

อิทธิพลของกรดสเตียริก และโพลิเมทิลเมทาไครเลต ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของ
เซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม

ปริญญานิพนธ์

ของ

อ้อมตะวัน แสงจักรวาล

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2552

อิทธิพลของกรดสเตียริก และโพลิเมทิลเมทาไครเลต ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของ
เซรามิกส์ซึ่งค้่ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม

ปริญญานิพนธ์

ของ

อ้อมตะวัน แสงจักรวาล

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2552

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

อิทธิพลของกรดสเตียริกและโพลิเมทิลเมทาไครเลต ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของ
เซรามิกส์ซึ่งค้่ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม

บทคัดย่อ

ของ

อ้อมตะวัน แสงจักรวาล

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2552

อ้อมตะวัน แสงจักรวาล.(2552).อิทธิพลของกรดสเตียริกและโพลิเมทิลเมทาไครเลต ต่อโครงสร้าง

จุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ซึ่งค้อออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม.ปริญญาโท กศ.ม.

(ฟิลิปปินส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:

อาจารย์ ดร.ธนภรณ์ โตโสภณ ,ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปสกุลสุข

ได้ศึกษาผลของสเตียริกแอซิด (SA) และโพลิเมทิลเมทาไครเลต (PMMA) ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ซึ่งค้อออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม (AZO) โดยตัวอย่างมีส่วนประกอบเป็น $(100-x)$ AZO + x SA และ $(100-x)$ AZO + x PMMA โดยที่ x มีค่าตั้งแต่ 0 1 5 10 และ 25 wt% ตามลำดับ ส่วนผสมต่างๆถูกนำมาเตรียมเป็นเซรามิกส์ด้วยวิธีการผสมออกไซด์แบบดั้งเดิมและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 1,100 และ 1,200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณเท่ากับหรือน้อยกว่า 10 wt% ให้ลักษณะการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นขณะที่การนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีปริมาณการเจือมากกว่า 10 wt% กลับลดลง ส่วนเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA พบว่าการเจือ PMMA ในปริมาณน้อย (1wt%) ให้ลักษณะการนำไฟฟ้าต่ำในทุกอุณหภูมิการเผาผนึก อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึก ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ตัวอย่างที่เจือด้วย SA ทุกตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นและขนาดเกรนเพิ่มขึ้นแต่รูพรุนเปิดลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากอุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันที่ขอบเกรน ปริมาณการเจือของ SA ต่ำทำให้เกรนเติบโต ขณะที่ปริมาณการเจือสูงกว่า 5 wt% จะไปยับยั้งการเติบโตของเกรนซึ่งทำให้ขนาดของเกรนลดลง ในขณะที่ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ทุกตัวอย่างให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าและมีจำนวนรูพรุนเปิดมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือในทุกปริมาณการเจือและอุณหภูมิเผาผนึก โดยจำนวนรูพรุนเปิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเจือมากขึ้น เนื่องจากจำนวนรูพรุนและความหนาแน่นมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ดังนั้นเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ให้ค่าการนำไฟฟ้าดีกว่าเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA เนื่องจากตัวอย่างที่เจือด้วย SA ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าและมีจำนวนรูพรุนเปิดน้อยกว่าตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA

INFLUENCE OF STEARIC ACID AND POLYMETHYLMETHACRYLATE ON
MICROSTRUCTURE AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM DOPED ZINC OXIDE
CERAMICS

AN ABSTRACT
BY
AOMTAWAN SANGJAKRAWAN

Presented in Partial Fulfillment on the Requirements For the
Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
December 2009

Aomtawan Sangjakrawan. (2009). *Influence of Stearic acid and Polymethylmethacrylate on microstructure and electrical properties of Aluminium doped Zinc oxide ceramics*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate school, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Thanaporn Tohsophon , Assist. Prof. Bantha Silskulsuk.

Effect of stearic acid (SA) and Polymethylmethacrylate (PMMA) on microstructure and electrical properties of Zinc oxide ceramics doped Aluminium (AZO) were examined. Specimens with composition of $(100-x)$ AZO + x SA and $(100-x)$ AZO + x PMMA , where x varied from 0, 1, 5, 10 and 25 wt% were prepared by a conventional mixed oxide method and sintered at a temperature of 1,000, 1,100 and 1,200 °C for 2 hours. Current-Voltage characteristics of all specimens of AZO ceramics doped SA and PMMA were investigated. The specimens with SA doping level of equal or less than 10 wt% show a good conductive characteristic as the sintering temperature increase. While the conductivity of specimens with doping level more than 10 wt% is found to decrease as increasing the sintering temperature. For AZO ceramics doped PMMA was found that the specimens with less doping level (1 wt%) show low conductive characteristic with all sintering temperature. However, the conductivity is enhanced with higher doping level as increasing the sintering temperature. In addition, specimens with SA doping give rise density and grain size but low open porosity as the sintering temperature is increased. This effect can be explained by considering the high sintering temperature promotes interconnect at grain boundary. Low doping level of SA promote grain growth while higher doping content of more than 5 wt% acts as a grain growth inhibitor that reduce the grain size. While all sintered specimens with PMMA doping give lower density but higher open porosity than the undoped one. As increasing PMMA doping level, open porosity is increased. Due to amount of porosity and density has influence on microstructure and electrical properties of AZO ceramics doped SA and PMMA. Therefore, specimens with SA doping show better conductivity than one with PMMA doping because of their higher density and lower open porosity.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ดร.ธนภรณ์ โตโสภณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อ. ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และ ผศ.ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และให้คำแนะนำแก้ไขเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้อบรม ให้ความรู้ผู้วิจัยในรายวิชาต่างๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณณัฐยา ต๊ะวิไชย ที่คอยให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรมอริจิน (Origin program) และขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์โทรเซรามิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ให้ฝึกทำการทดลองการเตรียมเซรามิกส์

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจให้กันและกันเสมอ

ท้ายที่สุดขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆทุกคนที่ทำให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา

อ้อมตะวัน แสงจักรวาล

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO Al ₂ O ₃ SA และ PMMA.....	6
ข้อมูลเบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์.....	6
ข้อมูลเบื้องต้นของอลูมิเนียมออกไซด์.....	7
ข้อมูลเบื้องต้นของกรดสเตียริก.....	8
ข้อมูลเบื้องต้นของโพลิเมทิลเมทาไครเลต.....	9
การแพร่ของอะตอมในของแข็ง.....	10
สารกึ่งตัวนำ.....	11
สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์.....	12
สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์.....	13
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	13
สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	13
การนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃).....	15
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	17
ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก.....	17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
กระบวนการทำเซรามิกส์.....	18
การบดย่อยด้วยลูกบด.....	18
การอัดผง.....	20
กระบวนการที่อุณหภูมิสูง.....	21
การขัด.....	24
การทำขั้วไฟฟ้า.....	24
การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	25
สมบัติทางกายภาพ.....	25
ความหนาแน่น.....	25
ความเป็นรูพรุน.....	26
การหดตัวหลังการเผา.....	27
สมบัติทางไฟฟ้า.....	27
สภาพนำไฟฟ้า.....	27
สภาพต้านทานไฟฟ้า.....	31
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	32
ลักษณะการใช้งาน SEM.....	34
สัญญาณแบบต่างๆ.....	34
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	34
กฎของแบรกก์.....	35
เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	38
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	44
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	46
กระบวนการทำเกรนเซรามิกส์.....	46
การเตรียมผง.....	46
การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	47
การตกแต่งชิ้นงาน.....	48
วิธีการวัดสมบัติทางกายภาพ.....	48
วิธีการวัดสมบัติทางไฟฟ้า.....	48
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	51
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	52
ผลการทดลองและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเม็ดเซรามิกส์.....	52
การตรวจวิเคราะห์ลักษณะทั่วไปของเซรามิกส์ที่เตรียมได้.....	52
ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกส์.....	56
การหดตัว.....	58
ความเป็นรูพรุน.....	60
โครงสร้างจุลภาค.....	62
โครงสร้างผลึก.....	66
คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	72
ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	72
สภาพนำไฟฟ้า.....	78

