บประจุเซรามิกชั้น 2 โดยอุณหภูมิในการใช้งานที่อุณหภูมิ 10 ถึง 55 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสามารถและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 56%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

W. Hu และคณะ<sup>[34]</sup> ได้ทำการศึกษาวัสดุไดอิเล็กทริกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยไนโอเบียม และ อินเดียม ด้วยวิธีการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมากกว่า 10000 และยังมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก 0.05 ซึ่งค่าสมบัติทางไดอิเล็กทริกทั้ง 2 ค่า มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่และอุณหภูมิที่ตีมากเพราะเมื่อทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกพบว่าทั้งค่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก มีความคงที่ที่ความถี่ตั้งแต่ 20–10<sup>6</sup> Hz และที่อุณหภูมิ -193 ถึง 177 องศาเซลเซียส ได้อธิบายการเจือไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ในไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นส่งผลให้เกิดตำหนิขึ้นได้หลายรูปแบบดังแสดงได้โดย Kröger and Vink's notation ดังนี้

การชดเชยด้วยไอออน

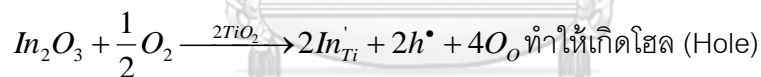
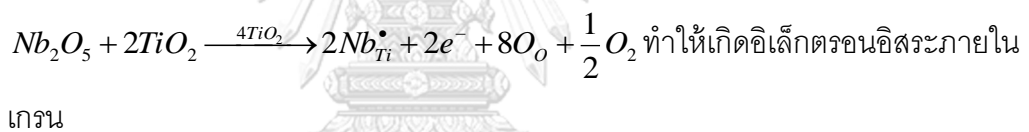


เมื่อ  $Nb^{5+}$  เข้าไปแทนที่  $Ti^{4+}$  ทำให้  $Ti^{4+}$  รั่วอิเล็กตรอนเป็น  $Ti^{3+}$  เพื่อให้ประจุเกิดความสมดุลดังนี้  $Ti^{4+} + e^- \rightarrow Ti^{3+}$

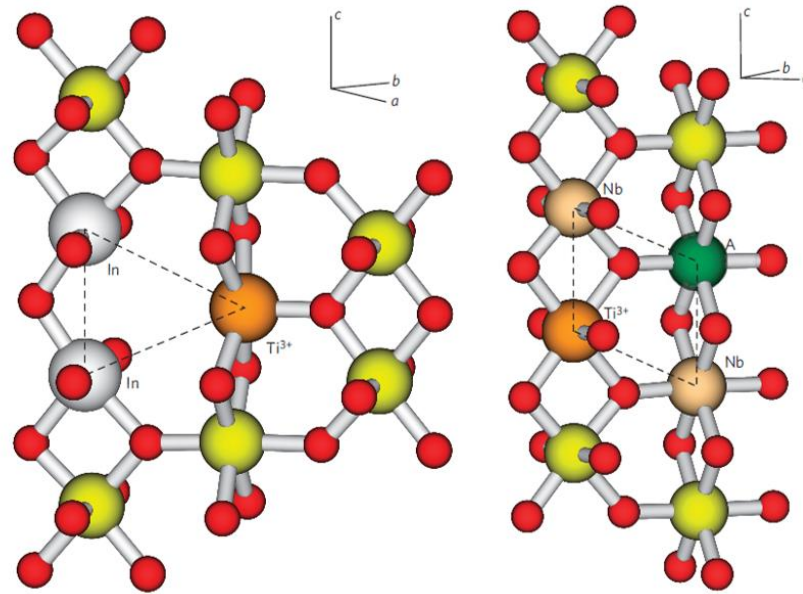
เป็นอีกสาเหตุของการเพิ่มของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเนื่องจากอิเล็กตรอนถูกตรึงไว้ที่ตำแหน่ง  $2Ti_{Ti}'$  [35] ซึ่งอยู่ข้างในเกรน



การชดเชยด้วยอิเล็กตรอน

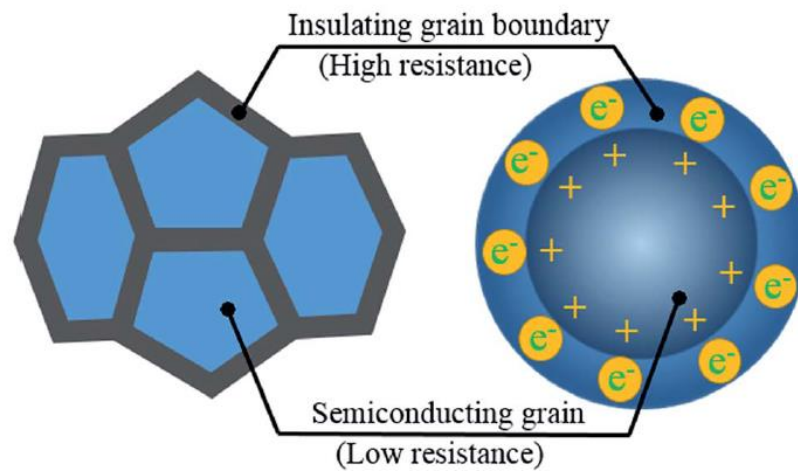


การเจือไนโอเบียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นผู้ให้ (Donor) ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นภายในเกรน และทำให้เกิดตำแหน่ง  $2Ti_{Ti}'$  ส่งผลค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น การเจืออินเดียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นผู้รับ (Acceptor) ทำหน้าที่สมดุลประจุจากการเจือไนโอเบียมออกไซด์ และทำให้เกิดตำแหน่งว่างของออกซิเจนซึ่งมักเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรน ซึ่งตำแหน่งว่างของออกซิเจนสามารถตรึงอิเล็กตรอนอิสระภายในเกรนไม่ให้เคลื่อนที่ทะลุผ่านจากเกรน เป็นผลให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกลดน้อยลง ตำแหน่งที่เกิดขึ้นจะมีโครงสร้างตามพลังงานการจัดเรียงตัวน้อยที่สุด (lowest-energy configuration) ซึ่ง W. Hu และคณะ [34] ได้สร้างแบบจำลองโครงสร้างจากการเจือร่วมระหว่าง ไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ ได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แบบจำลองโครงสร้างตาหนิของอินเดียม (รูปซ้าย) และ ตาหนิไนโอเบียม (รูปขวา) โดยที่  $Ti^{4+}$  (สีเหลือง) O (สีแดง) และ อะตอม A ( $Ti^{3+}$  หรือ  $In^{3+}$ )<sup>[17]</sup>

จากรูปที่ 2.20 โครงสร้างตาหนิของอินเดียมจะเกิดตาหนิของ  $In_2^+V_oTi^{3+}$  ซึ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมตามเส้นประในรูปทางด้านซ้าย โครงสร้างตาหนิของตาหนิไนโอเบียมจะทำให้เกิดตาหนิของ  $Nb_2^+Ti^{3+}A_{Ti}$  โดยที่อะตอม A สามารถเป็น  $Ti^{3+}$  หรือ  $In^{3+}$  ได้ โดยสังเกตได้จากเส้นประรูปเพชรในรูปทางด้านขวา จากตาหนิเส้นประรูปสามเหลี่ยมและรูปเพชรสามารถมีลักษณะการเกิดที่ทับซ้อน และไม่ทับซ้อนกัน ในโครงสร้างส่งผลให้กลุ่มของตาหนิโมเลกุลที่มีขั้วคู่ (defect-dipole) มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนรวมตัวอยู่ในเฉพาะที่ เนื่องจากถูกตรึงด้วยตาหนิ  $2In^{3+} - V_o + 2Ti^{3+}(2e + 2Ti^{4+}) + 2Nb^{5+} + Ti^{4+}$  ซึ่งเป็นที่มาของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ ซึ่งเรียกว่า “electron-pinned defect-dipoles” มักจะเกิดขึ้นในเนื้อเกรน เกิดการโพลาไรเซชันแบบ (Space charge) ที่ขอบเกรน จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกไปนอกเกรน ซึ่งเรียกหลักการนี้ว่า “internal barrier layer capacitance mechanism” ตามรูปที่ 2.21<sup>[36]</sup>



รูปที่ 2.21 แบบจำลอง internal barrier layer capacitance mechanism<sup>[18]</sup>

Z. G. Gai และคณะ<sup>[37]</sup> ได้ศึกษาองค์ประกอบของสารเคมีเพื่อเพิ่มค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกและลดค่าการสูญเสียไดโอิเล็กทริกโดยที่มีย่านอุณหภูมิที่ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกนำมาใช้งานในด้านนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือ มีค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกสูงที่สุดในหมู่ออกไซด์ที่มีธาตุโลหะเพียงธาตุเดียว ราคาถูก หาได้ง่ายและมีความเป็นพิษต่ำ เนื่องจากวัสดุไดโอิเล็กทริกในอุตสาหกรรมมักมีส่วนประกอบของตะกั่วซึ่งทราบกันดีว่าเป็นมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดการรณรงค์ใช้วัสดุปลอดสารตะกั่ว อย่างมากในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามวัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์ มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ยังไม่ดีพอ จึงเกิดการศึกษและพัฒนาการเจือสารเข้าไปในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าว คือ การเจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ ตัวอย่างประสบความสำเร็จในการเตรียมด้วยวิธีการ Pulsed laser deposition (PLD) ที่อุณหภูมิห้องพบว่าได้วัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่าวัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้รับการเจือ

นอกจากนี้ ยังพบงานวิจัยของ Jinglei Li และคณะ<sup>[38]</sup> พบว่า พวกเขาประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์โดยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยศึกษาการเผาผนึก (Sintering) ต่อสมบัติทางไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1400 1450 และ 1500 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลากการเย็นไฟ (soaking time) 4 และ 10 ชั่วโมง พบว่าการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลากการเย็นไฟระหว่าง 4 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง ได้แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือ เมื่อใช้เวลากการเย็นไฟที่ 4 ชั่วโมง ได้ค่าคงที่

ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก คือ 320 และ 0.16 ตามลำดับ ส่วนเวลาการยืนไฟที่ 10 ชั่วโมง ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก คือ 6800 และ 0.49 ตามลำดับ ซึ่งการยืนไฟในระยะเวลาที่นานขึ้นส่งผลดีต่อสมบัติทางไฟฟ้าเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ  $e^-$  และ  $V_o^{**}$  ตามสมการ  $O_o \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + V_o^{**} + 2e^-$  เป็นเหตุให้ค่าคงที่ ไดอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก<sup>[31]</sup> หากเปรียบเทียบการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400, 1450 และ 1500 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลายืนไฟ 10 ชั่วโมงเท่ากัน พบว่าเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าที่ดีขึ้นจาก 6800 และ 0.49 เป็น 65000 และ 0.043 ตามลำดับ และเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง คือ 48000 และ 0.44 โดยค่าดังกล่าวได้จากการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Precision LCR Meter ทดสอบที่อุณหภูมิห้องที่ความถี่ 1 kHz ในการศึกษาเชิงโครงสร้างพบว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดเป็นผลึกวัสดุที่บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิค X-ray diffraction ต่อมาได้มีการนำอะลูมิเนียมออกไซด์เจือแทนที่อินเดียมออกไซด์เนื่องจากเป็นธาตุหมู่เดียวกัน อีกทั้งยังหาได้ง่ายและราคาถูกกว่าอินเดียมออกไซด์ จึงกลายเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในการพัฒนาวัสดุไดอิเล็กทริก สมบัติทางไฟฟ้าของอะลูมิเนียมออกไซด์และไนโอเบียมออกไซด์ 0.005 mol% เจือไนโอเบเนียมไดออกไซด์และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300, 1350, 1400 และ 1500 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างที่เผาด้วยอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงถึง  $10^6$  แต่ได้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงมากกว่า 0.5 ซึ่งยังไม่ดีพอที่จะนำมาใช้งาน

## บทที่ 3

### ขั้นตอนวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ทำการทดลองรวมถึงขั้นตอนการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือไนโอเบียมออกไซด์ ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) อินเดียมออกไซด์ ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในงานวิจัยนี้

ได้ทำการแบ่งตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

**กลุ่มที่ 1** ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือธาตุเดี่ยว  $\text{TiO}_2$  [T],  $\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  [NT],  $\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  [IT],  $\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  [AT] และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ที่มีอัตราส่วนขององค์ประกอบทางเคมีเท่ากัน  $X = 0.01, 0.05, 0.07$  :  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_X(\text{TiO}_2)_{1-X}$  [NIT1], [NIT5], [NIT7]

ตารางที่ 3.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1

ชื่อย่อ	องค์ประกอบ	$\text{Nb}_2\text{O}_5$ mol%	$\text{In}_2\text{O}_3$ mol%	$\text{Al}_2\text{O}_3$ mol%	$\text{TiO}_2$ mol%
T	$\text{TiO}_2$	-	-	-	100
NT	$\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	2.50	-	-	95
IT	$\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	-	2.50	-	95
AT	$\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	-	-	2.50	95
NIT1	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.01}(\text{TiO}_2)_{0.99}$	0.25	0.25	-	99
NIT5	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.25	1.25	-	95
NIT7	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.07}(\text{TiO}_2)_{0.93}$	1.75	1.75	-	93



กลุ่มที่ 2 ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ที่มีอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของอินเดียมขนาด  $X = 0.01, 0.02, 0.03$  :  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  [NIT47], [NIT48], [NIT49] และ อัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของอินเดียมเกิน  $X = 0.01, 0.02, 0.03$  :  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5+x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  [NIT51], [NIT52], [NIT53]

ตารางที่ 3.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2

ชื่อย่อ	องค์ประกอบ	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mol%	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol%	TiO <sub>2</sub> mol%
NIT47	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.47})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.175	-	95
NIT48	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.48})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.200	-	95
NIT49	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.49})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.225	-	95
NIT51	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.51})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.275	-	95
NIT52	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.52})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.205	1.300	-	95
NIT53	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.53})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.325	-	95

กลุ่มที่ 3 ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์  $y = 0.025, 0.050, 0.075$  :  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-y}\text{Al}_y)_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  [NIAT25], [NITA50] และ [NIAT75]

ตารางที่ 3.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3

ชื่อย่อ	องค์ประกอบ	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mol%	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol%	TiO <sub>2</sub> mol%
NIAT25	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.475}\text{Al}_{0.025})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.1875	0.0625	95.0
NIAT50	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.450}\text{Al}_{0.050})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.1250	0.1250	95.0
NIAT75	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.425}\text{Al}_{0.075})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	1.250	1.0625	0.1875	95.0

รวมถึงขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกและการเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปวัดคุณสมบัติต่าง ๆ



- 27)เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส
- 28) เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส
- 29) เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น DMAX 2200/Ultima+
- 30) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV
- 31) เครื่องวัดสมบัติทางไฟฟ้า (Inductance, capacitance, and resistance meter: LCR meter) ผลิตโดยบริษัท Agilent รุ่น E4980A
- 32) เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS) ผลิตโดยบริษัท Kratos analytical รุ่น Axis ultra dld

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ไนโอเบียมออกไซด์ ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) ความบริสุทธิ์ 99.5% ผลิตโดย alfa-aesar ประเทศอิตาลี
- 2) อินเดียมออกไซด์ ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99.99% ผลิตโดย alfa-aesar ประเทศอิตาลี
- 3) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 99.5% ผลิตโดย Sigma-aldrich ประเทศอิตาลี
- 4) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดย Sigma-aldrich ประเทศอิตาลี
- 5) เอทานอล (Ethyl Alcohol) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดย QREc ประเทศนิวซีแลนด์

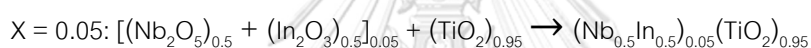
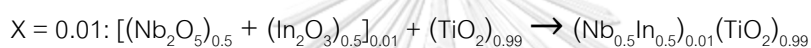
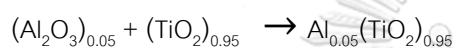
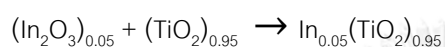
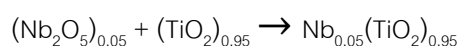
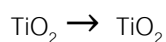


รูปที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

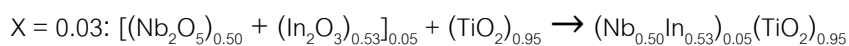
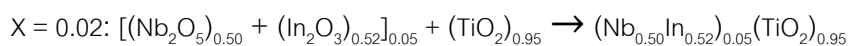
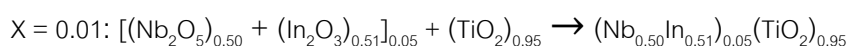
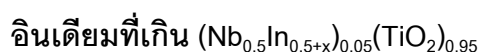
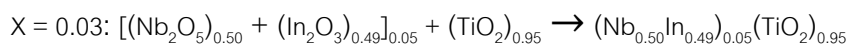
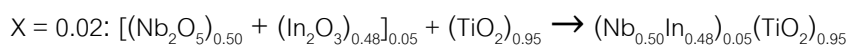
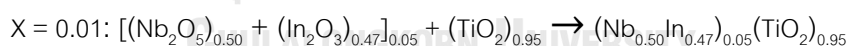
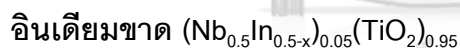
### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state) โดยปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้

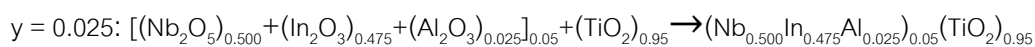
#### กลุ่มที่ 1



#### กลุ่มที่ 2



กลุ่มที่ 3  $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-y}\text{Al}_y)_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$  และ  $(\text{Nb}_{0.5}\text{Al}_{0.5})_{0.005}(\text{TiO}_2)_{0.995}$



- นำสารตัวอย่างที่คำนวณและชั่งน้ำหนักตามองค์ประกอบแล้วใส่ลงในหม้ออบ Zirconia ที่บรรจุลูกบด Zirconia โดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลาง บดผสมที่เครื่องบดความเร็วสูงเป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราเร็ว 300 รอบต่อนาที
- เมื่อบดผสมเสร็จแล้วนำใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร และใช้เอทานอลล้างลูกบดจนสะอาด
- นำไประเหยเอทานอลด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน โดยใช้แมกเนติกบาร์กวนสารในระหว่างการให้ความร้อน นำไปอบในตู้อบสารอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์เสร็จเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นนำผงตัวอย่างอัดขึ้นเม็ดสุดท้ายนำเม็ดที่อัดไปเผาผืนี้