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	81
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	81
ข้อเสนอแนะ.....	82
 บรรณานุกรม.....	 83
 ภาคผนวก.....	 88
 ประวัติย่อผู้วิจัย.....	 93

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงอัตราส่วนสารเคมีและปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมผง 100 g.....	46
2 แสดงค่าคงที่ผลึกของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,100 °C.....	71
3 แสดงค่าคงที่ผลึกของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,000 °C และ 1,200 °C...	71
4 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	76
5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	77

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 (ก) โครงสร้างของ ZnO แบบเฮกซะโกนอลเวทช์ไซด์ (ข) แบบรีคซอลต์.....	7
2 โครงสร้างของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3).....	7
3 โครงสร้างของกรดสเตียริก (SA).....	8
4 แสดงโครงสร้างของโพลิเมทิลเมทาไครเลต(PMMA).....	9
5 การแพร่ตำแหน่งว่างหรือแทนที่.....	10
6 แสดงการละลายของแข็งแบบแทรก.....	10
7 แสดงช่องว่างแถบพลังงานของสารที่เป็นไดอิเล็กทริก กึ่งตัวนำและโลหะ.....	11
8 แสดงคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน.....	12
9 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor).....	13
10 แสดงตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน.....	14
11 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	14
12 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	15
13 แสดงการนำไฟฟ้าของ (ก) ZnO (ข) AZO.....	16
14 แสดงแถบพลังงานของ (ก) ZnO (ข) AZO.....	16
15 ทิศทางของแรงต่อสารเพียโซอิเล็กทริก.....	18
16 (ก) ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอลล (ball-mill)(ข) แสดงลักษณะพฤติกรรมการบดย่อยแบบเลื่อนหล่นกันไป (Cascading).....	19
17 แสดงพัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการเผาผนึกแบบสถานะของแข็ง (ก) อนุภาคฝังยัดกันอยู่แบบหลวมๆหลังการอัดขึ้นรูป (ข) การเผาผนึกช่วงเริ่มต้น (ค) การเผาผนึก ช่วงกลาง และ(ง) การเผาผนึกช่วงสุดท้าย.....	23
18 การนำไฟฟ้าในแท่งสารกึ่งตัวนำ.....	28
19 ประจุอิสระวิ่งในเส้นลวดตัวนำ.....	29
20 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM.....	33
21 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์.....	36
22 ส่วนประกอบของเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	38

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 องค์ประกอบและแนวรังสีเอ็กซ์บนโกนอิโอมิเตอร์.....	38
24 แสดงการเกิดรูปพูนภายในโครงสร้างของเซรามิกส์ PZT.....	43
25 แผนผังการเผาผนึกเกรนเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA/PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	47
26 (ก) แสดงการต่อวงจรการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ (ข) แสดงการต่อวงจรการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ในกรณีที่ใช้เซรามิกส์ มีความต้านทานต่ำ.....	49
27 แสดงการเตรียมเซรามิกส์ก่อนนำไปวัดโครงสร้างจุลภาค.....	50
28 แสดงเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เเผาผนึกที่ อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	54
29 แสดงเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	55
30 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	57
31 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	57
32 แสดงการหดตัวของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25wt% เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	59
33 แสดงการหดตัวของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25wt%เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	59
34 แสดงรูปพูนเปิดของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt%เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	61
35 แสดงรูปพูนเปิดของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25wt% เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	61

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
36 แสดงภาพถ่าย SEM (กำลังขยาย 10,000 เท่า) ของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	63
37 แสดงภาพถ่าย SEM (กำลังขยาย 10,000 เท่า) ของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	64
38 แสดงขนาดของเกรนของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0, 1, 5, 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	65
39 แสดงขนาดของเกรนของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0, 1, 5, 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	65
40 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,100 °C.....	67
41 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,100 °C.....	68
42 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	69
43 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	70
44 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	74
45 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C.....	75
46 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ.....	80
47 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ...	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทกับการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก ทั้งทางด้านการสื่อสารโทรคมนาคม การทหาร การแพทย์ การเกษตรและการประมง การค้าการลงทุนรวมถึงทางด้านอุตสาหกรรมล้วนแต่อาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นเครื่องมือเพื่อช่วยให้งานมีประสิทธิภาพและรวดเร็วยิ่งขึ้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ส่วนใหญ่มักผลิตจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำนี้ได้เริ่มต้นขึ้นตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 จากนั้นมา ก็มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำเรื่อยมา สารกึ่งตัวนำบางอย่างต้องอาศัยการเตรียมจากองค์ประกอบที่มีเจือปนพิเศษ (มักไม่พบตามธรรมชาติ) ซึ่งกระบวนการในการเตรียมนั้นอยู่ภายใต้การควบคุมด้วยเงื่อนไขหลายประการและก่อให้เกิดรูปแบบที่ซับซ้อนเต็มไปด้วยคุณสมบัติที่เฉพาะเจาะจง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมบัติทางไฟฟ้า ความสำเร็จที่เห็นได้ชัดก็คือ การทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเล็กลง มีน้ำหนักเบา ราคาลดลง แต่ยังคงประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดี สารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันดีคือสารกึ่งตัวนำพวกซิลิคอน (Silicon : Si) และเจอร์มาเนียม (Germanium : Ge) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบของธาตุหมู่ 2 และหมู่ 6 เช่น ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO) สารประกอบของธาตุในหมู่ 3 และหมู่ 5 เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide : GaAs) และได้มีการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ออกไซด์ของพวกโลหะนั้นมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้ถ้านำออกไซด์ของโลหะหลายชนิดมาผสมกัน โดยใช้ออกไซด์ของโลหะหนึ่งเป็นสารหลักและเติมออกไซด์ของโลหะชนิดอื่นลงไปปริมาณเล็กน้อย

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวาง มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวทซ์ไซต์ (Hexagonal wurtzite) และเมื่อมีการเจือสารอื่นลงไป ในโครงสร้างของ ZnO จะทำให้โครงสร้างเดิมมีการเปลี่ยนแปลงและส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของ ZnO โดยเฉพาะสมบัติทางไฟฟ้า¹

¹ ณัฐยา ต๊ะวิไชย. (2548). โครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์สังกะสีออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์. หน้า 18.

ซางและฮาน (Yongheng Zhang; & Juan Han) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกส์ ZnO ที่เจือด้วยออกไซด์ของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide : Al_2O_3) พบว่า ZnO ที่เจือด้วย Al_2O_3 ($\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3$: AZO) จะให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลงและเกรน (Grain) มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งหมายความว่าเซรามิกส์ที่ได้จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี¹

ซาง; ลี; และโปปิง ซาง (H.L Zhang; Jing-Feng Li; & Bo-Ping Zhang) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ PZT (Lead zirconium titanate : PZT) ที่มีรูพรุนต่างกันจากการเติมกรดสเตียริก (Stearic acid : SA) และโพลีเมทิลเมทาไครเลต (Polymethyl methacrylate : PMMA) พบว่าความเป็นรูพรุนของเซรามิกส์ PZT ที่ได้จากการเติม SA ให้ค่าความเป็นรูพรุนและมีรูพรุนเปิดมากกว่าเซรามิกส์ PZT ที่ได้จากการเติม PMMA ดังนั้นจึงมีโอกาที่จะเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างเกรนได้มากยิ่งขึ้น ส่วนสมบัติทางไฟฟ้า คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant : ϵ_r) พบว่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นมากกว่า 35 % ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมต่อกันระหว่างขอบเกรนของรูพรุน ดังนั้นสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ PZT ขึ้นกับความเป็นรูพรุน²

ในปัจจุบันมีการนำเซรามิกส์มาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย อาทิ นำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ซึ่งให้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและปราศจากมลพิษ จึงเป็นทางเลือกที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นๆ ตัวอย่างของเซลล์เชื้อเพลิงเช่นเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์ (Solid oxide fuel cell : SOFC) เป็นอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากการออกซิไดซ์ (Oxidize) ของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์มี 3 ส่วน คือ ขั้วไฟฟ้าแอโนด ขั้วไฟฟ้าแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ซึ่งอยู่ตรงกลาง โดยออกซิเจนจะผ่านเข้าทางขั้วไฟฟ้าแคโทดและไฮโดรเจนจะผ่านทางขั้วไฟฟ้าแอโนด วัสดุที่นำมาทำขั้วไฟฟ้าควรนำกระแสไฟฟ้าได้ดีและมีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อให้แก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนไหลผ่านได้ดี³

¹Yongheng Zhang; & Juan Han. (2006, February). *Microstructure and temperature coefficient of resistivity for ZnO ceramics doped with Al_2O_3* . (online).