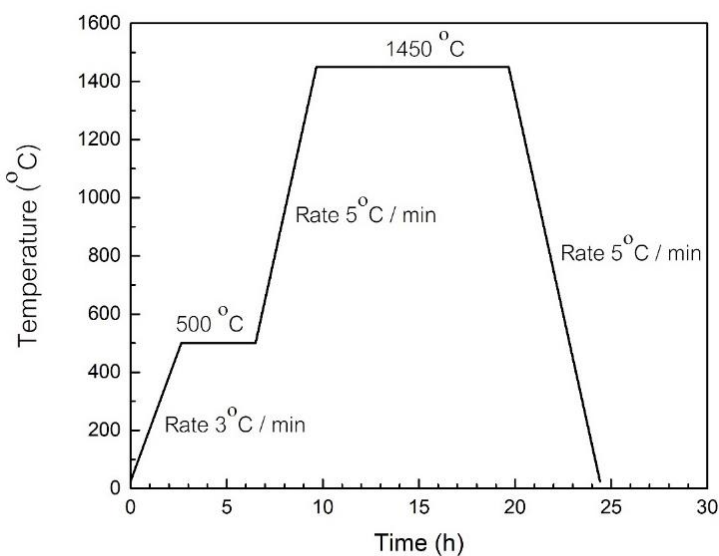
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

- เตรียมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเพื่อใช้เป็นตัวประสาน (Binder) ในการอัดขึ้นรูปเม็ดเซรามิกโดย ชั่ง PVA 2 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร หลังจากนั้นใส่น้ำกลั่น 98 มิลลิลิตร
- ใช้แท่งแม่เหล็กปั่นกวนสารนำบีกเกอร์ไปให้ความร้อนจนสารละลายใส

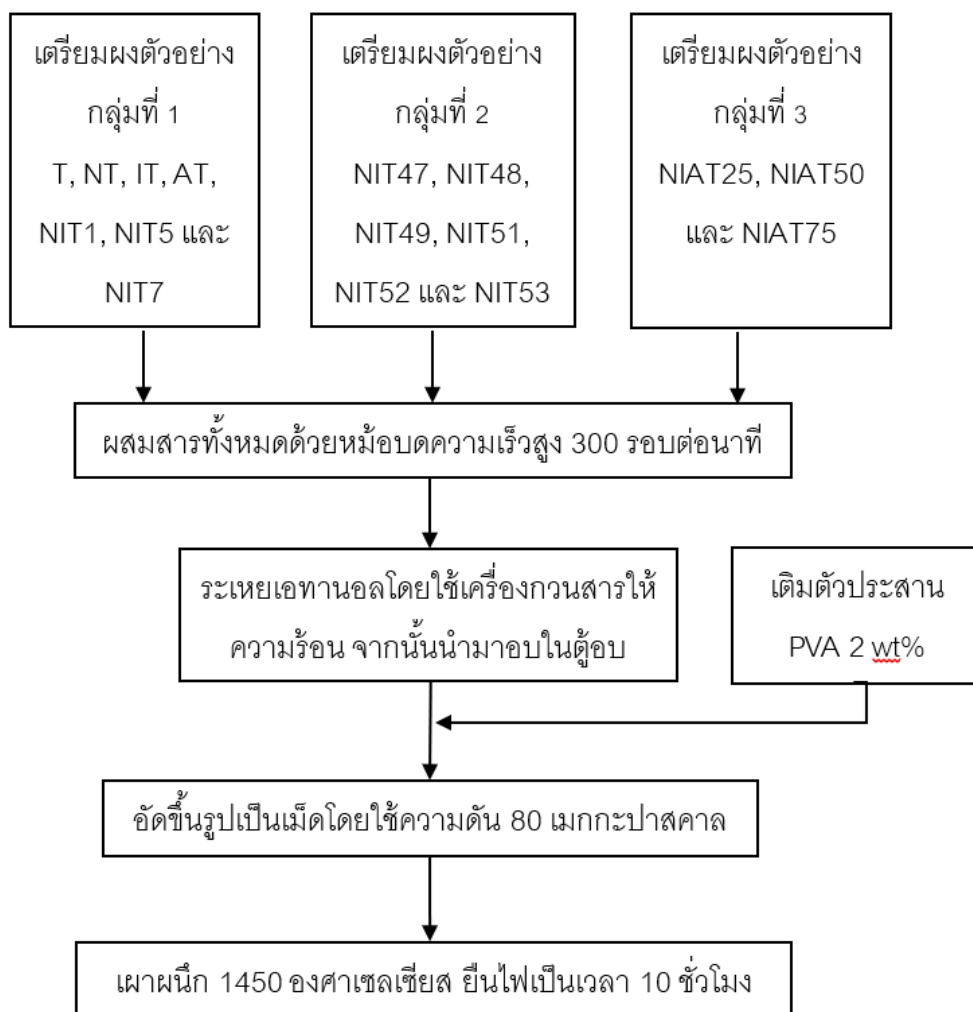
### 3.5 ขั้นตอนการอัดเม็ดเซรามิกและเผาผนึก

- 1 นำสารตัวอย่างที่ผ่านการอบมาที่บดผสมกับ PVA ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในครกบดสาร จากนั้นบดจนสารตัวอย่างแห้งและเป็นผงละเอียด
- 2 อัดขึ้นรูปเป็นเม็ดโดยใช้แม่พิมพ์โลหะเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิกด้วยความดัน 80 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 2 นาที
- 3 นำเม็ดที่อัดใส่ภาชนะอะลูมินา (Alumina crucible) โดยโรยผงของสารตัวอย่างบนถ้วยอะลูมินาแล้วปิดให้เรียบเพื่อป้องกันการสูญหายของอะลูมินาจากเม็ดสารตัวอย่าง
- 4 นำเม็ดสารตัวอย่างไปเผาผนึก (Sinter) ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที เมื่อครบเวลายืนไฟ 10 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิห้องโดยใช้อัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึก

### 3.6 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์

### 3.7 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างฐานไทเทเนียมไดออกไซด์หลังจากการเผาผนึก

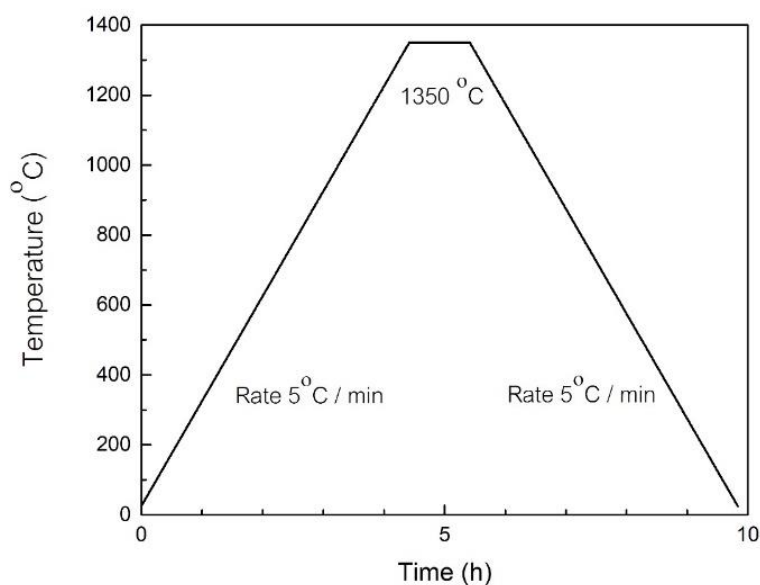
#### 3.7.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

ใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) วัดมุมที่ 2 Theta เท่ากับ 10 ถึง 90 องศา เครื่องทำการวัดที่ทุกๆ 0.02 องศา (Step Size) ในทุก 0.5 วินาที (Step Time) วิเคราะห์ผงจากเม็ดเซรามิกหลังการเผาผนึก โดยใช้ครกบดสารชนิดอะลูมินา บดเม็ดเซรามิกจนละเอียดแล้วจึงนำไปวิเคราะห์

### 3.7.2 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV โดยการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำเม็ดเซรามิกที่ได้จากการเผาผนึกมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240, 400, 800, 1200 และ 2000
- 2) เมื่อขัดชิ้นงานเสร็จแล้วนำไปโดยให้เอทานอลล้างทำความสะอาด
- 3) นำไปเข้าเตาอบเพื่อให้เอทานอลระเหย ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) นำชิ้นงานไปอบอ่อน (Annealing) อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อครบเวลายืนไฟ 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ อัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อน



### 3.7.3 การตรวจวัดความหนาแน่น

ตรวจวัดความหนาแน่น ( $\rho$ ) ด้วยหลักการแทนที่น้ำตามหลัก ASTM C373 - 14a โดยการนำเม็ดสารตัวอย่างไปต้มน้ำกลั่นอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่าความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{Bulk Density (g/cm}^3\text{)} = \frac{D}{W-S} \quad 3.1$$

เมื่อ D คือ น้ำหนักของชิ้นงานแห้งที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

W คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ผ่านการต้มในน้ำกลั่นชั่งในอากาศ (กรัม)

S คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ผ่านการต้มในน้ำกลั่นชั่งน้ำ (กรัม)



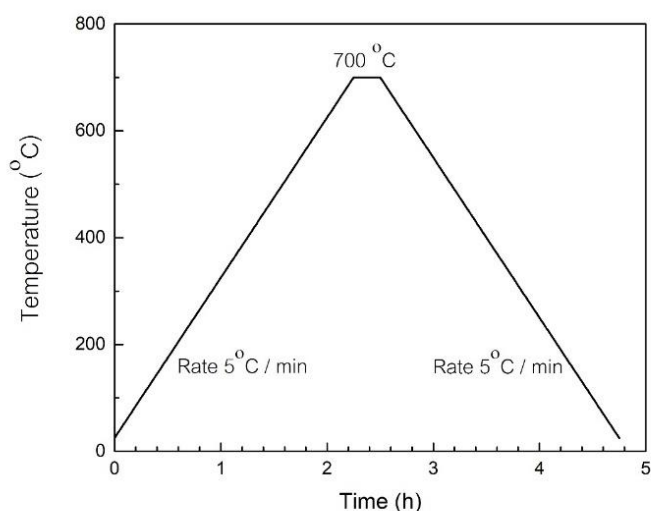
รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งสำหรับการตรวจวัดความหนาแน่น

### 3.6.4 การทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก

การที่จะทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกได้นั้น จำเป็นต้องมีการทำขั้วไฟฟ้าให้ชิ้นงานเม็ดเซรามิก โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กาวเงิน (Silver paste) ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

- 1) นำเม็ดเซรามิกที่ได้จากการเผาผนึกมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240, 400, 800 และ 1200 ให้เรียบทั้ง 2 ด้าน

- 2) เมื่อขัดชิ้นงานเสร็จแล้วนำไปโดยใช้เอทานอลล้างทำความสะอาด
- 3) นำไปเข้าเตาอบเพื่อให้เอทานอลระเหย ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็น 1 ชั่วโมง
- 4) ทากาวเงินที่ผิวเม็ดเซรามิกทั้ง 2 ด้าน รอจนกาวเงินแห้ง
- 5) นำชิ้นงานไปเผาเพื่อให้กาวเงินติดบนผิวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อครบเวลายืนไฟ 15 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิห้องโดยใช้อัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผา กาวเงิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หลังจากทำขั้วไฟฟ้าที่ชิ้นงานแล้ว นำไปทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกด้วย LCR Meter ที่อุณหภูมิห้องถึง 300 องศาเซลเซียส และ ทดสอบที่ความถี่ 100 เฮิร์ต ถึง 1 เมกกะเฮิร์ต ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.5 เครื่อง LCR Meter

### 3.6.5 ทดสอบสภาพต้านทานทางไฟฟ้า

การทดสอบค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิห้องถึง 400 องศาเซลเซียส โดยนำตัวอย่างเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการทำขั้วเงินเรียบร้อยแล้วมาวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ด้วยเครื่อง Picoammeter ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 20 องศาเซลเซียส แล้วทำกระบวนการเดิมจนถึง 400 องศาเซลเซียส นำผลค่ากระแสและความต่างศักย์ในแต่ละอุณหภูมิ นำมาเขียนกราฟเพื่อหาความชัน ซึ่งจะได้ความต้านทานทางไฟฟ้า จากนั้นใช้สมการ

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad 3.2$$

เมื่อ  $\rho$  คือ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)

R คือ ความต้านทานทางไฟฟ้า (โอห์ม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (เมตร<sup>2</sup>)

l คือ ความหนาของวัสดุ (เมตร)

จะได้ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของแต่ละตัวอย่าง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

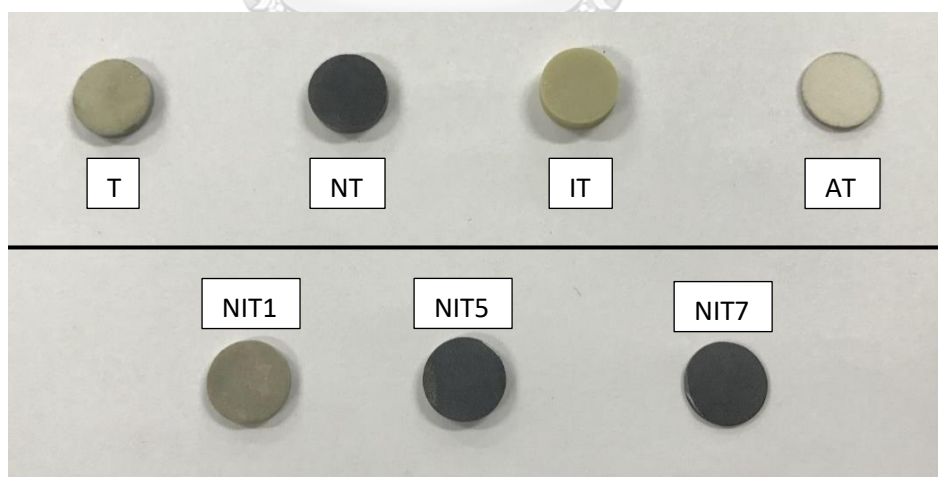
เซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมในงานวิจัยนี้จะถูกนำเสนอผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในระบบต่าง ๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เพียงธาตุเดียว ( $\text{TiO}_2$ ),  $(\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$ ,  $(\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$  และ  $(\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$  รวมถึง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์  $((\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_x(\text{TiO}_2)_{1-x})$  โดยที่  $x$  มีค่าเป็น 0.01, 0.05 และ 0.07 กลุ่มที่ 2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่ความเข้มข้นอินเดียมออกไซด์ขาด  $((\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$  และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่ความเข้มข้นอินเดียมออกไซด์เกิน  $((\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5+x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$  โดยที่  $x$  มีค่าเป็น 0.01, 0.02 และ 0.03 กลุ่มที่ 3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์  $((\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-y}\text{Al}_y)_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95})$  โดยที่  $y$  มีค่าเป็น 0.025, 0.050 และ 0.075 โดยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state) เผาผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อทำการศึกษาลักษณะการนำ ไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมถึงอัตราส่วนของธาตุที่เจือส่งผลกระทบต่อสมบัติต่าง ๆ ในเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ตรวจสอบความหนาแน่น ( $\rho$ ) ด้วยหลักการแทนที่น้ำ สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกด้วยและสภาพต้านทานด้วยเครื่อง LCR Meter โดยมีการอภิปรายผลการทดลองตามลำดับดังต่อไปนี้

#### 4.1 กลุ่มที่ 1 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารประกอบเดี่ยว รวมถึงไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์

ตัวอย่างกลุ่มนี้ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อตรวจสอบแนวโน้มของสมบัติต่างๆ ตามงานวิจัยที่ได้สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับตัวอย่างในกลุ่มนี้ เพื่อนำตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 ไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างในกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในกลุ่มอื่น ๆ

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก

เมื่อเผาผนึกเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็วการขึ้นและลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.1 แลบบนจากทางด้านซ้ายคือตัวอย่าง T, NT, IT และ AT ตามลำดับ พบว่าตัวอย่าง T มีสีขาวอมเหลือง NT มีสีดำ IT มีสีขาวอมเหลืองคล้ายสีน้ำตาล และ AT มีสีขาว แลบล่างจากทางด้านซ้ายคือตัวอย่าง NIT1, NIT5 และ NIT7 ตามลำดับ ตัวอย่าง NIT1 พบว่ามีสีขาวแต่ค่อนข้างออกไปทางสีดำ ตัวอย่าง NIT5 และ NIT7 มีสีดำคล้าย ตัวอย่าง NT จากงานวิจัยของ Jinglei Li และ คณะ<sup>[38]</sup> พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์หลังเผาผนึกจะมีสีขาวอมเหลือง แต่ถ้าตัวอย่างเป็นสีดำหลังจากการเผาผนึกแสดงว่าในตัวอย่างมีช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy) และ  $Ti^{3+}$  เกิดขึ้น พบว่ามีแนวโน้มที่ตัวอย่างมีสีดำจะมีสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดี



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 หลังจากเผาผนึก

#### 4.1.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์

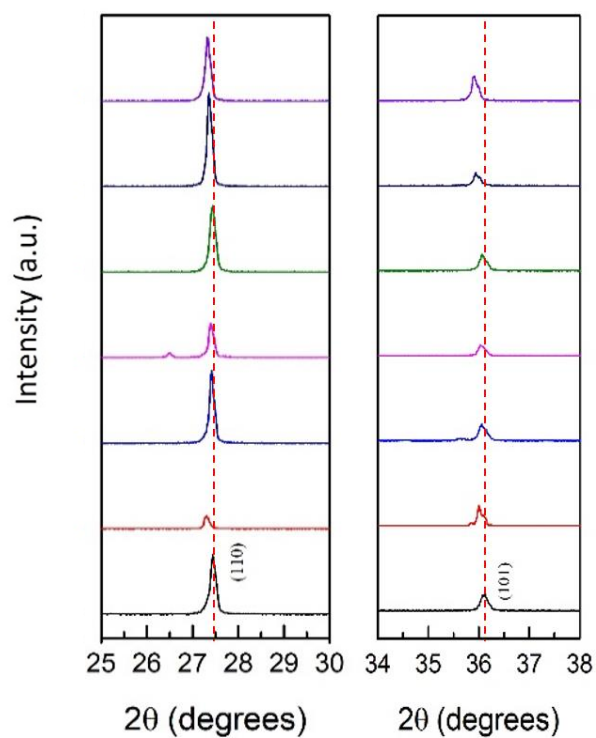
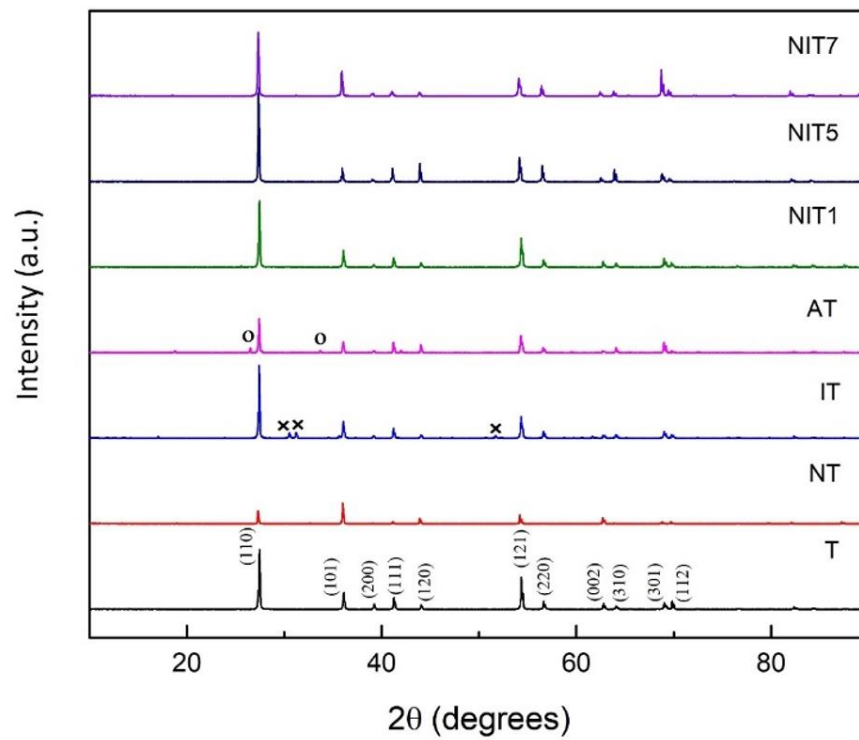
เมื่อได้ตัวอย่างเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำมาทดสอบความหนาแน่น ด้วยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C373 - 14a โดยนำไปต้มน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่น ศึกษาแต่ละระบบของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 ดังตารางที่ 4.1 ได้แสดงให้เห็นว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับการเจือจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น จากระบบการเจือไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์พร้อมกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นจะมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารเจือ

ตารางที่ 4.1 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1

ชื่อย่อ	สัดส่วนองค์ประกอบ	ความหนาแน่น
T	$TiO_2$	92.32%
NT	$Nb_{0.05}(TiO_2)_{0.95}$	99.92%
IT	$In_{0.05}(TiO_2)_{0.95}$	97.19%
AT	$Al_{0.05}(TiO_2)_{0.95}$	99.39%
NIT1	$(Nb_{0.5}In_{0.5})_{0.01}(TiO_2)_{0.99}$	95.00%
NIT5	$(Nb_{0.5}In_{0.5})_{0.05}(TiO_2)_{0.95}$	91.20%
NIT7	$(Nb_{0.5}In_{0.5})_{0.07}(TiO_2)_{0.93}$	88.06%

#### 4.1.1.2 ผลการเฟสของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

นำเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์มาบดเป็นผงเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกและเฟสที่เกิดขึ้นในสัดส่วนองค์ประกอบกลุ่มที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 1  
 X : เฟสของอินเดียมไททาเนต ( $\text{In}_2\text{TiO}_5$ ) และ O : เฟสของอินเดียมไททาเนต ( $\text{In}_2\text{TiO}_5$ )

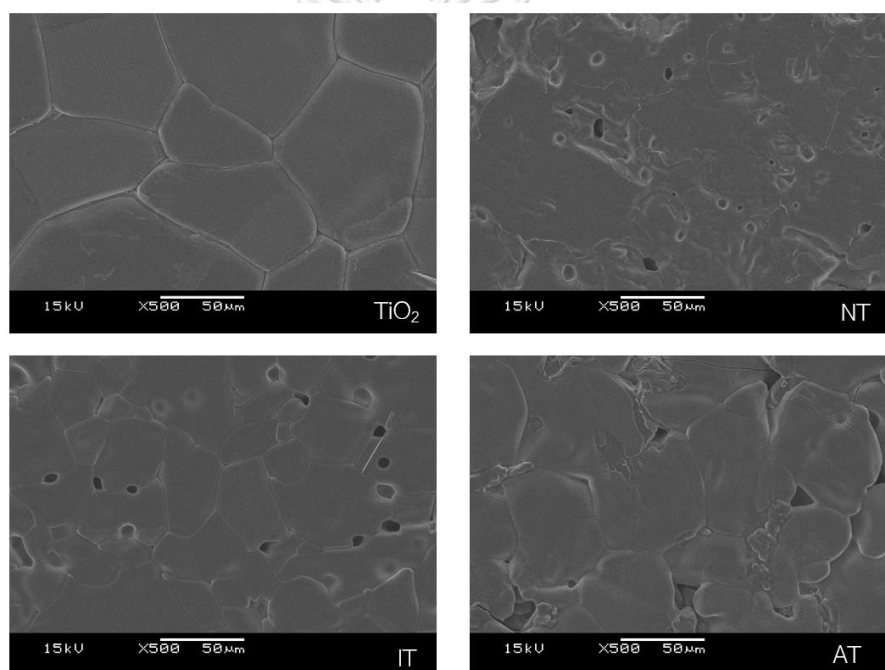
จากรูปที่ 4.2 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือธาตุใดๆ T มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์จากแฟ้มข้อมูล JCPDs เลขที่ 21-1276 ซึ่งเป็นโครงสร้าง เตตระโกนอลที่อุณหภูมิต่ำ และไม่พบเฟสแปลกปลอมใดๆ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยงานวิจัยของ Hu, W. และ คณะ[34] จึงนำรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์นี้เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือในระบบต่าง ๆ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล NT เหมือนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสแบบรูไทล์ แสดงว่าไนโอเบียมออกไซด์สามารถเจือในไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ความสูงในแต่ละพีคน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บ่งบอกว่าเป็นผลเล็กน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล IT พบว่านอกเหนือจากเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรากฏยังมีพีคที่สังเกตเห็นได้จากสัญลักษณ์ X ซึ่งเป็นเฟสของอินเดียมไททาเนต ( $\text{In}_2\text{TiO}_5$ ) จากแฟ้มข้อมูล JCPDS No. 30-0640 ทำให้การเจืออินเดียมออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ในไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สมบูรณ์ ต่อมาเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล พบว่า นอกเหนือจากเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรากฏยังมีพีคที่สังเกตเห็นได้จากสัญลักษณ์ O ซึ่งเป็นเฟสของอะลูมิเนียมไททาเนต ( $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ) จากแฟ้มข้อมูล JCPDS No. 26-0040 ในส่วนรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ อัตราส่วนองค์ประกอบ 1, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ( $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ )  $x = 0.01, 0.05$  และ  $0.07$  พบว่าทั้ง 3 องค์ประกอบมีเฟสเดียว โดยที่ไม่พบเฟสแปลกปลอมที่แตกต่างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ บ่งบอกถึงสามารถเจือไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่พร้อมกันในไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์สอดคล้องกับ เพื่อทำการเปรียบเทียบชัดเจน ได้ทำการขยายมุม  $2\theta$  ที่ 27-29 องศา และ 34-38 องศา ซึ่งแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ระนาบ (110) และระนาบ (101) พบว่าพีคของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือเลื่อนไปทางซ้ายทุกตัวอย่าง จากระบบการเจือไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์พร้อมกันพบว่าพีคจะมีการเคลื่อนไปทางซ้ายมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารเจือมากขึ้น เนื่องจากขนาดของ  $\text{In}^{3+}$ ,  $\text{Nb}^{5+}$  และ  $\text{Ti}^{4+}$  ไอออนมีค่าเท่ากับ 0.940 อังสตรอม, 0.780 อังสตรอม และ 0.745 อังสตรอม ตามลำดับ[38] ซึ่ง  $\text{In}^{3+}$   $\text{Nb}^{5+}$  ขนาดใหญ่กว่า



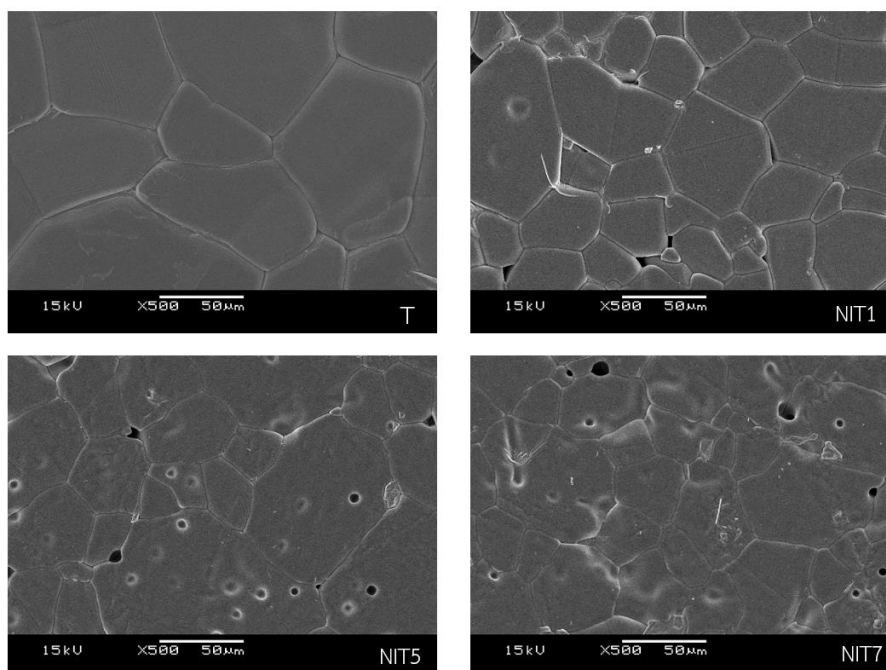
$Ti^{4+}$  ทำให้เมื่อเกิดการแทนที่กันของอะตอมขนาดของโครงสร้างผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังเห็นได้จากตำแหน่งของพีคที่เปลี่ยนแปลง

#### 4.1.1.3 ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์

นำเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มาตรวจสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณพื้นผิวของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อตรวจสอบลักษณะและขนาดของเกรน รวมถึงรูพรุน ของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ด้วยกำลังขยาย 500 เท่าของเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูป 4.3 และรูป 4.4



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 โดยมี T, NT, IT และ AT



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 โดยมี T, NIT1, NIT5 และ NIT7

จากรูป 4.3 สังเกตได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ T มีขนาดเกรนที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือ ไม่มีรูพรุน มีขอบเกรนที่ชัดเจน เมื่อเจือไนโอเบียมออกไซด์ NT พบว่าขอบเกรนไม่ชัดเจน และมีรูพรุนกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเจืออินเดียมออกไซด์ IT พบว่าขนาดเกรนเล็กลง และ พบรูพรุนบริเวณขอบเกรน เมื่อเจืออะลูมิเนียมออกไซด์ AT พบว่าเกรนมีขนาดเล็กลง ขอบเกรนไม่ชัดเจน และมีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่บริเวณขอบเกรน ขนาดเกรนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กลุ่มที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.2

จากรูปที่ 4.4 การเจือไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์พร้อมกันพบว่าเกรนมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ พบรูพรุนทั้งในเนื้อเกรนและขอบเกรน จากตัวอย่าง [NIT1] พบว่ามีรูพรุนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ NIT5 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่พบรูพรุนจำนวนมากที่สุด กับ [NIT7] ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ขนาดเกรนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กลุ่มที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1

ชื่อย่อ	สัดส่วนองค์ประกอบ	ขนาดเกรนเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
T	$\text{TiO}_2$	$92.59 \pm 7.49$
NT	$\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$52.95 \pm 5.45$
IT	$\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$32.00 \pm 2.78$
AT	$\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$47.93 \pm 3.63$
NIT1	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.01}(\text{TiO}_2)_{0.99}$	$27.05 \pm 3.48$
NIT5	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$54.60 \pm 2.09$
NIT7	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.07}(\text{TiO}_2)_{0.93}$	$30.38 \pm 5.08$

#### 4.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าทางของเซรามิก

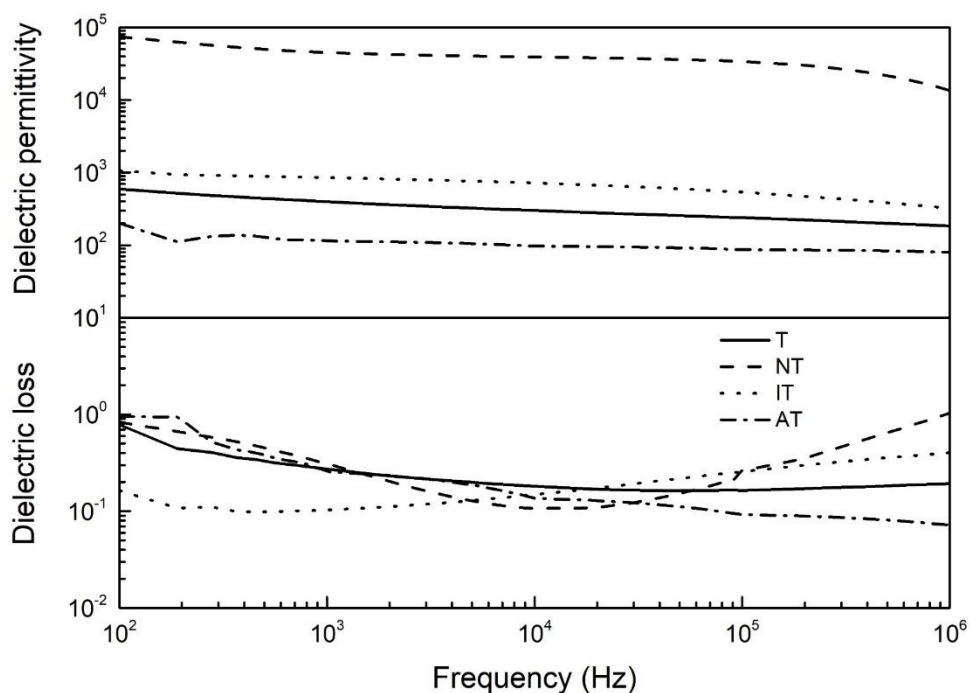
##### 4.1.2.1 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและความถี่

นำตัวอย่างเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการทำขั้วเงินเรียบร้อยแล้วมาตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่จาก  $10^2$ - $10^6$  เฮิรต์

โดยในกลุ่มที่ 1 ได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 กลุ่มย่อยคือ

กลุ่มย่อยที่ 1 ได้แก่ตัวอย่าง T, NT, IT และ AT

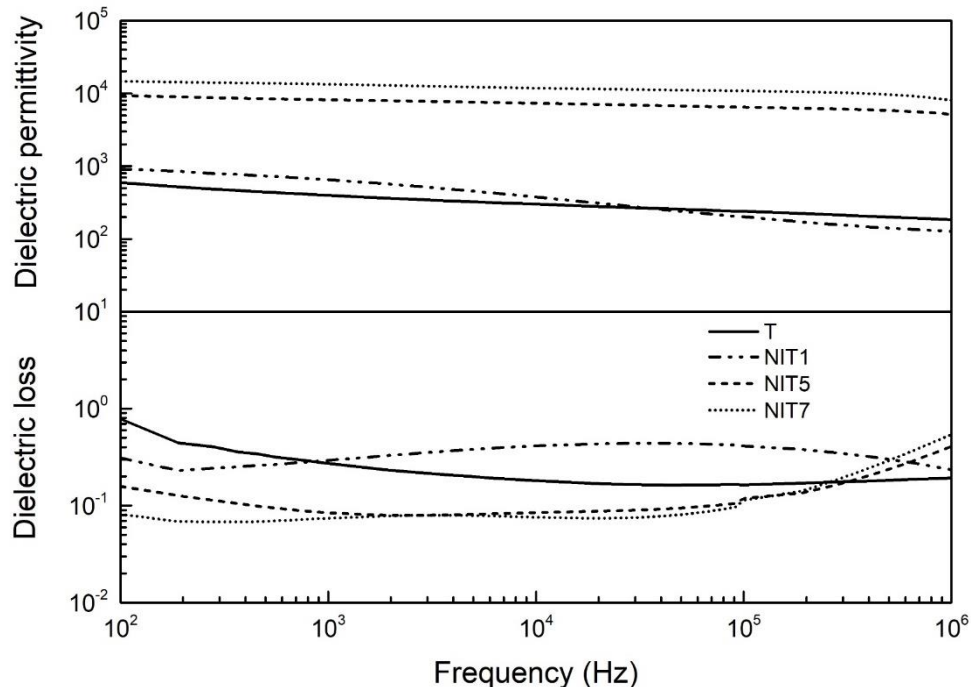
กลุ่มย่อยที่ 2 ได้แก่ตัวอย่าง T, NIT1, NIT5 และ NIT7



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 1 (ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยธาตุเดียว)

จากรูป 4.5 พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่ขึ้นกับความถี่อย่างเห็นได้ชัด แต่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงกับความถี่ที่แตกต่างกัน ตัวอย่าง T มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 400-600 และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกในช่วง 0.2-0.8 ที่ความถี่ต่ำจะมีค่า 0.8 เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นจะมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ จนถึงความถี่ที่  $10^5$  เฮิร์ต มีค่าเท่ากับ 0.2 ตัวอย่าง NT พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมากอยู่ในช่วง 30000-70000 และ เมื่อเพิ่มความถี่จะมีค่าลดลงเล็กน้อย จนถึงความถี่ที่  $10^5$  เฮิร์ต เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นจะมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.1-0.8 ซึ่งจะมีค่า 0.8 ที่ความถี่ต่ำ เมื่อเพิ่มความถี่จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงความถี่ที่  $10^4$  เฮิร์ต ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดคือ 0.1 หากเพิ่มความถี่มากขึ้น ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ ซึ่งตัวอย่างนี้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงที่สุดจากตัวอย่างทั้งหมดในงานวิจัยนี้เพราะเป็นการเจือออกไซด์ทำหน้าที่เป็นผู้ให้เพียงอย่างเดียวทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นภายในเกรนและจากรูปที่ 4.3 ลักษณะของขอบเกรนมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่สามารถควบคุมอิเล็กตรอนไว้ในเกรนได้ ตัวอย่าง