²H.L. Zhang; Jing-Feng Li; & Bo-Ping Zhang. (2007, October). *Microstructure and electrical properties of porous PZT ceramics derived from different pore-forming agents*. (online).

³Wikipedia. (2007). *Solid oxide fuel cell*. (online).

สำหรับงานวิจัยทางด้านเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ได้ศึกษาและทำการวิจัยทางด้านเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์ ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่มีประสิทธิภาพสูง และคณะวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติร่วมกับหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ได้จัดทำโครงการวิจัยและพัฒนาหน่วยต้นแบบขนาด 1-3 kW ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบ้านและชุมชน (1-3 kW Tubular SOFC Stack for Household Distributed Generator)¹

การนำเซรามิกส์มาทำเป็นขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์ เซรามิกส์ที่นำมาทำขั้วไฟฟ้าควรมีการนำไฟฟ้าที่ดีและมีรูปทรงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งความสนใจไปศึกษาการเตรียมเซรามิกส์ AZO ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีและมีความเป็นรูปทรงสูงโดยการเจือ PMMA และ SA ในปริมาณและอุณหภูมิการเผาผลาญ (Sintering) ที่แตกต่างกัน จากนั้นนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA และ SA เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่เหมาะสมเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าและความเป็นรูปทรงของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA และ SA เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาใช้งานด้านเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

ผลจากการศึกษาเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA และ SA จะเป็นแนวทางเพื่อให้ผู้อื่นนำไปใช้อ้างอิงในการพัฒนาทำเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์ต่อไป

¹ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ:MTEC. (2550). ไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง : พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับวันพรุ่งนี้. (ออนไลน์).

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมเซรามิกสในระบบ $(100-x)$ AZO+ x PMMA โดย $x = 0 \ 1 \ 5 \ 10$ และ $25 \text{ wt\%}$ (wt% คืออัตราส่วนโดยน้ำหนักของ PMMA ต่อน้ำหนักรวม) เมื่อ AZO = $98 : 2 \text{ wt\%}$ ตามลำดับ และระบบ $(100 - x)$ AZO + x SA โดย $x = 0 \ 1 \ 5 \ 10$ และ $25 \text{ wt\%}$ (wt% คืออัตราส่วนโดยน้ำหนักของ SA ต่อน้ำหนักรวม) เมื่อ AZO = $98 : 2 \text{ wt\%}$ ตามลำดับ
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ศึกษาความหนาแน่นโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) และเปอร์เซ็นต์การหดตัว
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD)
4. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และศึกษาขนาดของเกรนโดยใช้วิธีเส้นลากตัด (Linear intercept method)
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกสในระบบ $(100 - x)$ AZO + x PMMA และระบบ $(100 - x)$ AZO + x SA ที่เตรียมได้ โดยศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า
6. ประมวลผลและแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่วัดได้ในรูปของตารางและกราฟ
7. วิเคราะห์และสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

ผลที่ได้จากการศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของเซรามิกส AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA สามารถนำไปอ้างอิงเพื่อเป็นแนวทางพัฒนาในการใช้งานด้านเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์และเป็นแนวทางในการศึกษาวัสดุเซรามิกสอื่นๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในลักษณะเดียวกันต่อไป

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. การเผาผนึก (Sintering) หมายถึง การเชื่อมกลุ่มผงให้แน่นโดยอาศัยความร้อนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมด้วยกลไกต่างๆ บางครั้งเรียกว่า การเผาผนึกหรือการอบผนึก
2. เกรน (Grain) หมายถึง ผลึกแต่ละผลึกในโลหะหรือเซรามิกสที่มีโครงสร้างแบบหลายผลึกหรือมีลักษณะเป็นเม็ด
3. แกรนูล (Granule) หมายถึง ก้อนเล็กๆ
4. เฟส (Phase) หมายถึง ส่วนที่เป็นเนื้อเดียวของระบบซึ่งมีคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีเป็นหนึ่งเดียวกัน

5. สารละลายของแข็ง (Solid solution) หมายถึง สารเนื้อเดียวในสภาพของแข็ง ซึ่งมีองค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป

6. ช่องว่างในผลึก (Vacancy) หมายถึง ข้อบกพร่องของผลึกแบบหนึ่ง มีลักษณะเป็นตำแหน่งที่ว่างในโครงสร้างผลึก

7. กระบวนการเกิดช่องว่าง (Vacancy mechanism) อะตอมที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสูงจะทำให้โครงสร้างผลึกไม่สมบูรณ์เกิดที่ว่างขึ้น การเคลื่อนที่ของอะตอมเดิมจะทิ้งช่องว่างไว้ ดังนั้นการเกิดช่องว่างในผลึกจึงมีทิศสวนทางกับการเคลื่อนที่ของอะตอม

8. ตำหนิแบบช็อตกี (Schottky defect) ตำแหน่งว่างที่เกิดจากไอออนลบหรือไอออนบวกขาดหายไปในผลึก

9. แลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters) หมายถึง ความยาวของด้านกับมุมระหว่างแกนของหน่วยเซลล์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะเฉพาะทางเรขาคณิตของหน่วยเซลล์

10. รูพรุนเปิด (Open porosity) หรือ รูพรุนปรากฏ (Apparent porosity) : P_A คือ อัตราส่วนรูพรุนเปิดต่อปริมาตรทั้งหมด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO Al_2O_3 PMMA และ SA
2. การแพร่ของอะตอมในของแข็ง
3. สารกึ่งตัวนำ
4. ปฏิกิริยาการแผ่รังสีไอเล็กทรอนิกส์
5. กระบวนการทำเซรามิกส์
6. การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า โครงสร้าง

จุลภาคและโครงสร้างผลึก

7. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO Al_2O_3 SA และ PMMA

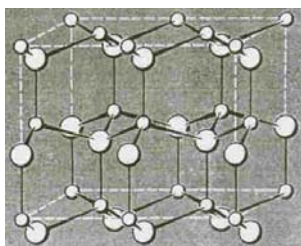
2.1.1 ข้อมูลเบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n - type semiconductor) ลักษณะเป็นผง สีขาว ที่อุณหภูมิห้อง ความหนาแน่น 5.67 g / cm^3 โครงสร้างผลึกของ ZnO เป็นแบบเฮกซะโกนอลเวทซ์ไท์ (Hexagonal wurtzite)¹ ภายในโครงสร้างมีออกซิเจนไอออน (Oxygen ions : O^{2-}) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออน (Zinc ions : Zn^{2+}) ซึ่งทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral)² มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.37 eV จุดหลอมเหลว 1975°C โดยมีค่าคงที่ผลึก a เท่ากับ $3.2531 \text{ \AA}$ (อังสตรอม : $\text{\AA}$) และค่าคงที่ผลึก c เท่ากับ $5.2131 \text{ \AA}$ ภายใต้ความดันสูงโครงสร้างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบร็อคซอลต์ (Rock salt) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวที่แน่นกว่าแบบเฮกซะโกนอล เวทซ์ไท์³ ดังภาพประกอบ 2.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

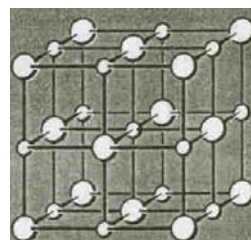
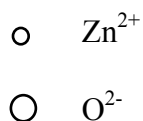
¹ O'Neil ,Maryadele J; et al. (2549). *THE MERCK INDEX an encyclopedia of chemicals,drugs, and biologicals.* p10133.