IT พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 600-1000 เพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง T เล็กน้อย เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นจะมีค่าลดลง ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.2-0.3 ที่ความถี่ต่ำจะมีค่า 0.2 เมื่อเพิ่มความถี่ในการทดสอบค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม ตัวอย่าง AT มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 100-200 ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่าง T และ เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นจะมีค่าลดลง ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.07-1.00 ที่ความถี่ต่ำมีค่าสูงคือ 1 แต่เมื่อเพิ่มความถี่จะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น คาดว่ามากจากเนื่องจากขนาดของ  $\text{In}^{3+}$ ,  $\text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  และ  $\text{Ti}^{4+}$  ไอออนมีค่าเท่ากับ 0.940 อังสตรอม, 0.780 อังสตรอม 0.530 สตรอม และ 0.745 อังสตรอม ตามลำดับ<sup>[38]</sup> จะเห็นได้ว่าขนาดรัศมีไอออนของ  $\text{Al}^{3+}$  มีความแตกต่างกว่า  $\text{Ti}^{4+}$  มากกว่า  $\text{In}^{3+}$  ซึ่งทำให้การแทนที่ของ  $\text{Al}^{3+}$  เกิดขึ้นได้ยาก หรือ อาจจะไม่สามารถแทนที่  $\text{Ti}^{4+}$  ได้ แล้วอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เจือไปสะสมอยู่ที่บริเวณของขอบเกรนจากรูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะของเกรนเป็นก้อนยังไม่มีการจัดเรียงตัวเสมือนว่าการเผาผนึกไม่เสร็จสมบูรณ์ คาดว่าอะลูมิเนียมออกไซด์ไปยับยั้งการโตของเกรน

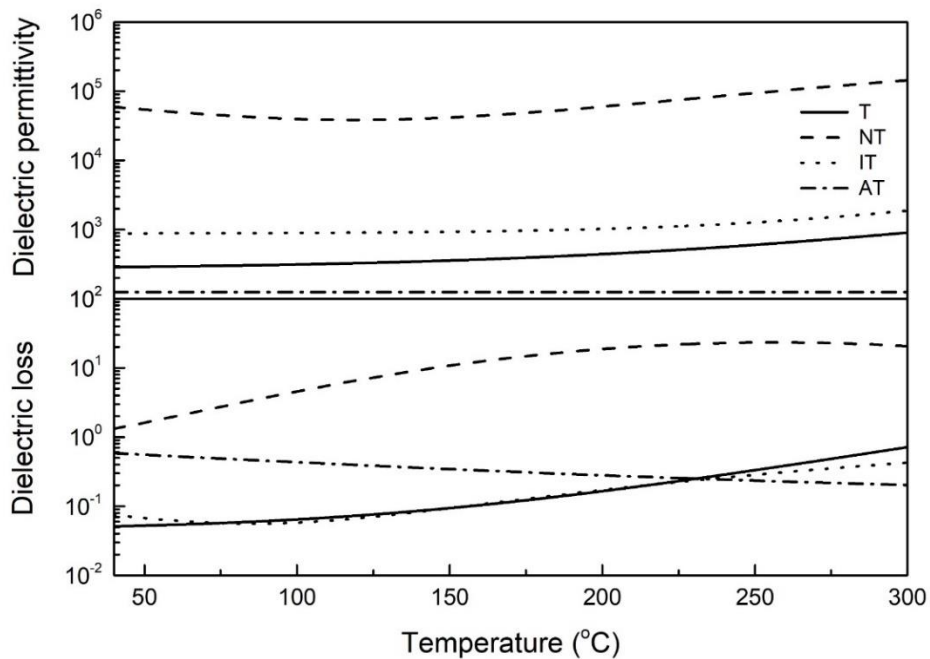


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 2 (เจือด้วย ไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ)

จากรูป 4.6 พบว่าตัวอย่าง NIT ทุกตัวอย่างมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารเจือ สังกะสีได้จากตัวอย่าง NIT1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 300-1,000 เพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง T เล็กน้อย ส่วนตัวอย่าง NIT5 พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 8000-10000 เพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง T เป็นอย่างมาก และ ตัวอย่าง NIT7 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 13000-15000 ซึ่งมีค่ามากที่สุดในตัวอย่างเป็นกลุ่มที่ 1 ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของตัวอย่าง NIT พบว่ามีค่าลดลงเป็นอย่างมากในช่วงความถี่ต่ำ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของตัวอย่าง NIT1 อยู่ในช่วง 0.4-0.6 ที่ความถี่ต่ำมีค่า 0.4 เมื่อเพิ่มความถี่จนถึง  $10^3$ - $5 \times 10^5$  เฮิร์ต พบว่ามีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นถึง 0.6 ตัวอย่าง NIT5 พบว่ามีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกในช่วง 0.08-0.70 ที่ความถี่ต่ำจะมีค่า 0.16 ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่าง T เป็นอย่างมาก และ เมื่อเพิ่มความถี่จะมีค่าลดลงจนถึง 0.08 ที่ความถี่  $10^3$  เฮิร์ต โดยมีค่าคงที่จนถึงที่ความถี่  $10^5$  เฮิร์ต เมื่อเพิ่มความถี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ตัวอย่าง NIT7 มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกในช่วง 0.08-0.80 ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับตัวอย่าง NIT5

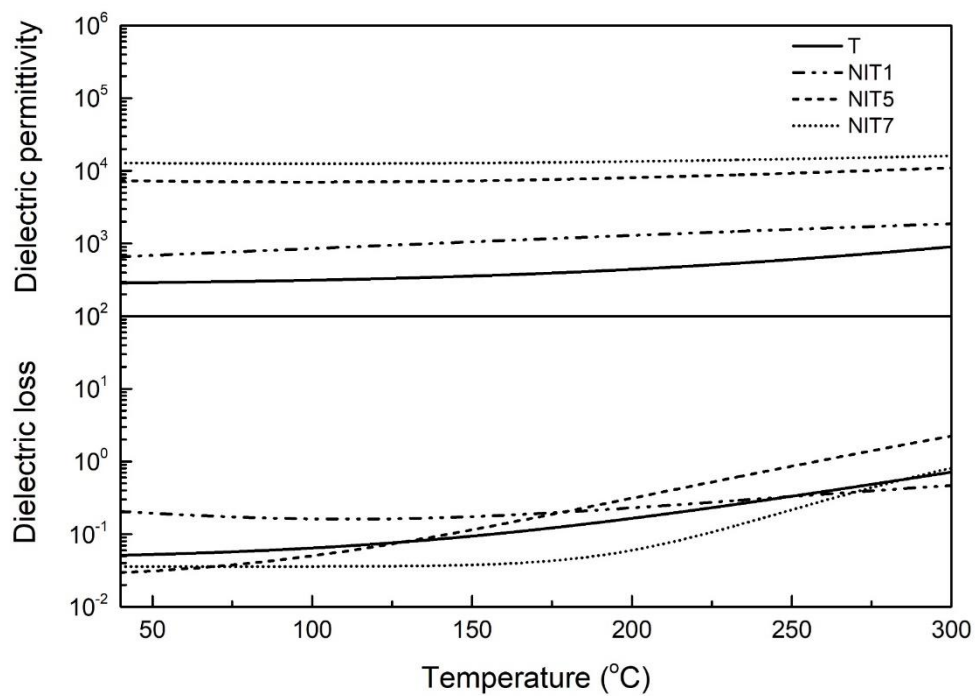
#### 4.1.2.2 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ

ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 1 (ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยธาตุเดียว)

จากรูป 4.7 พบว่าตัวอย่าง T มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 300-600 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกในช่วง 0.05-0.70 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง NT มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 40000-100000 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าในช่วง 1.5-10 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่าง IT มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 800-1000 เมื่ออุณหภูมิเกิน 200 องศาเซลเซียสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.05-0.40 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ ตัวอย่าง AT พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 100 ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่าง T และ คงที่ในทุกช่วงอุณหภูมิทดสอบ ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.2-0.6 ที่อุณหภูมิต่ำมีค่า 0.6 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึง 0.2



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 2 (เจือด้วย ไนโอเบียมออกไซด์ และ อินเดียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ)

จากรูป 4.8 พบว่าตัวอย่างที่มีองค์ประกอบ NIT มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารเจือ สังกเกตได้ว่า ตัวอย่าง NIT1 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 600-1000 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีค่าขึ้น ตัวอย่าง NIT5 และ NIT7 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 8000-9000 และ 13000-14000 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ย่อย 2 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิตดสอบ ตัวอย่าง NIT1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.20-0.25 ตัวอย่าง NIT5 มีค่าอยู่ในช่วง 0.03-1.50 และ ตัวอย่าง NIT7 มีค่าอยู่ในช่วง 0.04-0.40

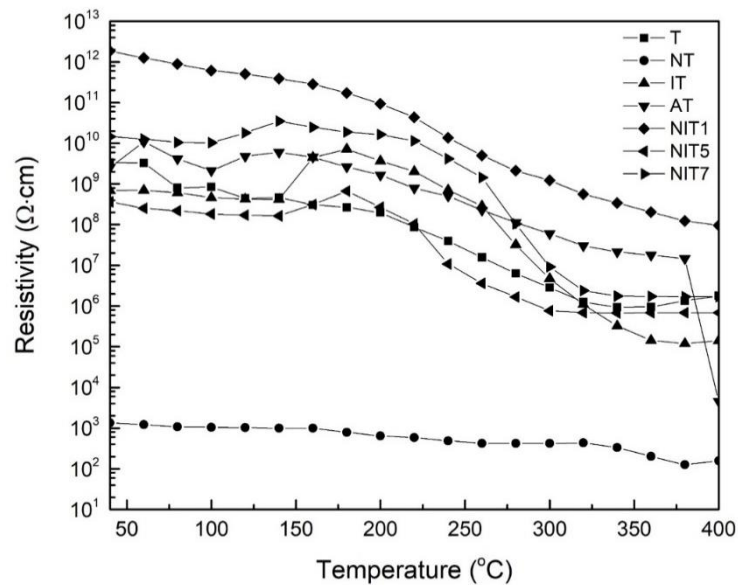
**ตารางที่ 4.3** แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

ชื่อย่อ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก
T	398	0.27
NT	45079	0.30
IT	854	0.10
AT	114	0.25
NIT1	650	0.29
NIT5	8172	0.08
NIT7	13365	0.07

#### 4.1.2.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้า

นำชิ้นงานตัวอย่างเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำขึ้นแล้วมาวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยหลักการของโอห์ม ได้แก่การวัดกระแสไฟฟ้า (I) ที่ความต่างศักย์ (V) ต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Picoammeter ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 20 องศาเซลเซียส แล้วทำการบวกรวมการเดิมจนถึง 400 องศาเซลเซียส





รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์สภาพต้านทานเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวอย่างของกลุ่มที่ 1

ตัวอย่าง T มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $3.34 \times 10^9$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $1.77 \times 10^6$  โอห์ม·เซนติเมตร ตัวอย่าง NT มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ  $1.34 \times 10^3$  โอห์ม·เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $1.58 \times 10^2$  ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้ ตัวอย่าง IT มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $6.89 \times 10^8$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $1.42 \times 10^6$  โอห์ม·เซนติเมตร ตัวอย่าง AT ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $2.57 \times 10^9$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเป็นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $4.52 \times 10^3$  โอห์ม ตัวอย่าง NIT1 ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $1.85 \times 10^{12}$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $9.65 \times 10^7$  โอห์ม·เซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงสุดในงานวิจัยนี้ ตัวอย่าง NIT5 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $3.66 \times 10^8$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $6.83 \times 10^6$  โอห์ม·เซนติเมตร ตัวอย่าง NIT7 ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $1.47 \times 10^{10}$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $1.69 \times 10^6$  โอห์ม·

เซนติเมตร โดยภาพรวมเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงต้นจะมีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าลดลงเล็กน้อย จนถึง 120 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นจะมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก

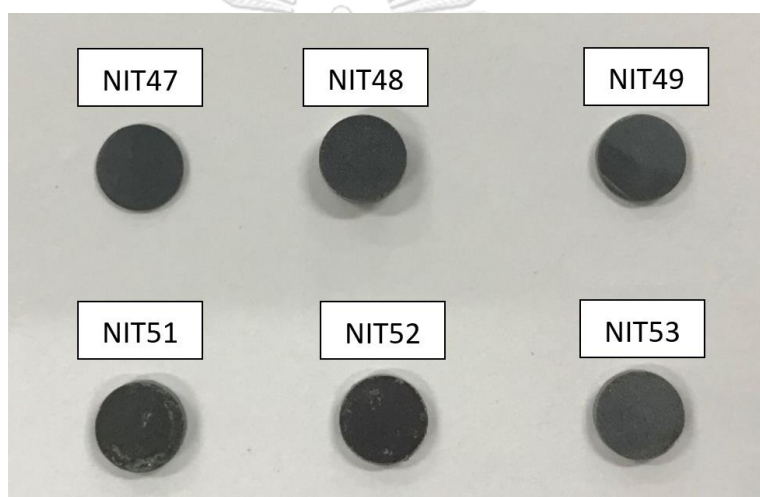
ตารางที่ 4.4 แสดงสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 1

ชื่อย่อ	สูตรขององค์ประกอบ	สภาพต้านทานไฟฟ้า( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
T	$\text{TiO}_2$	$3.34 \times 10^9$
NT	$\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$1.34 \times 10^3$
IT	$\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$6.89 \times 10^8$
AT	$\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$2.57 \times 10^9$
NIT1	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.01}(\text{TiO}_2)_{0.99}$	$1.85 \times 10^{12}$
NIT5	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$3.66 \times 10^8$
NIT7	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5})_{0.01}(\text{TiO}_2)_{0.99}$	$1.47 \times 10^{10}$

## 4.2 กลุ่มที่ 2 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ โดยที่ความเข้มข้นของอินเดียมออกไซด์ขาด และ เกิน

จากตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 ได้ทำการเลือกตัวอย่าง NIT5 เพราะว่ามีสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ดีนำมาปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างการเจือไนโอเบียมและอินเดียม โดยแบ่งออกแบ่งตัวอย่างที่อินเดียมขาด คาดว่าจะทำให้เกิด  $Ti^{3+}$  มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างที่อินเดียมเกินคาดว่าจะทำให้เกิดตำหนิของช่องว่างออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลง

### 4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 หลังจากเผาผืนึก

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่ขาด  $((Nb_{0.5}In_{0.5-x})_{0.05}(TiO_2)_{0.95})$  ซึ่งอยู่แถวบนและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่เกิน  $((Nb_{0.5}In_{0.5+x})_{0.05}(TiO_2)_{0.95})$  ซึ่งอยู่แถวล่าง โดยที่  $x$  มีค่าเป็น 0.01, 0.02 และ 0.03 ทั้ง 6 ตัวอย่าง มีสีด้าเหมือนตัวอย่าง NIT5

#### 4.2.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์

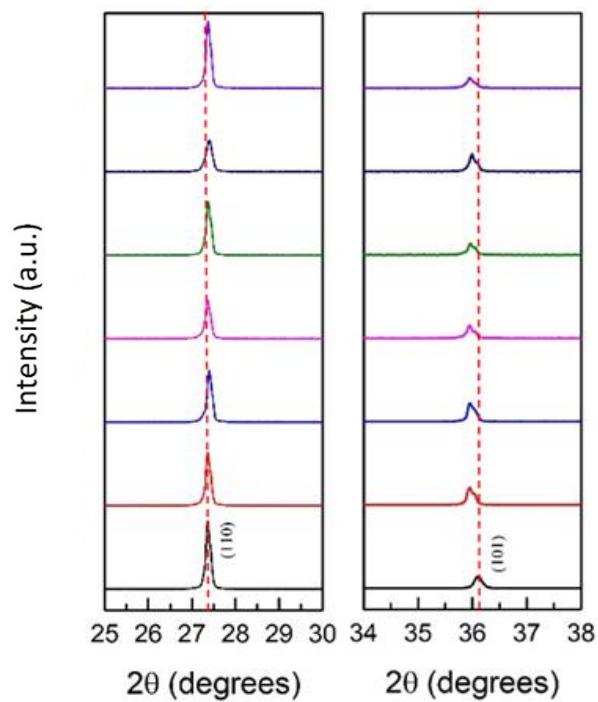
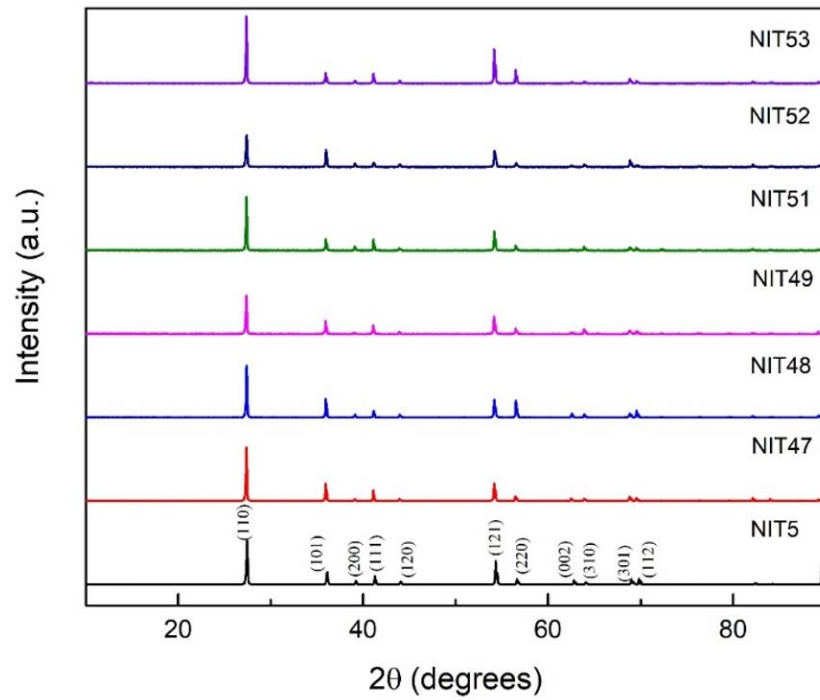
เมื่อได้ตัวอย่างเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเผาผืนึก ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำมาทดสอบความหนาแน่น ด้วยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C373 - 14a โดยนำไปต้มน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่ง

น้ำหนักเพื่อหาความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่น ของตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ดังตารางที่ 4.5 ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างทั้งระบบที่อินเดียมขาดและเกิน มีความหนาแน่นลดลงกว่าตัวอย่าง NIT5 ส่วนความเข้มข้นของอินเดียมไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2

ชื่อตัวอย่าง	สูตรขององค์ประกอบ	ความหนาแน่น
NIT47	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.47})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	90.40%
NIT48	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.48})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	90.37%
NIT49	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.49})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	90.21%
NIT51	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.51})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	90.77%
NIT52	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.52})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	90.65%
NIT53	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.53})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	89.80%