² Moulson, A.J. ; and Herbert, J.M. (2003). *Electroceramics.* p 156.

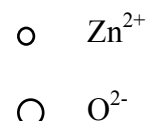
³ ญญา ต๊ะวิไชย. (2548). *โครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์สังกะสีออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์.* หน้า 39.



(ก) Wurtzite (WZ)



(ข) Rocksalt (RS)

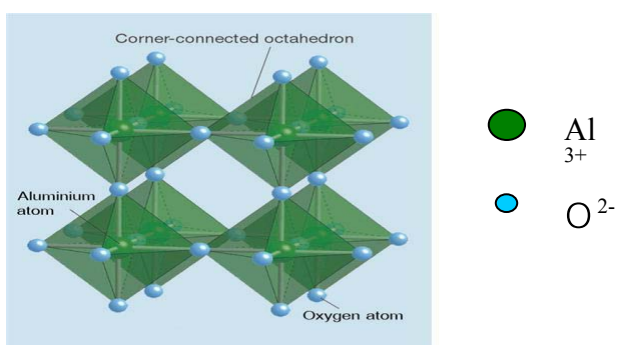


ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของ ZnO (ก) แบบเฮกซะโกนอลเวทไรต์ (ข) แบบร็อกซอลต์

ที่มา : Cotton, F. Albert; Wilkinson, Geoffrey; & Gaus, Paul L. (1997). *Basic Inorganic chemistry*. p.126.

2.1.2 ข้อมูลเบื้องต้นของอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide : Al_2O_3)

อลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) มีสูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (Corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีสิ่งเจือปนในโครงสร้างเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดสีต่างๆ โครงสร้างของ Al_2O_3 ประกอบด้วยพันธะระหว่างอลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าว ต้องใช้พลังงานสูง ทำให้ Al_2O_3 มีความแข็งแรงมาก Al_2O_3 ทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่างๆ ได้ดี และมีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกไฟฟ้าที่ดี¹ โครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะอีดรอล (Hexahedral) ดังภาพประกอบ 2 มีความหนาแน่น 3.976 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว $2,054^\circ\text{C}$ มีค่าคงที่ผลึก $a = 4.758 \text{ \AA}$ และ $c = 12.991 \text{ \AA}$ ²



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

ที่มา : Nature publishing group. (2008). *Aluminium oxide structure*. (online)

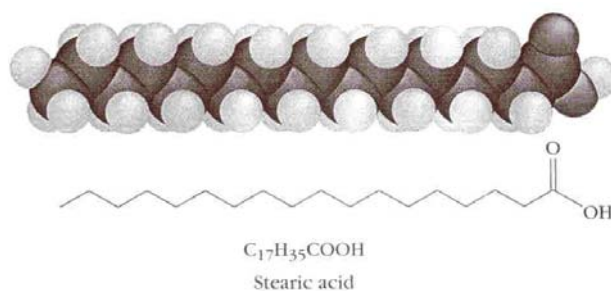
¹สุรศักดิ์ ไททวงษ์สกุล. (2551). อลูมินา. (ออนไลน์).

²IPCS inchem home. (2000). โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะอีดรอล. (ออนไลน์).

2.1.3 ข้อมูลเบื้องต้นของกรดสเตียริก (Stearic acid : SA)

กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง สูตรเคมีคือ $C_{17}H_{35}COOH$ มีลักษณะ เป็นผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์ พบในไขมันพืชและสัตว์ ใช้เป็นส่วนประกอบในการทำยา เครื่องสำอาง¹ มีความหนาแน่น 0.847 g/cm^3 (ที่อุณหภูมิ 70°C) จุดหลอมเหลว 70°C และจุดเดือด 383°C ² โดยมีโครงสร้างดังภาพประกอบ 2.3

SA : ($C_{17}H_{35}COOH$)



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของกรดสเตียริก (SA)

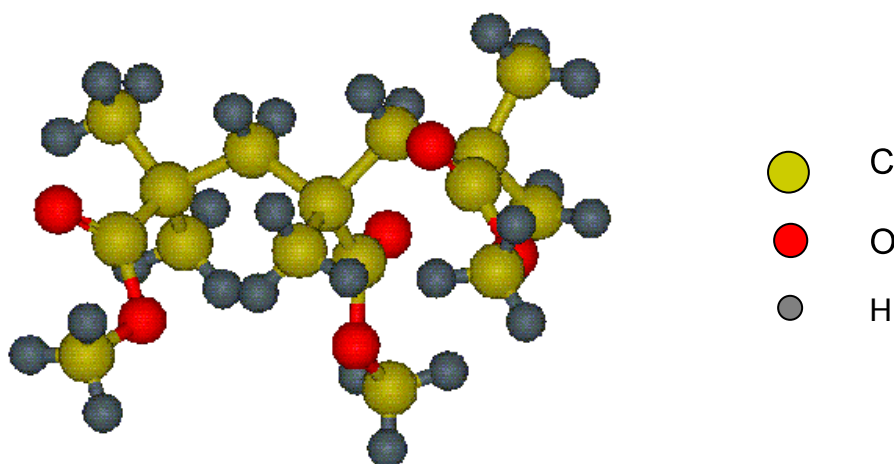
ที่มา : Schmid, George H. (1996). *stearic acid*. p. 677.

¹สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). *กรดสเตียริก*. (ออนไลน์).

²Wikipedia. (2008). *กรดสเตียริก*. (ออนไลน์).

2.1.4 ข้อมูลเบื้องต้นของโพลีเมทิลเมทาไครเลต (Polymethylmethacrylate ;PMMA)

โพลีเมทิลเมทาไครเลต (Polymethylmethacrylate : PMMA) มีสูตรเคมีเป็น $(C_5O_2H_8)_n$ เป็นโพลีเมอร์ที่เปราะบาง แตกง่าย มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับการคัดลอกทางกระจก PMMA ได้รับความสนใจอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะที่พิเศษเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น ความเครียดสูง (High strength) คุณสมบัติพิเศษเชิงแสงสูงและความเสถียรภาพสูง¹ มีจุดเดือดอยู่ที่ 200 °C จุดหลอมเหลวที่ 130 -140 °C และมีความหนาแน่นเป็น 1.19 g/cm³ โดยมีโครงสร้างดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 แสดงโครงสร้างของโพลีเมทิลเมทาไครเลต (Polymethylmethacrylate :PMMA)

ที่มา : Washington. (2006). *Polymethylmethacrylate*. (online).

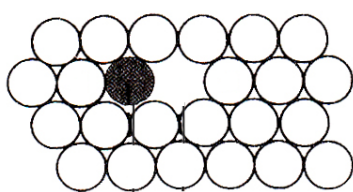
¹Tanoglu,Metin ; & Ergun ,Yelda. (2007, April 1st). *Porous nanocomposites prepared from layered clay and PMMA (Poly(methyl methacrylate))*. pp.318-322.