4.2.1.2 ผลการทดสอบเฟสของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

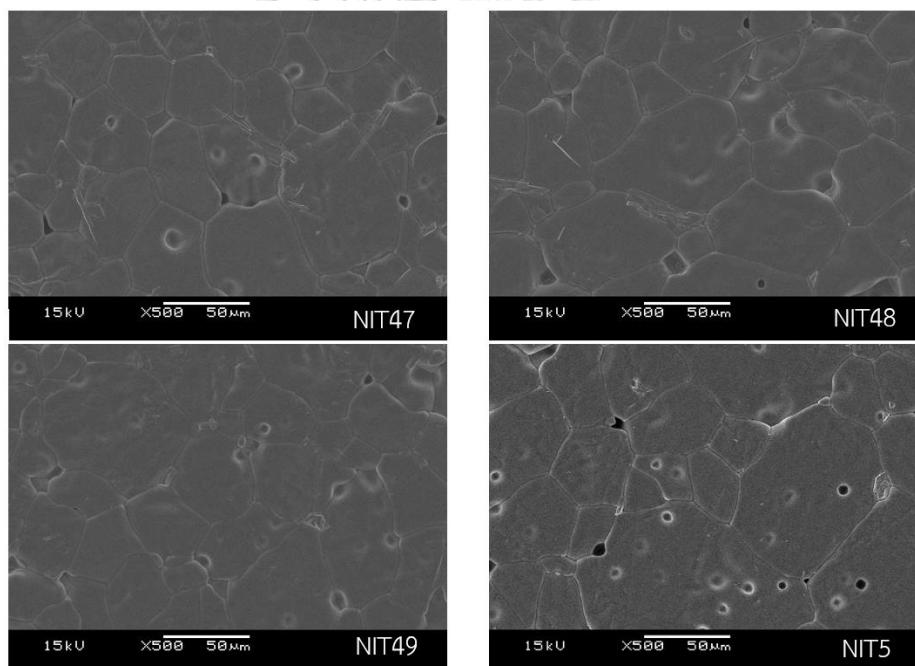


รูปที่ 4.11 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 2

สังเกตได้ว่าเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของอินเดียมออกไซด์ทั้งแบบ ชาติ และ เกิน พีคที่ เกิดขึ้นเหมือนของตัวอย่าง NIT5 ซึ่งเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบรูไทล์ พีคที่ระนาบ 110 พีคมีการเคลื่อนไปทางขวาเล็กน้อย ส่วนพีคที่ระนาบ 101 ตัวอย่างที่เจืออินเดียมออกไซด์ทั้งแบบ ชาติ และ เกิน พบว่าพีคเคลื่อนไปทางด้านซ้ายเล็กน้อยและเคลื่อนไปที่มุม  $2\theta$  ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameter) เมื่อสัดส่วน องค์ประกอบของอินเดียมเปลี่ยนแปลง

#### 4.2.1.3 ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์

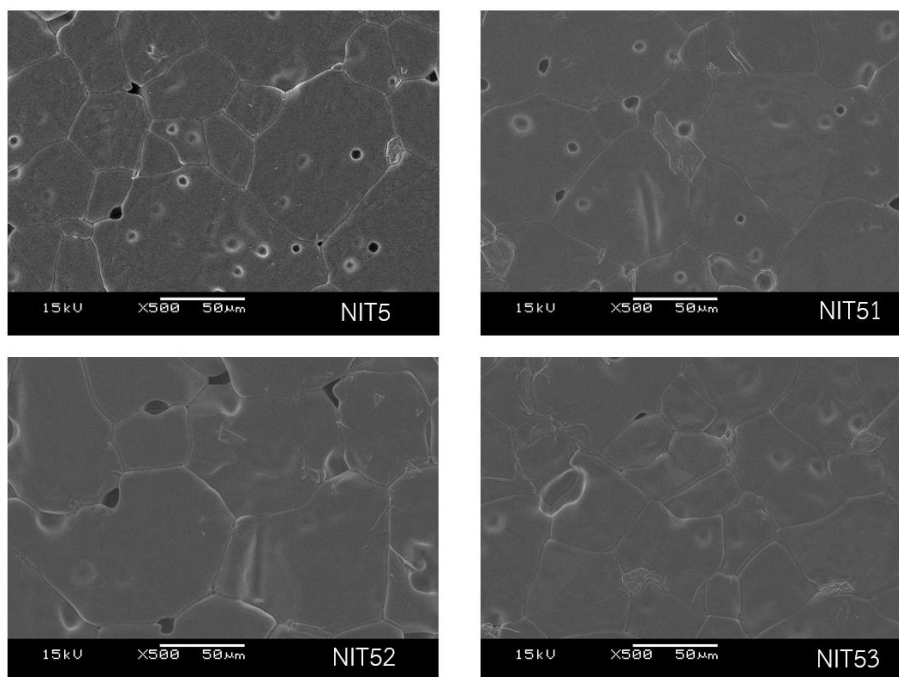
นำเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 2 ที่เตรียม มาตรวจสอบโครงสร้างเชิงจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 ระบบที่อินเดียมชาติ โดยมี NIT47, NIT48, NIT49 และ NIT5

จากรูปที่ 4.12 สังเกตได้ว่าระบบที่ชาติอินเดียม ทุกตัวอย่างอย่างจะมีขนาดเกรนที่เล็กกว่า ตัวอย่าง NIT5 ดังแสดงในตาราง 4.6 นอกจากนี้มีรูพรุนจำนวนน้อยกว่าแต่ขนาดใหญ่กว่าตัวอย่าง

NIT5 ซึ่งขนาดเกรนและรูพรุนของตัวอย่างที่ขาดอินเดียม ไม่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอินเดียมที่ชัดเจน นอกจากนี้การกระจายตัวของรูพรุนที่พบในเกรนจะมีมากกว่าขอบเกรนในตัวอย่างที่ขาดอินเดียม



รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 ระบบที่อินเดียมเกิน โดยมี NIT5, NIT51, NIT52 และ NIT53

จากรูปที่ 4.13 พบว่าระบบที่มีอินเดียมเกินรูพรุนมีจำนวนน้อยลงตามความเข้มข้นของอินเดียมที่ใส่เกิน แต่ขนาดของเกรนไม่ได้มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอินเดียมอย่างชัดเจน

ขนาดเกรนเฉลี่ยโดยรวมได้รายงานไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่าตัวอย่างในกลุ่มที่ 2 ทุกตัวอย่างมีขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กกว่าของตัวอย่าง NIT5 ระบบที่มีความเข้มข้นของอินเดียมขาดจะมีขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับทุกตัวอย่างอย่างในงานวิจัยนี้ ระบบที่มีความเข้มข้นของอินเดียมเกินจะมีรูพรุนน้อยกว่าระบบที่มีความเข้มข้นของอินเดียมขาดรวมถึงตัวอย่าง NIT5

ตารางที่ 4.6 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2

หมายเลข	สัดส่วนองค์ประกอบ	ขนาดเกรนเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
NIT47	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.47})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$27.88 \pm 1.56$
NIT48	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.48})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$20.41 \pm 1.32$
NIT49	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.49})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$29.37 \pm 2.58$
NIT51	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.51})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$43.14 \pm 5.20$
NIT52	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.52})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$53.83 \pm 6.24$
NIT53	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.53})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$45.23 \pm 3.62$

#### 4.2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

##### 4.2.2.1 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและความถี่

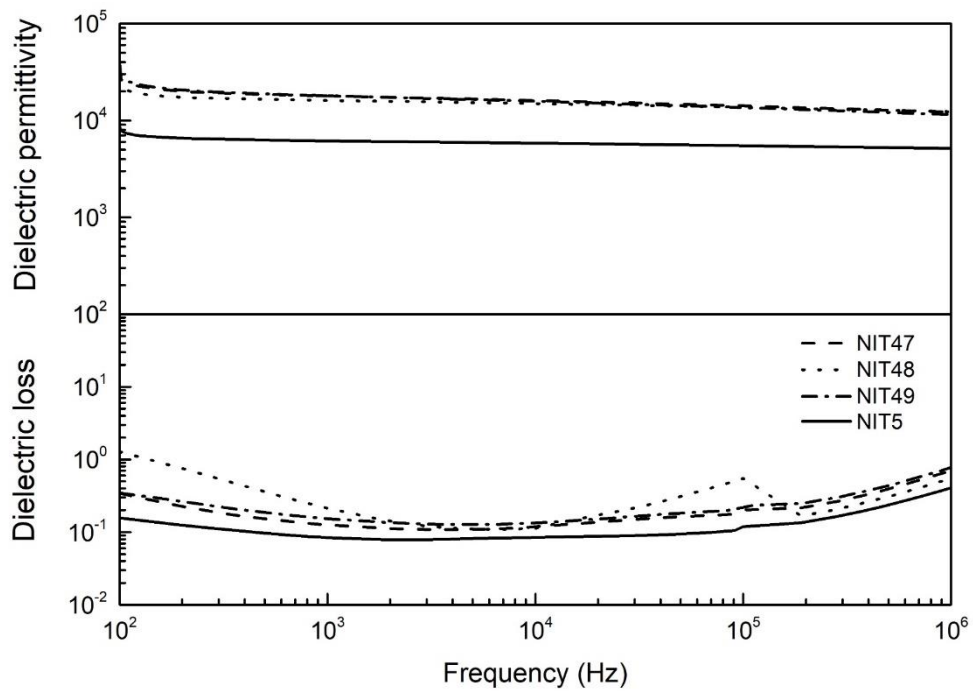
นำตัวอย่างเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการทำขั้วเงินเรียบร้อยแล้วมาตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่จาก  $10^2$ - $10^6$  เฮิร์ต ของกลุ่มที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยมี NIT5 เป็นตัวเปรียบเทียบ

ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ได้แก่ NIT47, NIT48 และ NIT49

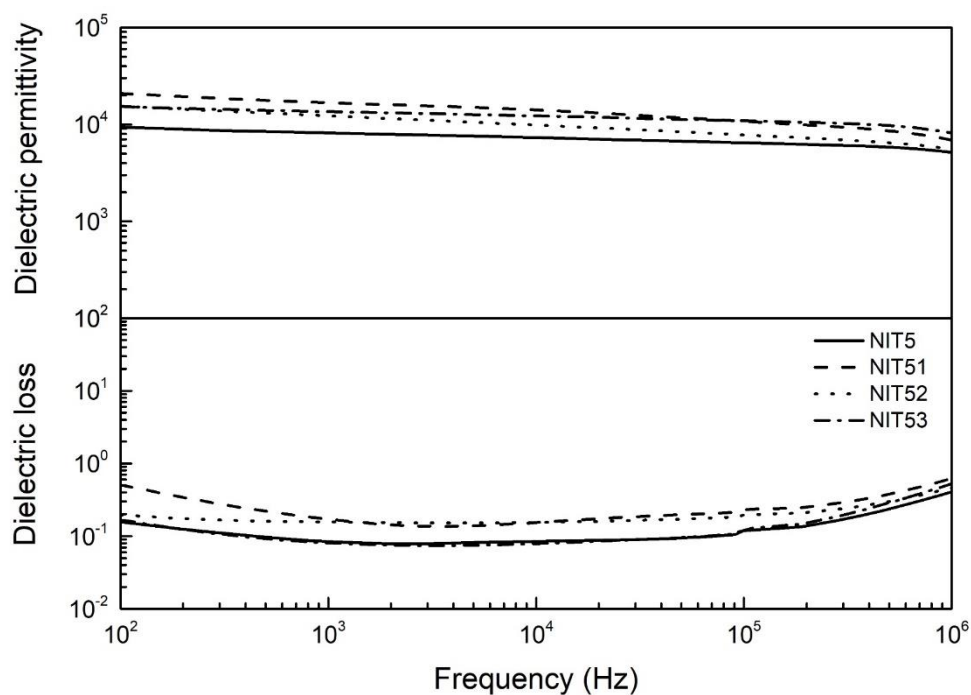
กลุ่มที่ 2 ได้แก่ NIT51, NIT52 และ NIT53





รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1

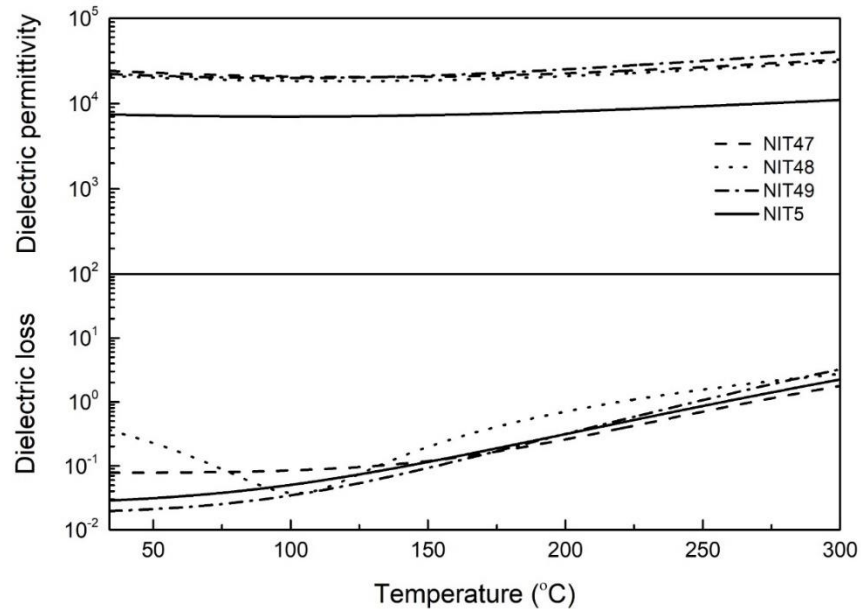
จากรูปที่ 4.14 พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่อินเดียมขาดในองค์ประกอบ มีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสูงกว่าตัวอย่าง NIT5 อย่างเห็นได้ชัดเจน และมีค่าคงที่เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่เหมือนกันทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยที่ตัวอย่าง NIT47 มีค่าอยู่ในช่วง 18000-28000 ตัวอย่าง NIT48 มีค่าอยู่ในช่วง 18000-22000 และ ตัวอย่าง NIT49 มีค่าอยู่ในช่วง 18000-30000 ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1 ทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่ามากกว่าตัวอย่าง NIT5 โดยที่ตัวอย่าง NIT47 มีค่าอยู่ในช่วง 0.8-1.5 ตัวอย่าง NIT48 มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-1.0 และ ตัวอย่าง NIT49 มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.8 การลดสัดส่วนองค์ประกอบของอินเดียมไม่ได้มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก โดยรวมแล้วกลุ่มที่มีความเข้มข้นของอินเดียมขาดในองค์ประกอบ จะพบว่ามีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกเพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถควบคุมค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเนื่องจากจะมีไนโอเบียมที่เกินทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นแล้วไม่สามารถถูกตรึงไว้ภายในเกรนได้



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 2

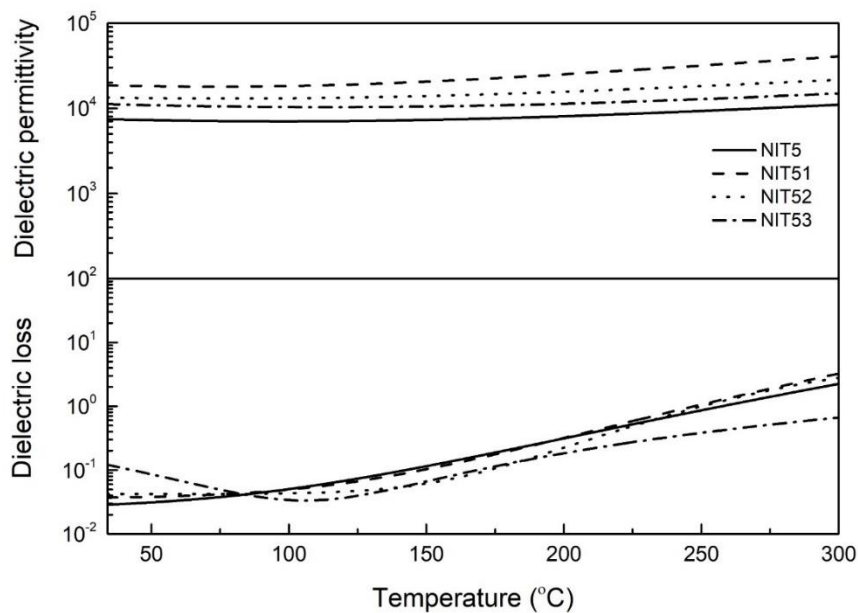
จากรูปที่ 4.15 พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 2 ที่มีอินเดียมเกินในองค์ประกอบมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าตัวอย่าง NIT5 อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ตัวอย่าง NIT51 มีค่าอยู่ในช่วง 14000-20000 ตัวอย่าง NIT52 มีค่าอยู่ในช่วง 9000-17000 และ ตัวอย่าง NIT53 มีค่าอยู่ในช่วง 13000-1,000 ซึ่งมีค่าไม่มากเท่ากับตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1 ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 2 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอินเดียมที่เกินจากองค์ประกอบทางเคมี ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงขึ้น สังเกตได้จากตัวอย่าง NIT51 และ NIT52 มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.5 และ 0.2-0.4 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมากกว่าตัวอย่าง NIT5 อย่างเห็นได้ชัด แต่ตัวอย่าง NIT 53 มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง NIT5 โดยรวมแล้วกลุ่มที่มีความเข้มข้นของอินเดียมเกินในองค์ประกอบ จะพบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นและมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากจะมีอินเดียมที่เกินทำให้เกิดไฮโดรภายในเกรน ทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำแบบพี

#### 4.2.2.2 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1

เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต จากรูปที่ 4.16 พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1 ที่มีอินเดียมขนาดในองค์ประกอบมีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสูงกว่าตัวอย่าง NIT5 อย่างเห็นได้ชัดและไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิห้องถึง ที่อุณหภูมิมากกว่า 175 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่ตัวอย่าง NIT47 มีค่าอยู่ในช่วง 23000-25000 ตัวอย่าง NIT48 มีค่าอยู่ในช่วง 22000-25000 และ ตัวอย่าง NIT49 มีค่าอยู่ในช่วง 24000-30000 เมื่อตรวจสอบค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกพบว่าความเข้มข้นของอินเดียมในกลุ่มนี้ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก แต่สังเกตได้ว่ามีเพิ่มอุณหภูมิไปถึง 150 องศาเซลเซียส ตัวอย่าง NIT47 NIT49 มีค่าอยู่ในช่วง 0.08-2.00 และ 0.02-1.00 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ ส่วนตัวอย่าง NIT48 ค่าอยู่ในช่วง 0.03-2.00 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงมาก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึง 100 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 2