2.2 การแพร่ของอะตอมในของแข็ง

การแพร่ (Diffusion) หมายถึงกลไกการขนส่งหรือขนถ่ายของสารชนิดหนึ่งผ่านเข้าไปในสารอีกชนิดหนึ่ง การแพร่กระจายของอะตอมในโครงผลึกมีกลไกหลักที่สำคัญ 2 แบบ คือ

1) กลไกการแพร่แบบตำแหน่งว่างหรือแบบแทนที่ (Vacancy or substitutional diffusion mechanisms) อะตอมสามารถเคลื่อนที่ในโครงผลึกจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ ถ้าอะตอมนั้นมีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) อย่างเพียงพอ ซึ่งพลังงานดังกล่าวได้จากการสั่นสะเทือนของอะตอมเนื่องจากความร้อน นอกจากนี้ความไม่สมบูรณ์ในโครงผลึกซึ่งเกิดจากตำแหน่งว่างของอะตอม (Vacancies) ทำให้เกิดการแพร่แบบแทนที่ดังภาพประกอบ 5

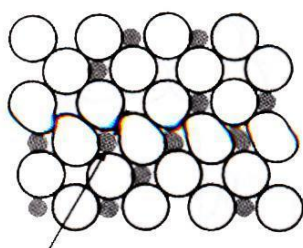
2) กลไกการแพร่แบบแทรก (Interstitial diffusion mechanisms) เกิดขึ้นโดยการที่อะตอมเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งระหว่างอะตอม ดังแสดงในภาพประกอบ 6 โดยวงกลมใหญ่แสดงถึงอะตอมบนระนาบ (100) ของโครงผลึกแบบ FCC ส่วนวงกลมเล็กแสดงถึงการแพร่แบบแทรก (Interstitial atoms) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปยังที่ว่างที่ติดๆกันได้ โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นค่าหนึ่ง กลไกการแพร่แบบนี้จะเป็นไปได้เมื่ออะตอมที่แพร่จะต้องเล็กกว่าอะตอมของผลึก¹



○ อะตอมภายในโครงสร้างผลึก

● อะตอมที่เข้าไปแทนที่อะตอมภายในโครงสร้างผลึก

ภาพประกอบ 5 การแพร่ตำแหน่งว่างหรือแทนที่



○ อะตอมบนระนาบ (100) ของโครงผลึกแบบ FCC

● แสดงถึงอะตอมที่เข้าไปแทรกระหว่างโครงสร้างอะตอม (Interstitial atoms)

Interstitial atoms diffusing into interstitial vacancies.

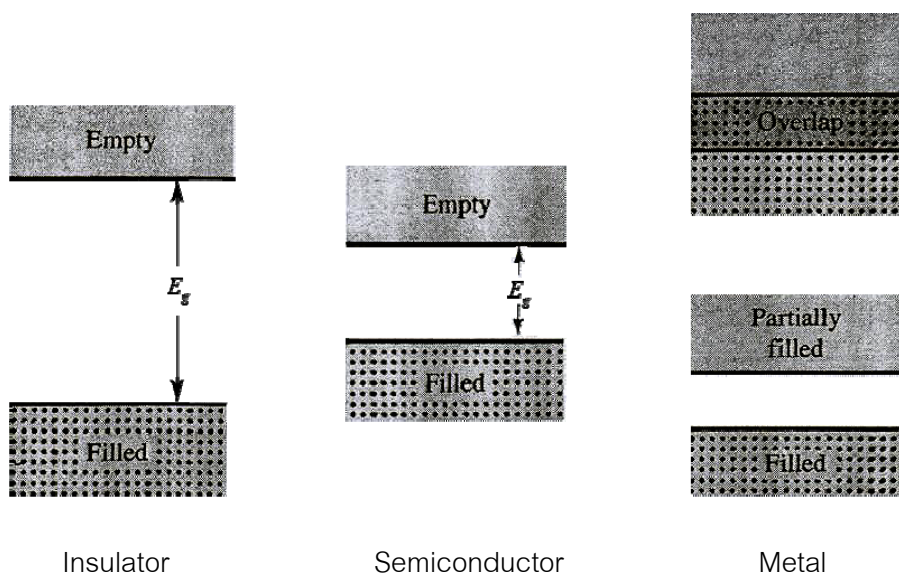
ภาพประกอบ 6 แสดงการละลายของแข็งแบบแทรก

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์; และสมชัย อัครทิวา. (2549). *วัสดุวิศวกรรม*. หน้า 92-94.

¹ แม้น อมรสิทธิ์;และสมชัย อัครทิวา. (2549). *วัสดุวิศวกรรม*. หน้า 92-94.

2.3. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงกว่าไดอิเล็กทริกแต่ต่ำกว่าตัวนำ ลักษณะแถบพลังงาน (Energy band) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) มีช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ซึ่งมีความกว้างไม่เกิน 4 eV กันระหว่างแถบทั้งสองนี้ ดังภาพประกอบ 7 หน่วยของพลังงานคือ อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron Volt : eV) ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัววิ่งผ่านสนามศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์¹ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอก็สามารถข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบการนำและทำให้เกิดการนำกระแสได้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) และสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)



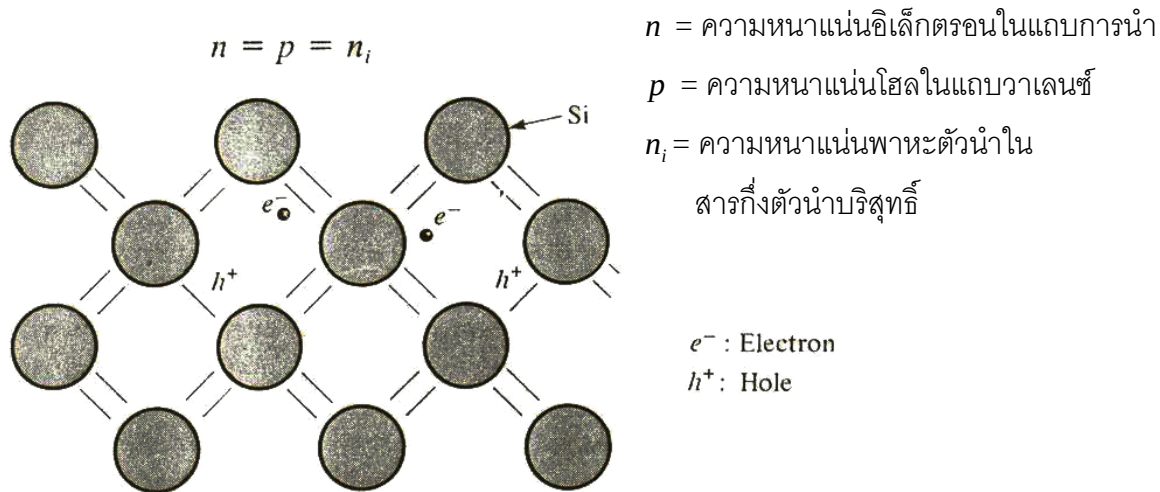
ภาพประกอบ 7 แสดงช่องว่างแถบพลังงานของสารที่เป็นไดอิเล็กทริก กึ่งตัวนำและโลหะ

ที่มา : Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 56.

¹ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2547). *พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี*. หน้า 65.

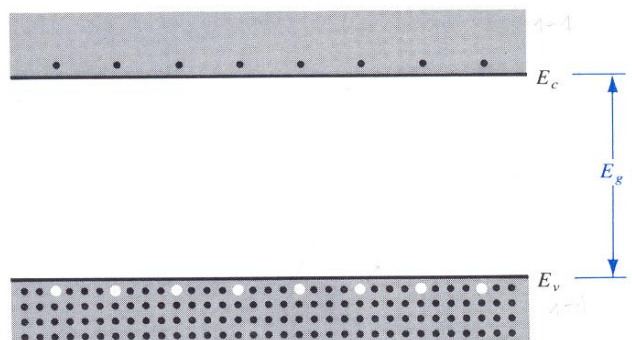
2.3.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่น ซิลิคอนหรือเจอร์มาเนียม ซึ่งอยู่ในธาตุหมู่ 4A อะตอมจะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ดังภาพประกอบ 8 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้อธิบายได้โดยพิจารณาแถบพลังงานดังภาพประกอบ 9 ที่ 0 K สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม แต่แถบการนำจะว่างเปล่าไม่มีพาหะประจุอยู่เลย แต่ถ้าทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้เกิดผลึกเกิด การสั่นสะเทือนและทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่หลุดออกจากพันธะโควาเลนต์กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและสามารถเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ เนื่องจากช่องว่างพลังงานในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีความกว้างไม่มากนัก ไม่จำเป็นต้องให้พลังงานสูงแก่อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำได้ การเคลื่อนที่ของวาเลนซ์อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะทำให้เกิดโฮล (Hole) เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ซิลิคอนซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น พลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิห้องก็เพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ การที่อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำจะทำให้เกิดโฮล (Hole) ในแถบวาเลนซ์ ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นมีประจุเป็นบวกและเกิดอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ โดยเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pair) ดังภาพประกอบ 8 ดังนั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จึงมีพาหะนำไฟฟ้า 2 ชนิด คืออิเล็กตรอนและโฮล



ภาพประกอบ 8 แสดงคู่อิเล็กตรอนและโฮลในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิคอน

ที่มา : Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 65.