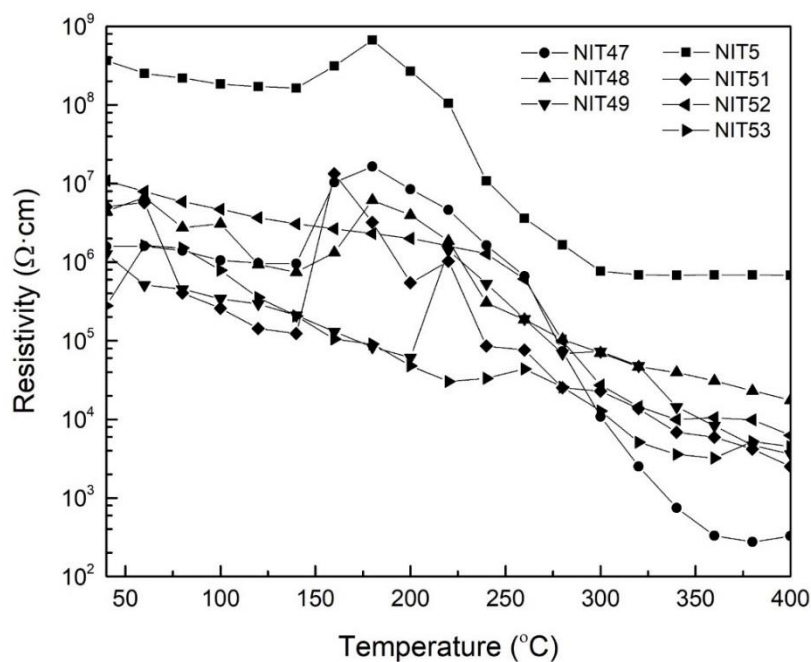
จากรูปที่ 4.17 พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 2 ที่มีอินเดียมเกินในองค์ประกอบมีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสูงกว่าตัวอย่าง NIT5 อย่างเห็นได้ชัด แต่ไม่มากเท่า ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ย่อย 1 ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ เมื่อความเข้มข้นของอินเดียมที่องค์ประกอบทางเคมีที่เกินเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ตัวอย่าง NIT51 มีค่าอยู่ในช่วง 19000-30000 ตัวอย่าง NIT52 มีค่าอยู่ในช่วง 12000-14000 และ ตัวอย่าง NIT53 มีค่าอยู่ในช่วง 9000-11000 ในทำนองเดียวกันค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของอินเดียมที่องค์ประกอบทางเคมีเกินเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวอย่าง NIT51 มีค่าอยู่ในช่วง 0.04-2.00 ตัวอย่าง NIT52 มีค่าอยู่ในช่วง 0.04-2.00 และ ตัวอย่าง NIT53 มีค่าอยู่ในช่วง 0.03-0.4 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบตัวอย่าง NIT5, NIT51 และ NIT52 จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่าง NIT53 ที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงที่สุดในกลุ่มนี้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึง 120 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นหลังจากนี้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมองภาพรวมของตัวอย่าง NIT53 พบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยที่สุดของกลุ่มนี้

ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 ทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

ชื่อย่อ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก
NIT47	27837	0.12
NIT48	22345	0.21
NIT49	29815	0.15
NIT51	16762	0.17
NIT52	12281	0.15
NIT53	13556	0.08

#### 4.2.2.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้า

นำตัวอย่างเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการทำขั้วเงินเรียบร้อยแล้ว วัดค่ากระแสและความต่างศักย์ด้วยเครื่อง Picoammeter ที่อุณหภูมิห้องถึง 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์สภาพต้านทานเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวอย่างของกลุ่มที่ 2

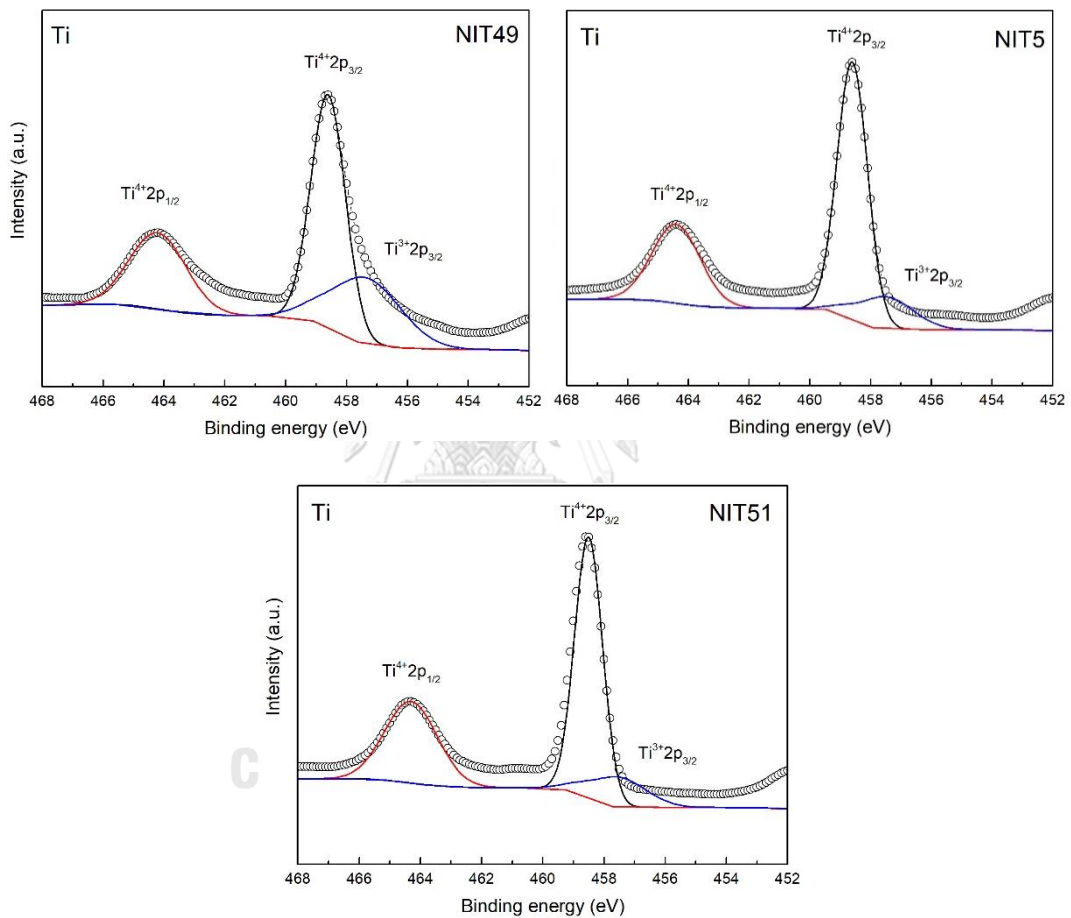
จากรูปที่ 4.18 พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ทุกตัวอย่างมีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าต่ำกว่า ตัวอย่าง NIT5 อย่างชัดเจน ตัวอย่าง NIT47 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $1.58 \times 10^6$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $3.26 \times 10^2$  โอห์ม·เซนติเมตร ตัวอย่าง NIT48 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $4.47 \times 10^6$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $1.76 \times 10^4$  โอห์ม·เซนติเมตร ตัวอย่าง NIT49 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $1.26 \times 10^6$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $3.61 \times 10^3$  โอห์ม·เซนติเมตร ตัวอย่าง NIT51 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $5.07 \times 10^6$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $2.52 \times 10^3$  โอห์ม·เซนติเมตร ตัวอย่าง NIT52 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $1.08 \times 10^7$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $6.23 \times 10^3$  โอห์ม·เซนติเมตร และ ตัวอย่าง NIT53 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $2.79 \times 10^5$  โอห์ม·เซนติเมตร และ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $4.50 \times 10^3$  โอห์ม·เซนติเมตร เนื่องจากความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกพบว่า ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าตัวอย่าง NIT5 จึงมีค่าสภาพต้านทานต่ำ จากความเข้มข้นของอินเดียมออกไซด์ในกลุ่มที่ 2 ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับสภาพต้านทานทางไฟฟ้า

ตารางที่ 4.8 แสดงสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2

หมายเลข	สัดส่วนองค์ประกอบ	สภาพต้านทานไฟฟ้า( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
NIT47	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.47})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$1.58 \times 10^6$
NIT48	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.48})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$4.47 \times 10^6$
NIT49	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.49})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$1.26 \times 10^6$
NIT51	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.51})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$5.07 \times 10^6$
NIT52	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.52})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$1.08 \times 10^7$
NIT53	$(\text{Nb}_{0.50}\text{In}_{0.53})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$2.79 \times 10^5$

#### 4.2.3 การทดสอบเคมีพื้นผิวของชิ้นงานด้วย XPS

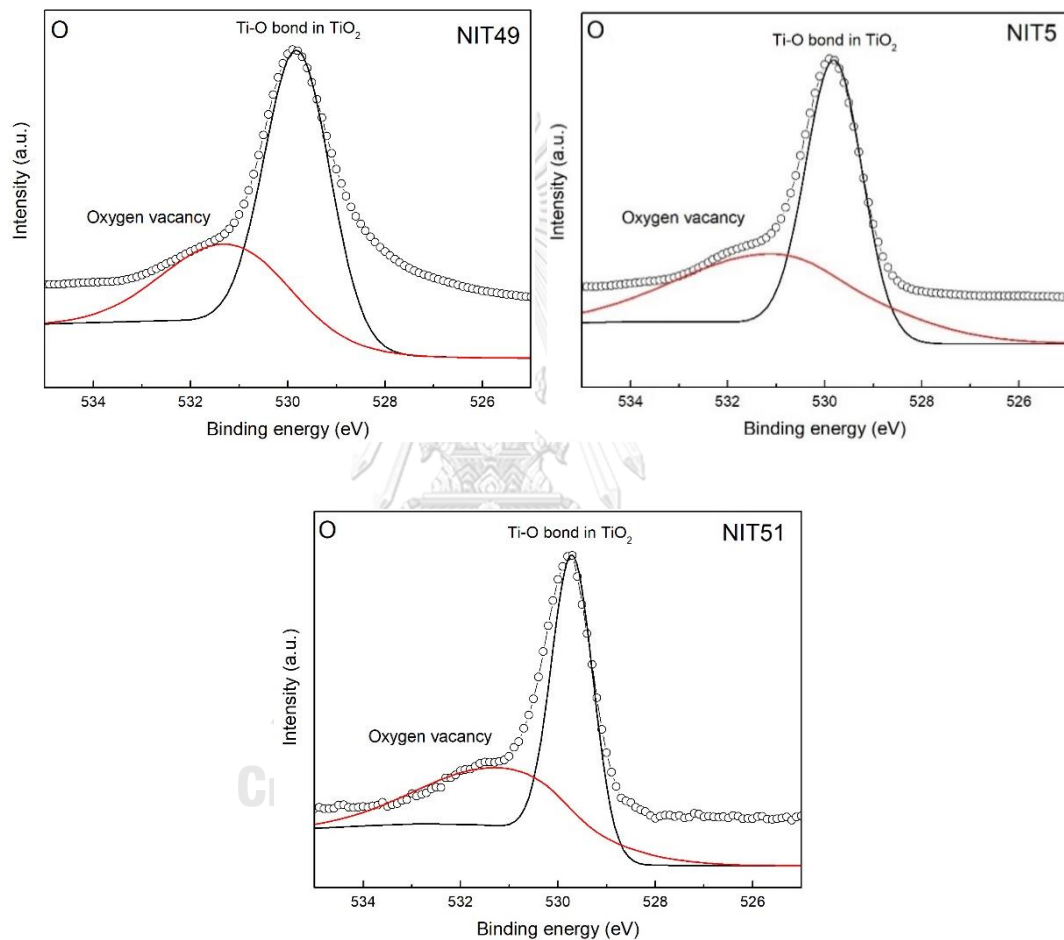
โดยทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบย่อยคือการวิเคราะห์สเปกตรัมของ Ti2p และ O1s เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ และ ไอออนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งได้ทำการเลือกตัวอย่าง 3 ตัวอย่างนำมาทดสอบนั้นคือ NIT49, NIT5 และ NIT51 เนื่องจากมีสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ดีที่สุดของตัวอย่างที่อื่นเดิมขาดและเกินโดยมีผลวิเคราะห์ดังนี้



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของ Ti2p scan ในพื้นผิวของตัวอย่าง NIT49, NIT5 และ NIT51

รูปที่ 4.19 แสดงการทดสอบเคมีพื้นผิว Ti2p ของตัวอย่าง NIT49, NIT5 และ NIT51 สังเกตได้ว่าทั้ง 3 ตัวอย่างแสดงพีคของ Ti<sup>4+</sup> 2p<sub>1/2</sub> ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 464.5 eV และ Ti<sup>4+</sup> 2p<sub>3/2</sub> ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 458.6 eV และที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 457.5 eV นั่นคือพีคของ Ti<sup>3+</sup> 2p<sub>3/2</sub> นั้นหมายความว่านอกจาก Ti<sup>4+</sup> ที่พบในตัวอย่างทั้งสามแล้ว ยังพบ Ti<sup>3+</sup> ได้ โดยมีความหนาแน่นคือ 27.14%, 13.26% และ 12.71% ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของ Ti<sup>3+</sup>

ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอินเดียมที่ใช้เจือ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต พบว่าตัวอย่าง NIT49 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าตัวอย่าง NIT5 และ NIT51 เป็นอย่างมาก คือ 29,815 ซึ่งตัวอย่าง NIT5 มีค่า 8,172 และ ตัวอย่าง NIT51 มีค่า 16,762 เนื่องจากตัวอย่าง NIT5 และ NIT51 มีความหนาแน่น  $Ti^{3+}$  น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Hu และคณะ<sup>[34]</sup> ได้กล่าวว่า  $Ti^{3+}$  ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของ O1s scan ในพื้นผิวของตัวอย่าง NIT49, NIT5 และ NIT51

รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบเคมีพื้นผิวของ O1s ของตัวอย่าง NIT49, NIT5 และ NIT51 พบว่าทั้ง 3 ตัวอย่างมีลักษณะ และ ตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นคล้ายกัน โดยที่ลักษณะของพีคจะมีการทับซ้อนกันของพีค 2 พีค นั่นคือ ที่บริเวณ 531.1 eV คือพีคของตำหนิของช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy) ที่บริเวณ 529.9 eV คือพีคของออกซิเจนที่ทำพันธะกับ ไทเทเนียม (Ti) คือ



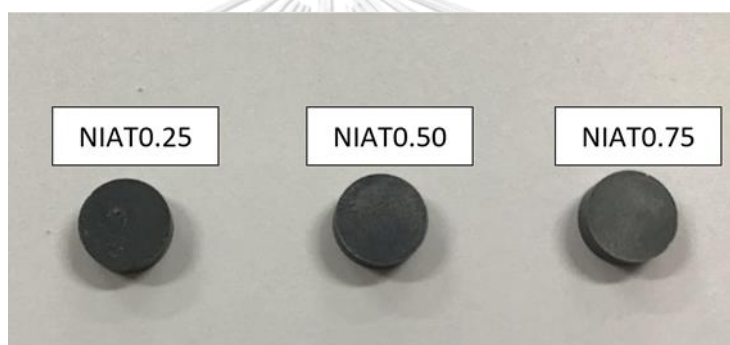
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ผนังแบบรูไทล์ (Rutile) เมื่อสังเกตจากพีคของตำหนิช่องว่างออกซิเจนพบว่า ตัวอย่าง NIT49 และ NIT51 มีตำหนิของช่องว่างออกซิเจนน้อยกว่าตัวอย่าง NIT5 มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงที่สุดที่อุณหภูมิห้องความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต คือ 0.15 และ 0.17 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง NIT5 พบว่ามีตำหนิของช่องว่างออกซิเจนมากที่สุดได้แสดงค่ามีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยที่สุดคือ 0.08 สังเกตได้ว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับสมดุลประจุของตัวอย่างเนื่องจากตัวอย่าง NIT5 มีการเจือไนโอเบียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นผู้ให้ และการเจืออินเดียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นผู้รับ ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ถ้าการเจือไม่มีความสมดุลประจุเหมือนกับตัวอย่าง NIT49 และ NIT51 แม้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงขึ้นแต่ไม่สามารถควบคุมค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกให้มีค่าน้อยได้



### 4.3 กลุ่มที่ 3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยที่อะลูมิเนียมออกไซด์มีความเข้มข้นน้อยกว่ากลุ่มที่ 3

จากตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 ได้ทำการเลือกตัวอย่าง NIT5 เพราะว่ามีสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ดี โดยได้เลือกใช้อะลูมิเนียมเจือร่วมกับไนโอเบียมและอินเดียม เพราะว่าอะลูมิเนียมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับอินเดียม เพราะฉะนั้นการเกิดตำหนิคาดว่ามีความคล้ายการเจือด้วยอินเดียม เนื่องจากรัศมีไอออนของ  $Al^{3+}$  มีความแตกต่างจากรัศมีไอออนของ  $Ti^{4+}$  มากกว่ารัศมีไอออนของ  $In^{3+}$  ดังนั้นในตัวอย่างกลุ่มที่ 3 จึงใช้อะลูมิเนียมที่มีความเข้มข้นน้อยเจือร่วมกับไนโอเบียมและอินเดียม ซึ่งถ้าสามารถเจือจะทำให้เกิดตำหนิการเข้าไปแทนที่  $Ti^{4+}$  ของ  $Al^{3+}$  จะทำให้ขั้วคู่ในแต่ละโมเลกุลมีค่ามากกว่าการเจือด้วยอินเดียมส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น

#### 4.3.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างกลุ่มที่ 3 หลังจากเผาผนึก

จากรูปที่ 4.21 ตัวอย่าง NIAT25, NIAT50 และ NIAT75 มีสีดำ ชี้นงานมีสีเปลี่ยนไปเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเปลี่ยนไป