ภาพประกอบ 9 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

ที่มา : Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 61.

2.3.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ สามารถแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้โดยการเติมสารเจือลงในอะตอมตัวทำละลาย ทำให้เกิดการละลายของแข็งแบบแทนที่หรือแบบแทรก สารเจือที่เติมลงไปช่วยให้อิเล็กตรอนหรือโฮลเกินขึ้นมาในแลตทิซ ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ โดยสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดเอ็น (n) และชนิดพี (p)

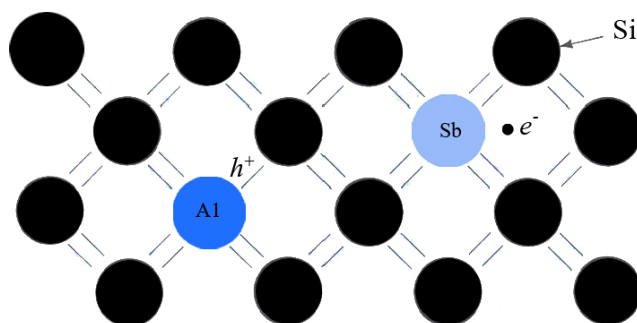
2.3.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (n-type semiconductor) คือ สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะประจุลบมากกว่าพาหะประจุบวก เพราะมีอิเล็กตรอนเพิ่มมาจากสารเจือปน ตัวอย่างเช่นการเติมฟอสฟอรัสที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวลงในซิลิคอนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ดังภาพประกอบ 10 อิเล็กตรอนจากสองอะตอมจะจับคู่กันด้วยพันธะโควาเลนต์ 4 พันธะ และจะเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนของฟอสฟอรัส 1 ตัวตั้งคู่กับนิวเคลียสของฟอสฟอรัสอย่างหลวมๆ ด้วยพลังงานพันธะเพียง 0.044 eV อิเล็กตรอนของฟอสฟอรัสต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นอีกเพียง 0.044 eV ก็จะเป็นอิเล็กตรอนอิสระและสามารถนำกระแสได้ เรียกสารที่เจือฟอสฟอรัสว่าตัวให้ (donor) โดยมีระดับพลังงานอยู่ใต้แถบการนำเรียกว่าระดับตัวให้ (Donor level: E_d) ดังภาพประกอบ 2.11

2.3.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

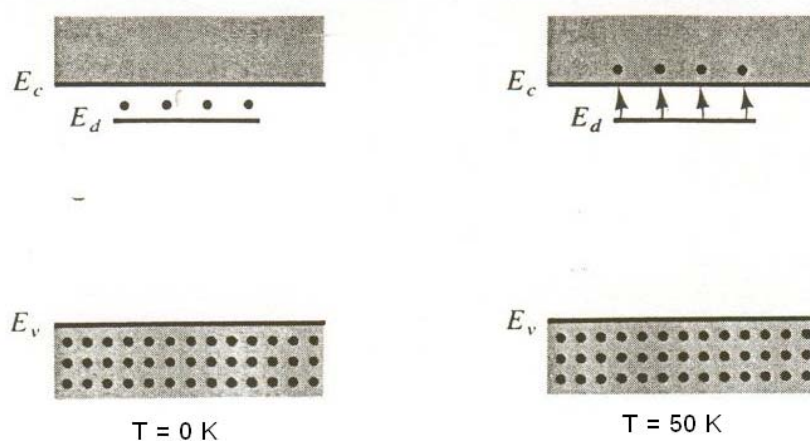
สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (p-type semiconductor) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมสารเจือเพื่อให้มีพาหะประจุบวกมากกว่าพาหะประจุลบ ตัวอย่างเช่นการเติมธาตุหมู่ 3A อันได้แก่ อลูมิเนียม (Al) อินเดียม (In) ลงในซิลิคอน เมื่ออะตอมซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวของสารเจือมีพันธะโควาเลนต์กับอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ทำให้เกิดโฮล 1 โฮลขึ้นในโครงสร้าง และพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอน จึงเรียกสารเจือเหล่านี้ว่าตัวรับ (Acceptor) ดังภาพประกอบ 10 โดยมีระดับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์อิเล็กตรอนเล็กน้อยเรียกว่าระดับตัวรับ (Acceptor level : E_a) ดัง

ภาพประกอบ 12 อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับตัวรับนี้ได้ง่ายกว่าเข้าไปอยู่ในแถบการนำ เนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า เมื่ออิเล็กตรอนออกไปจากแถบวาเลนซ์แล้วจะทำให้เกิดโฮลที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้ซึ่งทำให้มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้



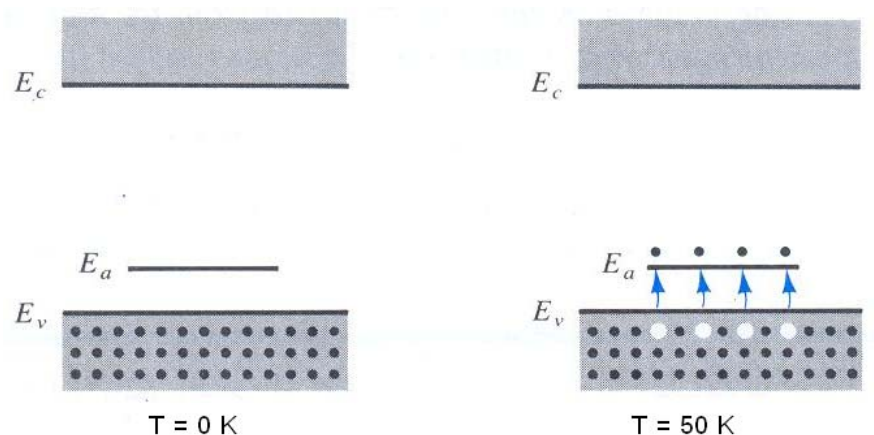
ภาพประกอบ 10 แสดงตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนซ์ของผลึกซิลิคอน

ที่มา : Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 67.



ภาพประกอบ 11 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ที่มา : Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 67.



ภาพประกอบ 12 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี

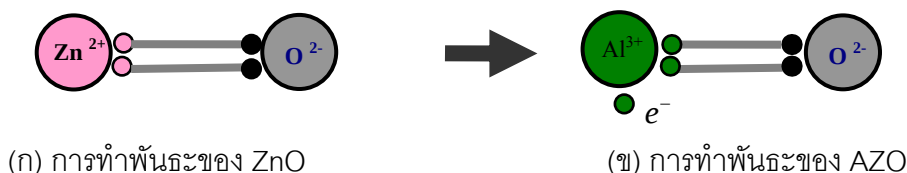
ที่มา : Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 67.