##### 4.3.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์

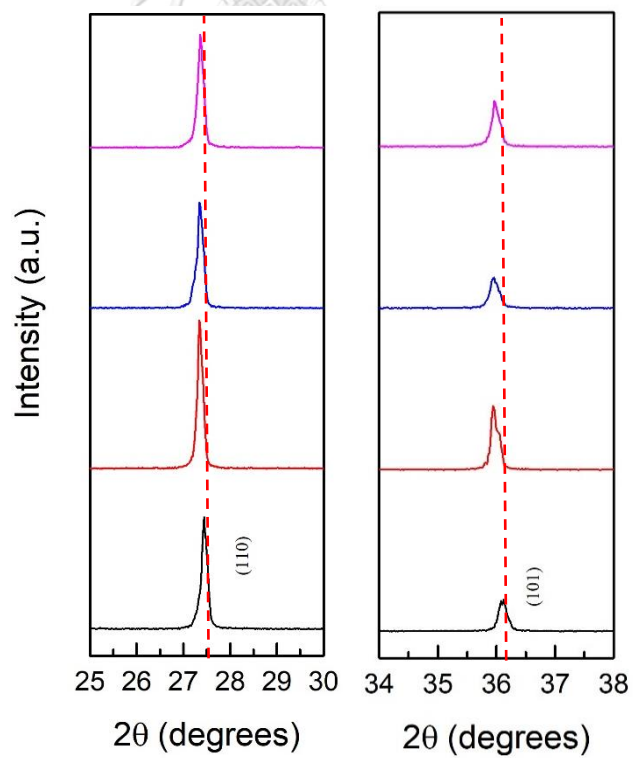
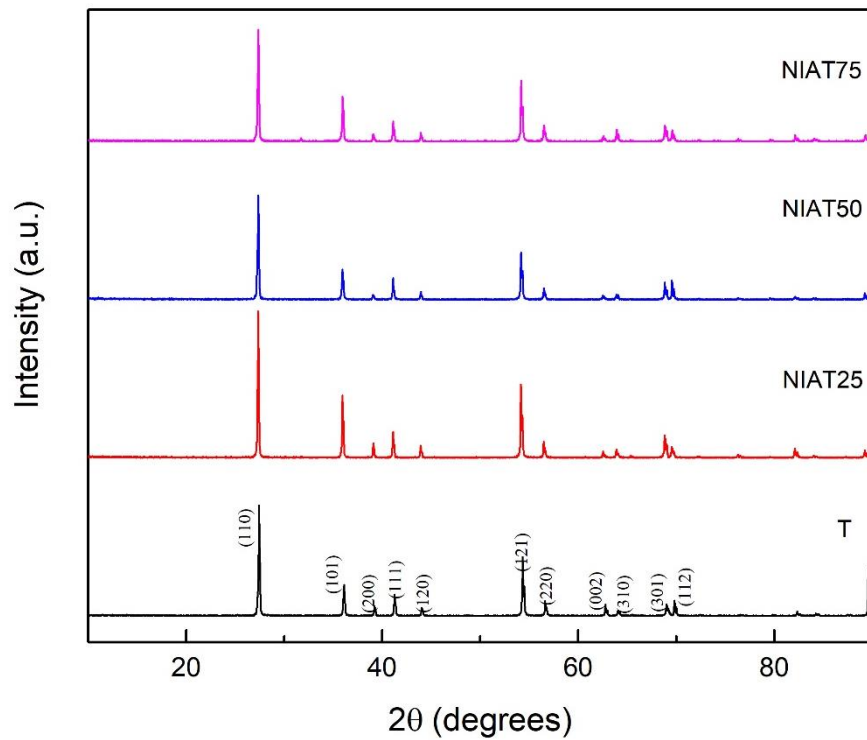
เมื่อได้ตัวอย่างเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำมาทดสอบความหนาแน่น ด้วยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C373 - 14a โดยนำไปต้มน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่น ศึกษาแต่ละระบบของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3 ดังตารางที่ 4.9 ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างกลุ่มที่ 3 ทุกตัวอย่าง มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นกว่าตัวอย่าง T ส่วนความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในกลุ่มที่ 3 นั้น ส่งผลต่อความหนาแน่น พบว่าตัวอย่าง NIAT25 มีความหนาแน่นมากที่สุดในกลุ่มที่ 3

ตารางที่ 4.9 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3

หมายเลข	สัดส่วนองค์ประกอบ	ความหนาแน่น
NIAT25	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.475}\text{Al}_{0.025})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	92.34%
NIAT50	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.450}\text{Al}_{0.050})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	90.76%
NIAT75	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.425}\text{Al}_{0.075})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	91.44%



4.3.1.2 ผลการทดสอบเฟสของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

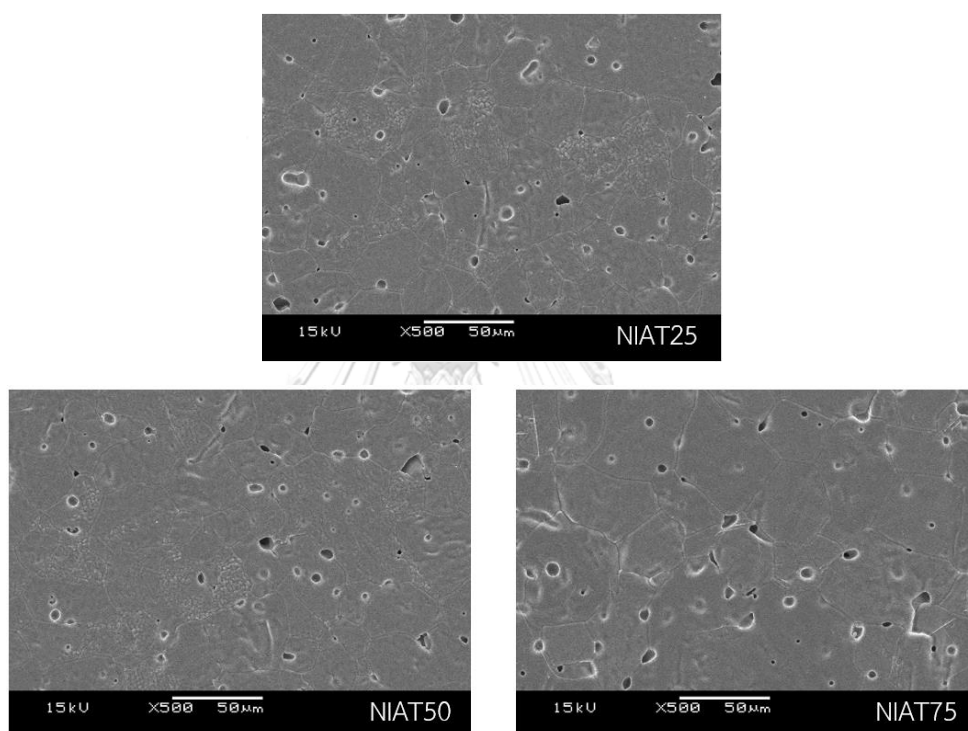


รูปที่ 4.22 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 3

จากรูปที่ 4.22 พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 3 ทุกตัวอย่างมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ผิวกแบบรูโทล์ โดยมีพีคที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ตัวอย่าง NIAT25, NIAT50 และ NIAT75 ที่ระนาบ 110 พีคเคลื่อนไปทางซ้ายเล็กน้อย

#### 4.3.1.3 ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์

นำเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ กลุ่มที่ 3 ที่เตรียมได้มาตรวจสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3

จากรูปที่ 4.23 พบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยของตัวอย่างกลุ่มที่ 3 มีขนาดเล็กที่สุดจากทุกกลุ่มในงานวิจัยนี้จะมีรูพรุนจะเกิดเยอะขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมิเนียม ส่วนขนาดของเกรนเฉลี่ยไม่มีความสัมพันธ์แบบนัยสำคัญกับความเข้มข้นของอะลูมิเนียม

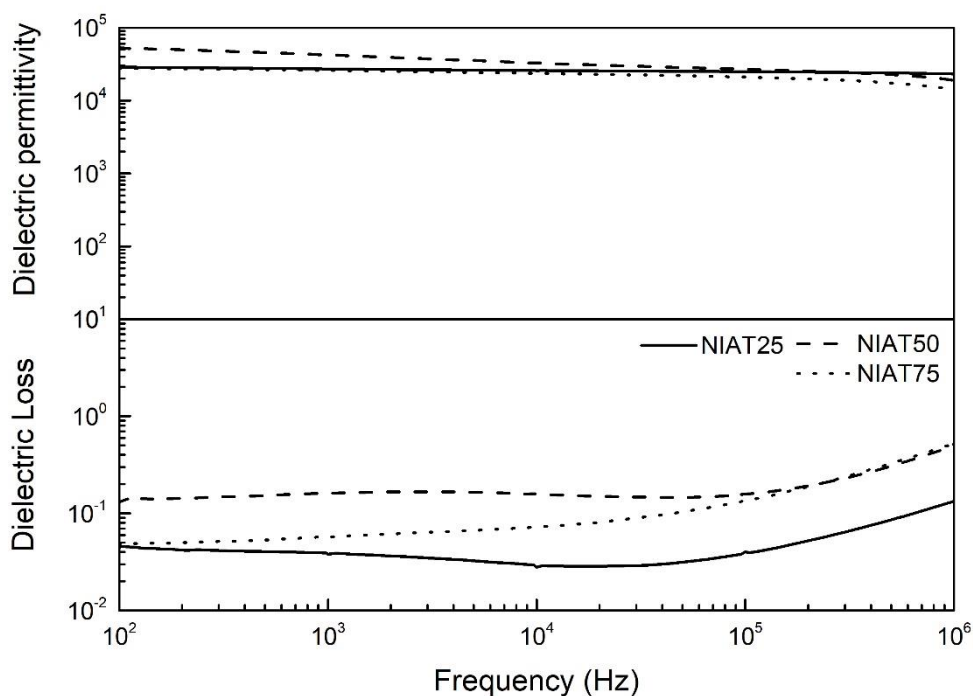
ตารางที่ 4.10 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3

ชื่อย่อ	สัดส่วนองค์ประกอบ	ขนาดเกรนเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
NIAT25	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.475}\text{Al}_{0.025})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$25.94 \pm 2.33$
NIAT50	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.450}\text{Al}_{0.050})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$23.24 \pm 2.90$
NIAT75	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.425}\text{Al}_{0.075})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$40.20 \pm 3.67$

#### 4.3.2 สมบัติทางไฟฟ้าทางของเซรามิกกลุ่มที่ 3

##### 4.3.2.1 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและความถี่

นำตัวอย่างเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3 ที่มีการทำขั้วเงินเรียบร้อยแล้วมาตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่จาก  $10^2$ - $10^6$  เฮิรต

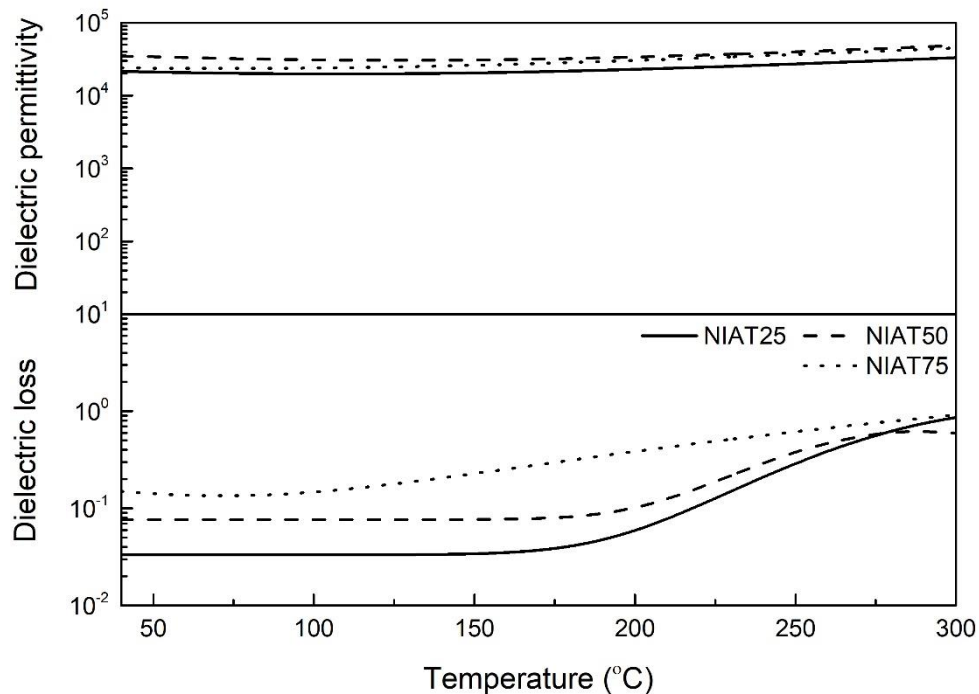


รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 3

พบว่าตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างมากในทุกตัวอย่าง จากตัวอย่าง NIAT50 พบมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 42783 ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต มีค่าสูงที่สุดเป็นอันดับสองในงานวิจัยนี้ รองจากตัวอย่าง NT ที่มีการเจือไนโอเบียมออกไซด์เพียงธาตุเดียว ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวอย่าง NIAT25, NIAT50 และ NIAT75 พบว่าไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความถี่ในการทดสอบ ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่ตั้งแต่ความถี่ที่  $10^2$ - $10^4$  เฮิร์ต เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นจะมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่าง NIAT25 มีค่าการสูญเสีย ไดอิเล็กทริกโดยรวมน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้นั้นคือ 0.03-0.10 ที่ความถี่  $10^2$ - $10^6$  เฮิร์ต ปริมาณการเจืออะลูมิเนียมของตัวอย่าง NIAT25, NIAT50 และ NIAT75 ไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบเป็นนัยสำคัญกับสมบัติไดอิเล็กทริก

#### 4.3.2.2 ความสัมพันธ์ทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ

ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ ของตัวอย่างกลุ่มที่ 3

จากรูป 4.25 เป็นการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวอย่างกลุ่มที่ 3 เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของตัวอย่าง NIAT25 และ NITA50 จะคงที่ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ 175 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่าง NIAT75 พบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงจนถึงอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น

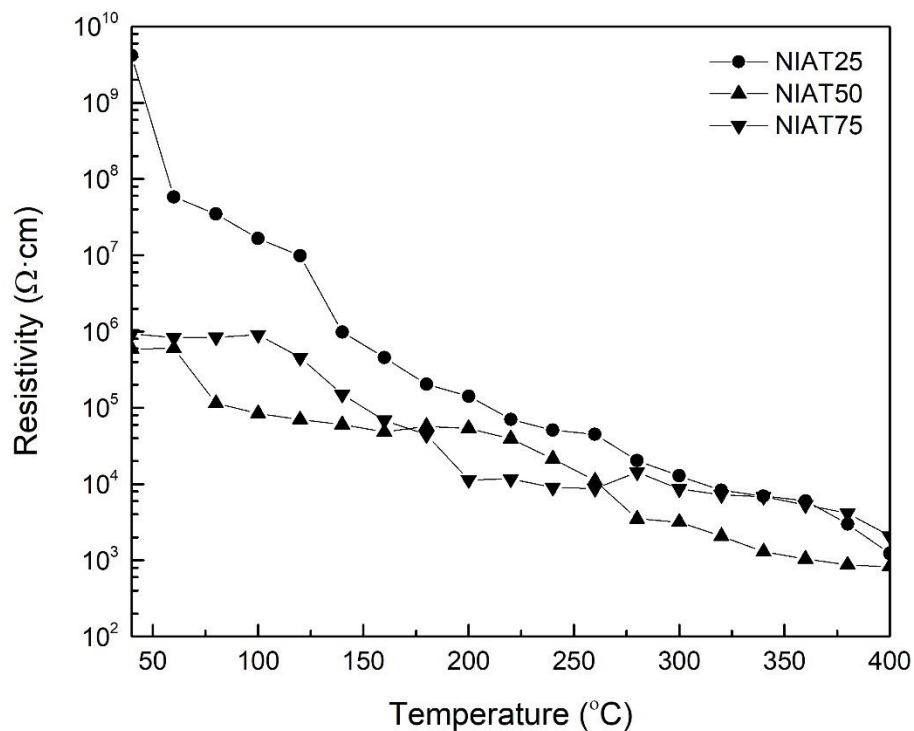
**ตารางที่ 4.11** แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3 ทดสอบที่ อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

ชื่อย่อ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก
NIAT25	27071	0.03
NIAT50	42783	0.15
NIAT75	26180	0.06

#### 4.3.2.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้า

นำตัวอย่างเม็ดเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการทำขั้วเงินเรียบร้อยแล้ว วัดค่ากระแสและความต่างศักย์ ด้วยเครื่อง Picoammeter ที่อุณหภูมิห้องถึง 400 องศาเซลเซียส





รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์สภาพต้านทานเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวอย่างของกลุ่มที่ 3

จากรูปที่ 4.26 พบว่าตัวอย่าง NIAT25, NIAT50 และ NIAT75 มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องมีค่า  $4.16 \times 10^9$ ,  $5.91 \times 10^6$  และ  $9.31 \times 10^6$  ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่า  $1.23 \times 10^3$ ,  $8.25 \times 10^2$  และ  $2.07 \times 10^3$  ตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยตัวอย่าง NIAT50 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดซึ่งจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด ตัวอย่าง NIAT25 ที่อุณหภูมิห้องพบว่ามีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดในกลุ่มที่ 3 ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าเท่ากับตัวอย่าง NIAT50 และ NIAT75

ตารางที่ 4.12 แสดงสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิกไทเทเนียมไดออกไซด์  
กลุ่มที่ 3

ชื่อย่อ	สัดส่วนองค์ประกอบ	สภาพต้านทานไฟฟ้า( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
NIAT25	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.475}\text{Al}_{0.025})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$4.16 \times 10^9$
NIAT50	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.450}\text{Al}_{0.050})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$5.91 \times 10^6$
NIAT75	$(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.425}\text{Al}_{0.075})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$	$9.31 \times 10^6$



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือไนโอเบียม ออกไซด์ ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) อินเดียมออกไซด์ ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งได้ถูกแบ่ง ออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยไนโอเบียม ออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์เพียงธาตุเดียว ( $\text{TiO}_2$ ), ( $\text{Nb}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ), ( $\text{In}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) และ ( $\text{Al}_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) รวมถึง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ และอินเดียมออกไซด์ ( $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-x})(\text{TiO}_2)_{1-x}$ ) โดยที่  $x$  มีค่าเป็น 0.01, 0.05 และ 0.07 กลุ่มที่ 2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่ขาด ( $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียม ออกไซด์ที่เกิน ( $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5+x})_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) โดยที่  $x$  มีค่าเป็น 0.01, 0.02 และ 0.03 กลุ่มที่ 3 ไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $(\text{Nb}_{0.5}\text{In}_{0.5-y}\text{Al}_y)_{0.05}(\text{TiO}_2)_{0.95}$ ) โดยที่  $y$  มีค่าเป็น 0.025, 0.050 และ 0.075 ด้วยวิธีการปฏิกิริยา สถานะของแข็ง (Solid state) โดยมีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ศึกษา โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) ศึกษา โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ตรวจวัดความหนาแน่น ( $\rho$ ) ด้วยหลักการแทนที่น้ำ สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกด้วยและสภาพต้านทานด้วยเครื่อง LCR Meter ซึ่งได้ทำการแบ่งการสรุปออกเป็น 3 กลุ่ม ได้ดังนี้

### 5.1.1 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารประกอบเดี่ยว รวมถึงไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์

1) สามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบ พบว่าการเผาผนึกพบว่าสีของตัวอย่าง T และ IT มีสีขาวอมเหลือง ตัวอย่าง AT มีสีขาว ส่วนตัวอย่าง NT, NIT1, NIT5 และ NIT7 มีสีดำ

2) ผลการทดสอบความหนาแน่นพบว่า การเจือไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่าง NIT1, NIT5 และ NIT7 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือจะทำให้ความหนาแน่นลดลง

3) จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 1 พบว่าตัวอย่าง IT มีเฟสอินเดียมไททาเนต ( $\text{In}_2\text{TiO}_5$ ) และ ตัวอย่าง AT มีเฟสอะลูมิเนียมไททาเนต ( $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ) เกิดขึ้น ซึ่งทั้งเป็นการเจือที่ไม่สมบูรณ์ในไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วนตัวอย่างอื่นพบเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ผิวกูไลต์เพียงอย่างเดียว

4) ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ T ไม่มีรูพรุนบนผิวของตัวอย่าง เกรนมีรูปร่างชัดเจน และมีขนาดใหญ่ที่สุด การเจือไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง และมีรูพรุนเกิดขึ้น

5) ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ พบว่าตัวอย่าง T มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำทุกช่วงความถี่ การเจือไนโอเบียมออกไซด์ เพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นอย่างมากแต่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน การเจืออินเดียมออกไซด์ ทำให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลง การเจืออะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าส่งผลให้สมบัติทางไดอิเล็กทริกแก่ ตัวอย่าง NIT พบว่าสมบัติทางไดอิเล็กทริกดีขึ้นจากตัวอย่าง T เป็นอย่างมาก และ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือจะทำให้สมบัติทางไดอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้น

6) ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ พบว่าทุกตัวอย่างอย่างแสดงพฤติกรรมคล้ายกันคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น

7) จากการทดสอบสภาพต้านทานทางไฟฟ้าพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแปรผกผันกับสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ในส่วนตัวอย่าง NIT1 มีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าสูงที่สุด ถึงแม้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

เล็กทรอนิกส์มีค่าสูงกว่าตัวอย่าง T ตัวอย่าง NIT5 และ NIT7 พบว่ามีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าต่ำกว่า ตัวอย่าง T เล็กน้อย แต่มีค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์มากกว่าเป็นอย่างมาก

5.1.2 การเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไนโอเบียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ โดยที่ความเข้มข้นของอินเดียมออกไซด์ขาด และ เกิน

1) สามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบ พบว่าหลังการเผาผลาญของตัวอย่างในกลุ่มที่ 2 มีสีดำ

2) ผลการทดสอบความหนาแน่นพบว่าตัวอย่างทั้งระบบที่อินเดียมขาด และ อินเดียมเกิน มีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวอย่าง NIT5 ส่วนความเข้มข้นของอินเดียมไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญ

3) จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 2 พบว่าพีคที่เกิดขึ้นเหมือนของตัวอย่าง NIT5 ซึ่งเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบรูไทล์

4) ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคพบว่าระบบที่ขาด อินเดียม ทุกตัวอย่างอย่างจะมีขนาดเกรนที่เล็กกว่าตัวอย่าง NIT5 รูพรุนมีจำนวนน้อยแต่ขนาดใหญ่ ส่วนระบบที่มีอินเดียมเกิน พบว่ารูพรุนมีจำนวนน้อยลงตามความเข้มข้นของอินเดียมที่เกินในระบบ

5) ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ พบว่าตัวอย่างที่อินเดียมขาด และ เกิน มีค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์สูงกว่าตัวอย่าง NIT5 อย่างชัดเจน ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของทุกตัวอย่างอย่างมีค่ามากกว่าตัวอย่าง NIT5

6) ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ พบว่าทุกตัวอย่างอย่างแสดงพฤติกรรมคล้ายกันคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้น

7) จากการทดสอบสภาพต้านทานทางไฟฟ้าพบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ทุกตัวอย่างอย่างมีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าต่ำกว่าตัวอย่าง NIT5 อย่างชัดเจน

8) การทดสอบเคมีพื้นผิวของชิ้นงานด้วย XPS ของตัวอย่าง NIT49, NIT5 และ NIT51 ผลของการทดสอบเคมีพื้นผิว Ti2p scan พบว่า ตัวอย่าง NIT49 มีพบพีคของ  $Ti^{3+}2p_{3/2}$  ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนมากกว่าตัวอย่าง NIT5 และ NIT51 เนื่องจากมีค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์สูงสุด ผลการ

ทดสอบเคมีพื้นผิวของ O1s scan พบว่าตัวอย่างทั้ง 3 มีลักษณะ และ ตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้น คล้ายกันพบพีคของตำหนิของช่องว่างออกซิเจน และ พีคของออกซิเจนที่ทำพันธะกับ ไทเทเนียม

### 5.1.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์

1) สามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3 ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบ พบว่าทุกตัวอย่างเป็นสีดำ

2) จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์กลุ่มที่ 3 ทุกตัวอย่างมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ผิบบรรจุไทล์

3) ผลการทดสอบความหนาแน่นพบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 3 ทุกตัวอย่าง มีความหนาแน่นมากกว่าตัวอย่าง T

4) ผลการทดสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคพบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 3 พบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 4 มีขนาดเล็กที่สุดในงานวิจัยนี้

5) ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ ความถี่ พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 3 พบว่าการเจืออะลูมิเนียมออกไซด์ร่วม มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างมากในทุกตัวอย่าง ตัวอย่าง NIAT25 มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้นั้นคือ 0.03 ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

6) ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก และ อุณหภูมิ พบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 3 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ ในส่วนของค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ

7) จากการทดสอบสภาพต้านทานทางไฟฟ้าพบว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 3 พบว่าตัวอย่าง NIAT25, NIAT50 และ NIAT75 มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำและมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ ไดอิเล็กทริก

### 5.1.4 ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ

จากตัวอย่าง NIAT25 มีความหนาแน่นสูงคือ 92.34% ขนาดเกรนเฉลี่ย 25.94 ไมโครเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงถึง 27071 และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกโดยรวมน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้คือ 0.03-0.10 จึงเหมาะสมนำมาใช้งานเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุชั้น 1 (Class I) เป็น

ระดับที่สูงที่สุดของวัสดุไดอิเล็กทริกเพราะต้องการความเสถียรของสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ - 55 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต้องน้อยกว่า 0.05

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการบดผสมผงก่อนนำไปเผาผนึก รวมถึงเวลาที่ใช้ในการบดผสมผงในทุกตัวอย่าง เพราะว่าส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ และ สมบัติทางไฟฟ้า

2) ควรมีการทดสอบเคมีพื้นผิวของชิ้นงานด้วย XPS ทุกตัวอย่าง เพื่อทำความเข้าใจถึงลักษณะเฉพาะของตำหนิให้ดียิ่งขึ้น



## บรรณานุกรม

1. Krohns, S., et al. 2011. The route to resource-efficient novel materials. Nat Mater 10: 899-901.
2. Li, Y., et al. 2012. Giant dielectric response and charge compensation of Li- and Co-doped NiO ceramics. Materials Science and Engineering: B 177: 673-677.
3. Liu, X., et al. 2015. Origin of anomalous giant dielectric performance in novel perovskite:  $\text{Bi}_{(0.5-x)}\text{La}_x\text{Na}_{(0.5-x)}\text{Li}_x\text{Ti}_{(1-y)}\text{M}_y\text{O}_3$  ( $\text{M} = \text{Mg}^{2+}, \text{Ga}^{3+}$ ). Sci Rep 5: 12699.
4. Zheng, H., et al. 2013. Colossal Permittivity and Variable-Range-Hopping Conduction of Polarons in  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  Ceramic. The Journal of Physical Chemistry C 117: 12966-12972.
5. Li, X., et al. 2014. High pressure treated ZnO ceramics towards giant dielectric constants. J. Mater. Chem. A 2: 16740-16745.
6. Guillemet-Fritsch, S., et al. 2008. Colossal Permittivity in Ultrafine Grain Size  $\text{BaTiO}_{3-x}$  and  $\text{Ba}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{TiO}_{3-x}$  Materials. Advanced Materials 20: 551-555.
7. Allen, N.S., et al. 2018. The effect of crystalline phase (anatase, brookite and rutile) and size on the photocatalytic activity of calcined polymorphic titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ). Polymer Degradation and Stability 150: 31-36.
8. Wypych, A., et al. 2014. Dielectric Properties and Characterisation of Titanium Dioxide Obtained by Different Chemistry Methods. Journal of Nanomaterials 2014: 1-9.
9. Diebold, U. 2003. The surface science of titanium dioxide. Surface Science Reports 48: 53-229.
10. Rani, R.A., et al. 2014. Thin films and nanostructures of niobium pentoxide: fundamental properties, synthesis methods and applications. J. Mater. Chem. A 2: 15683-15703.
11. Kong, X.Y. and Z.L. Wang. 2003. Structures of indium oxide nanobelts. Solid State Communications 128: 1-4.



12. Shirai, T., H. Watanabe, and M. Takahashi. 2009. Structural Properties and Surface Characteristics on Aluminum Oxide Powders. Annual report of the Ceramics Research Laboratory Nagoya Institute of Technology 9: 23-31.
13. SushmaBhat, et al. 1995. <Dielectric studies of lanthanum heptamolybdate crystals grown from.pdf>. Materials Science and Engineering: B 30: 7-11.
14. Brondijk, J.J., et al. 2012. Charge transport in dual-gate organic field-effect transistors. Applied Physics Letters 100:
15. Wu, M., Y.I. Alivov, and H. Morkoç. 2008. High-**K** dielectrics and advanced channel concepts for Si MOSFET. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 19: 915-951.
16. Małachowski, M.J. and J. Źmija. 2010. Organic field-effect transistors. Opto-Electronics Review 18: 121-136.
17. Das, S., et al. 2013. Metal-ion doped p-type TiO<sub>2</sub> thin films and their applications for heterojunction devices. Journal of Alloys and Compounds 553: 188-193.
18. Liu, J., et al. 2013. Influence of VB group doped TiO<sub>2</sub> on photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. Applied Surface Science 277: 231-236.
19. Bourguiba, F., et al. 2016. Effect of iron and tungsten substitution on the dielectric response and phase transformations of BaTiO<sub>3</sub> perovskite ceramic. Journal of Alloys and Compounds 686: 675-683.
20. Buscaglia, M.T., et al. 2006. High dielectric constant and frozen macroscopic polarization in dense nanocrystalline BaTiO<sub>3</sub> ceramics. PHYSICAL REVIEW B 73: 064114.
21. Yu, Y., et al. 2018. Large-size-mismatch co-dopants for colossal permittivity rutile TiO<sub>2</sub> ceramics with temperature stability. Journal of the European Ceramic Society 38: 1576-1582.
22. Dong, W., et al. 2015. Colossal Dielectric Behavior of Ga+Nb Co-Doped Rutile TiO<sub>2</sub>. ACS Appl Mater Interfaces 7: 25321-5.
23. Dong, W., et al. 2017. Colossal permittivity with ultralow dielectric loss in In + Ta co-doped rutile TiO<sub>2</sub>. Journal of Materials Chemistry A 5: 5436-5441.

24. Yang, C., et al. 2017. Colossal permittivity of (Mg + Nb) co-doped TiO<sub>2</sub> ceramics with low dielectric loss. Journal of Materials Chemistry C 5: 5170-5175.
25. Wang, X., et al. 2017. Colossal permittivity and impedance analysis of tantalum and samarium co-doped TiO<sub>2</sub> ceramics. Ceramics International 43: 13349-13355.
26. Tuichai, W., et al. 2017. Very low dielectric loss and giant dielectric response with excellent temperature stability of Ga<sup>3+</sup> and Ta<sup>5+</sup> co-doped rutile-TiO<sub>2</sub> ceramics. Materials & Design 123: 15-23.
27. Song, Y., et al. 2017. Dielectric properties of (Bi<sub>0.5</sub>Nb<sub>0.5</sub>) Ti<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> ceramics with colossal permittivity. Journal of Alloys and Compounds 722: 676-682.
28. Tuichai, W., et al. 2017. High-performance giant-dielectric properties of rutile TiO<sub>2</sub> co-doped with acceptor-Sc<sup>3+</sup> and donor-Nb<sup>5+</sup> ions. Journal of Alloys and Compounds 703: 139-147.
29. Song, Y., et al. 2016. The contribution of doped-Al to the colossal permittivity properties of Al<sub>x</sub>Nb<sub>0.03</sub>Ti<sub>0.97-x</sub>O<sub>2</sub> rutile ceramics. Journal of Materials Chemistry C 4: 6798-6805.
30. Tuichai, W., et al. 2017. Origin(s) of the apparent colossal permittivity in (In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2-x</sub>)Ti<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub>: clarification on the strongly induced Maxwell–Wagner polarization relaxation by DC bias. RSC Advances 7: 95-105.
31. Nachaithong, T., P. Thongbai, and S. Maensiri. 2017. Colossal permittivity in (In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2-x</sub>)Ti<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> ceramics prepared by a glycine nitrate process. Journal of the European Ceramic Society 37: 655-660.
32. Burmeister, C., et al. 2018. Dry grinding in planetary ball mills: Evaluation of a stressing model. Advanced Powder Technology 29: 191-201.
33. Melo, C.C., et al. 2018. A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing. Journal of the European Ceramic Society 38: 2928-2936.
34. Hu, W., et al. 2013. Electron-pinned defect-dipoles for high-performance colossal permittivity materials. Nat Mater 12: 821-6.
35. Zhao, X.G., et al. 2015. Origin of colossal permittivity in (In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)TiO<sub>2</sub> via broadband dielectric spectroscopy. Phys Chem Chem Phys 17: 23132-9.

36. Liu, G., et al. 2016. Colossal permittivity and impedance analysis of niobium and aluminum co-doped TiO<sub>2</sub> ceramics. RSC Advances 6: 48708-48714.
37. Gai, Z., et al. 2014. A colossal dielectric constant of an amorphous TiO<sub>2</sub>:(Nb, In) film with low loss fabrication at room temperature. J. Mater. Chem. C 2: 6790-6795.
38. Li, J., et al. 2014. Microstructure and dielectric properties of (Nb + In) co-doped rutile TiO<sub>2</sub> ceramics. Journal of Applied Physics 116:



## บรรณานุกรมรูปภาพ

1. Haggerty, J.E.S., et al. 2017. High-fraction brookite films from amorphous precursors. Sci Rep 7: 15232.
2. Shashank. (2018). Valence Bond Model For Intrinsic Semiconductors (Online). Available from : <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/valence-bond-model-for-intrinsic-semiconductors/> [2018, December 1]
3. HyperPhysics. (2012). The Doping of Semiconductors (Online). Available from : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/dope.html> [2018, December 1]
4. Dmitri k. ( 2012) . Solid solutions ( Online) . Available from : [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=solid\\_solutions](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=solid_solutions) [2018, December 2]
5. Electrical Engineering (2014). Why aren't wires capacitors? (Online). Available from : <https://electronics.stackexchange.com/questions/98372/why-arent-wires-capacitors> [2018, December 3]
6. Solarbotics (2018). 4700 $\mu$ F 16V Electrolytic Capacitor (Online). Available from : <https://solarbotics.com/product/cp4700uf-16v/> [2018, December 4]
7. Vishay (2018). CAPACITORS - TANTALUM – SOLID (Online). Available from : <https://www.vishay.com/capacitors/tantalum/tantalum-solid/> [2018, December 4]
8. Loudspeakerfreaks (2018). BIPOLAR ROUGH FOIL CAPACITOR 470UF 100V (Online). Available from : [http://loudspeakerfreaks.com/Product.asp?Product\\_ID=8098](http://loudspeakerfreaks.com/Product.asp?Product_ID=8098) [2018, December 5]
9. Capacitorguide ( 2018) . Ceramic Capacitor ( Online) . Available from : <http://www.capacitorguide.com/ceramic-capacitor/> [2018, December 5]

10. Retroamplis (2018). TAD - Gold Cap electrolytic capacitor 32+ 16 uF 500V (Online). Available from : <http://www.retroamplis.com/C-TAD-V-1632500R/en> [2018, December 5]
11. Partco (2018). TRIMMER CAPACITOR 1,8-22pF 150V (Online). Available from : <https://www.partco.fi/en/electronic-components/passives/capacitors/trimmer-capacitors/5466-trim-cap-22.html> [2018, December 5]
12. พจนานุกรม สุวรรณมณี (2557) บทที่ ๖ ไดอิเล็กตริก และตัวเก็บประจุ (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://www.scribd.com/document/250704573บทที่-๖-ไดอิเล็ก-กตริก-และตัวเก-บประจุ> [8 ธันวาคม 2561]
13. Buscaglia, M.T., et al. 2006. High dielectric constant and frozen macroscopic polarization in dense nanocrystalline BaTiO<sub>3</sub> ceramics. PHYSICAL REVIEW B 73: 064114.
14. Burmeister, C., et al. 2018. Dry grinding in planetary ball mills: Evaluation of a stressing model. Advanced Powder Technology 29: 191-201.
15. Melo, C.C., et al. 2018. A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing. Journal of the European Ceramic Society 38: 2928-2936.
16. ResearchGate (2016). A comparative study of different sintering models for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 150V (Online). Available from : [https://www.researchgate.net/figure/Different-stages-of-sintering-1\\_fig3\\_299490787](https://www.researchgate.net/figure/Different-stages-of-sintering-1_fig3_299490787) [9 Dec, 2018]
17. Hu, W., et al. 2013. Electron-pinned defect-dipoles for high-performance colossal permittivity materials. Nat Mater 12: 821-6.
18. Liu, G., et al. 2016. Colossal permittivity and impedance analysis of niobium and aluminum co-doped TiO<sub>2</sub> ceramics. RSC Advances 6: 48708-48714

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ยุทธพิชัย ขำมณี
วัน เดือน ปี เกิด	15 กันยายน 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2558 และเข้าศึกษา ต่อในระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต หลักสูตรเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเดือนมิถุนายน พ.ศ.2558 และสำเร็จการศึกษา ในปีการศึกษาปี 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	65/149 หมู่ 3 ซอย แจ่งวัฒนะ 5 ถนน แจ่งวัฒนะ แขวง ทุ่งสองห้อง เขต หลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210
ผลงานตีพิมพ์	เรื่อง(Title) Physical Properties and Dielectric Properties of (In, Nb) Co-Doped TiO <sub>2</sub> Dielectrics วารสาร (Journal) The First Materials Research Society of Thailand International Conference page 95-102 การประชุม (Conference) The first materials research society of Thailand international conference วันที่ (Date) 31 ตุลาคม-3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560