2.3.3 การนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) : AZO

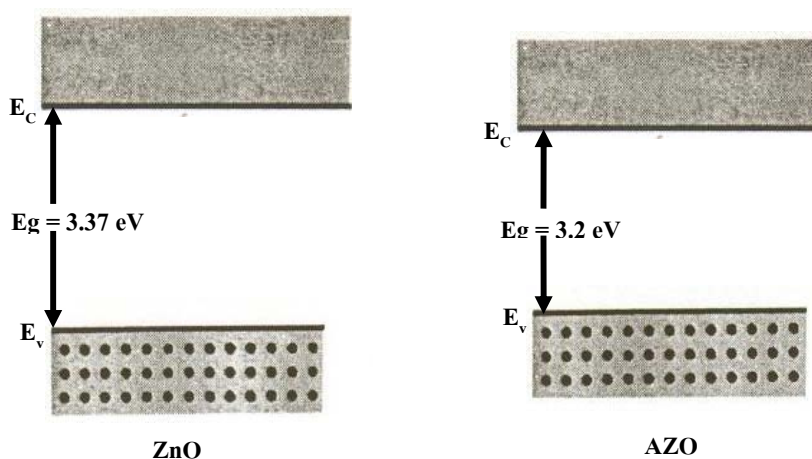
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเจือในปริมาณน้อยๆ และเงื่อนไขของอุณหภูมิผิวนึก เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น ZnO จะสูญเสียออกซิเจนไปทำให้อิเล็กตรอนของซิงค์ 2 อิเล็กตรอนไม่มีพันธะกับออกซิเจนและเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนอิสระให้มากขึ้น โมเดลก่อนหน้านี้เชื่อว่าผลของการที่ผลึกมีโครงสร้างไม่สมบูรณ์อันเนื่องมาจากอะตอมของซิงค์ไปแทรกอยู่ภายในโครงสร้าง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ แต่ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าการนำไฟฟ้าของ ZnO เกิดจากการสูญเสียออกซิเจนและที่อุณหภูมิห้องก็พอเพียงที่จะทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจน อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้เมื่อให้พลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถกระโดดขึ้นไปบนแถบการนำไฟฟ้าและสามารถนำไฟฟ้าได้¹

¹Moulsom, A.J. ; and Herbert, J.M. (2003). *Electroceramics*. p 156.

ในโครงสร้างของ ZnO ซิงค์และออกซิเจนทำพันธะกันดังภาพประกอบ 13 (ก) เมื่อเจือ Al_2O_3 ลงไปในโครงสร้างของ ZnO แล้ว อะลูมิเนียมอะตอม (Al^{3+}) ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวและมีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของซิงค์และทำพันธะกับออกซิเจนในโครงสร้าง แต่เนื่องจากอะลูมิเนียมมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวและออกซิเจนมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว เมื่อทำพันธะกันแล้วจะมีอิเล็กตรอนของอะลูมิเนียมเหลือ 1 ตัวที่ไม่ได้ทำพันธะกับอะตอมของออกซิเจนแต่จะเกาะอยู่กับนิวเคลียสของอะลูมิเนียมอย่างหลวมๆ ดังภาพประกอบ 13 (ข) เมื่อให้พลังงานกระตุ้นเข้าไปในปริมาณเล็กน้อยก็จะทำให้อิเล็กตรอนนี้กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) และสามารถนำไฟฟ้าได้ การนำไฟฟ้าของ AZO อธิบายได้โดยพิจารณาช่องว่างแถบพลังงานดังรูป 2.14 ZnO มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง 3.37 eV เมื่อเจือ Al_2O_3 ลงไปใน ZnO ช่องว่างแถบพลังงานจะแคบลงเหลือ 3.2 eV ช่องว่างแถบพลังงานที่แคบลงจากการเติมสารเจือ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระสามารถกระโดดขึ้นไปบนแถบการนำได้ง่ายขึ้น



ภาพประกอบ 13 แสดงการนำไฟฟ้าของ (ก) ZnO (ข) AZO



ภาพประกอบ 14 แสดงแถบพลังงานของ (ก) ZnO (ข) AZO

ที่มา : Guojia,Fang; Dejie,Li; & Bao-Lun ,Yao (2003). *Fabrication and vacuum annealing of transparent conductive AZO thin films prepared by DC magnetron sputtering*. (online)

2.4 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เป็นการเปลี่ยนพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเชิงกล อธิบายได้โดยการพิจารณาการจัดเรียงไดโพลโมเมนต์ในหนึ่งหน่วยยูนิตให้ไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้เกิดโพลาริเซชันที่มีประจุบวกรวมกันอยู่ปลายด้านหนึ่งของผลึกและประจุลบอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง เมื่อออกแรงกดหรือดึงผลึกด้วยความเค้น (Stress) จะเกิดความเครียด (Strain) เกิดขึ้นในวัสดุ และความเครียดที่เกิดขึ้นจะไปเปลี่ยนแปลงระยะทางไดโพลซึ่งส่งผลไปยังโพลาริเซชัน ดังนั้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถแสดงปรากฏการณ์ของการมีสนามไฟฟ้าในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นจากภายนอกและในทางตรงกันข้ามจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงกล (ขนาด) เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าภายนอก¹

2.4.1 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constants)

เนื่องจากเซรามิกส์เพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติที่ต่างกันทางกายภาพและตามแกนยาวที่ต่างกัน (Anisotropic) ค่าคงที่ทางกายภาพจึงมีความสัมพันธ์กับทั้งแรงทางไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปและทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงที่ให้เข้าไป ผลที่ตามมาคือ แต่ละค่าคงที่ตัวห้อย (Subscripts) อีก 2 ค่า ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงทิศทางของอีก 2 ปริมาณที่มีความสัมพันธ์กัน เช่น ความเค้น (Stress หรือแรงที่เกิดขึ้นบนเซรามิกส์ต่อพื้นที่ผิวของเซรามิกส์นั้น) และความเครียด (Strain คือความยาวของสารที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมของสารนั้น) สำหรับวัสดุที่ยืดหยุ่นได้

ทิศทางของโพลาริเซชันที่เป็นบวก (positive polarization) มักจะเกิดขึ้นในแกน Z เสมอในระบบพิกัดฉากที่มีแกน X Y และ Z ดังรูปที่ 14 ทิศทางของ X,Y หรือ Z แทนด้วยตัวห้อย 1 2 และ 3 ตามลำดับ และการเฉือน (shear) รอบๆแกน 1 2 และ 3 แทนด้วยตัวห้อย 4 5 หรือ 6 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 15 ค่าจำกัดความของค่าคงที่ที่ใช้บ่อยและสมการที่เชื่อมโยงระหว่างค่าคงที่เหล่านี้ มีดังนี้

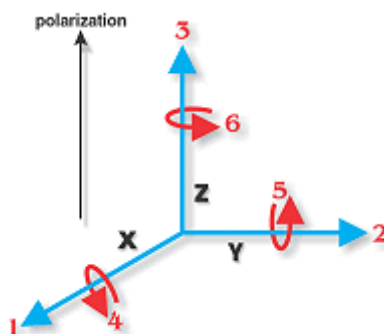
ค่าคงที่ประจุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric charge constants : d) คือ โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยของความเค้นที่ให้เข้าไปในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ค่าคงที่ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric voltages constant : g) คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการให้ความเค้นหนึ่งหน่วยกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant : ϵ_r) สำหรับวัสดุเซรามิกส์ที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก คือ การกระจัดเชิงไฟฟ้า (Dielectric displacement, $D = \epsilon E$) ของฉนวน ต่อสนามไฟฟ้าหนึ่งหน่วย²

¹เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. (2543). วัสดุศาสตร์มูลฐาน. หน้า 240-241.

²APC international Ltd. (2008). *Piezoelectric Constants*. (Online).



ภาพประกอบ 15 ทิศทางของแรงต่อสารเพียโซอิเล็กทริก

ที่มา : Piezoelectric constant. (2009). *Piezoelectric constant*. (online).

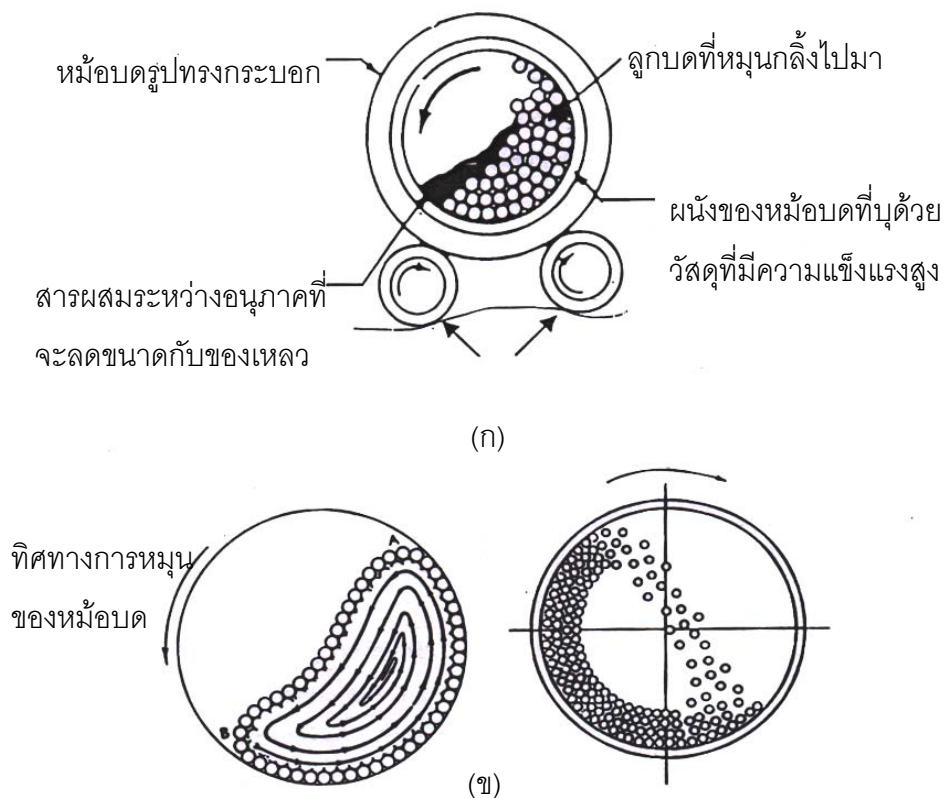
2.5 กระบวนการทำเซรามิกส์

กระบวนการทำเซรามิกส์ เริ่มต้นจากการนำออกไซด์ของโลหะมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยการบดย่อยด้วยลูกบอล จากนั้นไปผ่านกระบวนการทำให้แห้ง นำตัวอย่างไปบดให้ละเอียดด้วยครกบดสาร และอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกจนได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเม็ดยา จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปเผาผนึกเพื่อให้ได้เป็นเซรามิกส์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 การบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball mill) เป็นกระบวนการบดย่อยอนุภาคของวัตถุดิบที่อาศัยการหมุนด้วยหม้อบด ซึ่งเป็นแท่งกลวงทรงกระบอกที่มีฝาปิด-เปิดได้อยู่ที่ปลายด้านหนึ่งในแนวนอน หม้อบดส่วนใหญ่ที่นิยมใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ มักจะทำด้วยกระป๋องพลาสติกแบบง่ายที่สามารถกำจัดเศษพลาสติกที่ปนเปื้อนมากับการบดย่อยได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ขนาดของหม้อบดที่นำมาใช้งานควรมีขนาดที่เหมาะสมกับจำนวนของอนุภาคที่ต้องการลดขนาด

ก่อนที่จะทำการหมุนหม้อบดจะต้องมีการใส่วัตถุดิบที่ต้องการจะลดขนาดพร้อมกับลูกบอล (Ball) หรือลูกบด (Grinding media) และสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น สารเจือหรือสารช่วยหล่อลื่น เป็นต้น ลงไปในปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของหม้อบด โดยจะต้องพยายามปรับอัตราส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ในหม้อบด ให้ระบบสามารถเกิดพฤติกรรมการบดย่อยซึ่งลูกบอลจะมีการเคลื่อนที่คล้ายกับตัวอักษรภาษาอังกฤษ D โดยมีการเคลื่อนที่ไล่จากด้านบนแล้วตกลงมากระแทกกับด้านล่าง ดังภาพประกอบ 16 จากนั้นก็มีการหมุนบดเสียดสีกันและมีการเลื่อนไหลเป็นวัฏจักรแบบนี้เรื่อยไป พฤติกรรมต่างๆเหล่านี้ทำให้ขนาดของอนุภาค (Particle size) ลดลง แต่การเกิดสิ่งเจือปนก็อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้เช่นกัน ซึ่งปัญหานี้สามารถป้องกันได้โดยการเลือกลูกบอลและวัสดุเคลือบผนังหม้อบดที่สามารถกำจัดออกได้ด้วยการใช้อุณหภูมิต่ำ เช่น พอลิยูรีเทนและยาง หรือใช้วัสดุที่มีส่วนประกอบทาง

เคมีเป็นชนิดเดียวกันกับวัสดุที่ต้องการทำการลดขนาด หรือลดโอกาสในการสึกกร่อนของลูกบดและผนังหม้อบด ด้วยการเลือกวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทานสูงกว่าวัตถุดิบที่จะทำการลดขนาดมากๆ



ภาพประกอบ 16 (ก) ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball-milling) (ข) แสดงลักษณะพฤติกรรมกรบดย่อยแบบเลื่อนหล่นกันไป (Cascading)

ที่มา : สุพล อนันตา. (ม.ป.ป.). กระบวนการประดิษฐ์สำหรับเซรามิกส์ขั้นสูง. หน้า 10.

ในปัจจุบันมีการใช้ลูกบดที่มีรูปร่างต่างๆ กันอยู่หลายแบบ เช่น ทรงกลม (Ball) ทรงกระบอก (Cylindrical) หรือในบางกรณีจะใช้พวกกรวดหรือหินลาย (Pebble) เป็นลูกบดก็ได้การบดย่อยนี้สามารถทำได้ทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยการบดย่อยด้วยลูกบอลแบบแห้งนั้นไม่ต้องมีขั้นตอนของการแยกลูกบอลออกจากของเหลว แต่ต้องคอยระมัดระวังไม่ให้อนุภาคผงไปเกาะอยู่ตรงร่องของผนังหม้อบด จะทำให้อนุภาคเหล่านี้ไม่โดนบดย่อยเหมือนอนุภาคอื่นๆ ส่วนการย่อยแบบเปียก อนุภาคของวัตถุดิบที่จะลดขนาดอยู่ในรูปของสารแขวนลอย นอกจากนั้นยังมี

ปัจจัยอื่นๆอีกมากมายที่มีอิทธิพลต่ออัตราการบดย่อย เช่น ความเร็วในการหมุนหม้อบดซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรวมของชุดบดย่อยที่เลือกใช้ ความหนืดของสารแขวนลอยขณะที่ทำการบดย่อยและลักษณะของลูกบดที่ใช้ เป็นต้น

2.5.2 การอัดผง (pressing) เป็นกระบวนการซึ่งผงอนุภาควัตถุบริสุทธิ์ถูกบีบให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันภายในช่องว่างที่กำหนดขนาดไว้ โดยการให้แรงดันในทิศทางเดียว (Uniaxial pressing) ส่วนใหญ่มักเป็นแรงในแนวตั้งซึ่งควบคุมโดยการทำงานของเครื่องกระแทกแบบธรรมดา (Mechanical ram) หรือแบบไฮดรอลิก (Hydraulic ram) การอัดแห้งหรือเกือบแห้ง โดยการอัดอนุภาคผงในแม่พิมพ์ (Die) แข็งเกร็งด้วยแรงดันแนวเดียวที่อัดไปตามแนวของแท่งอัดแข็งแรง (Punch หรือ plunger หรือ piston) การอัดด้วยแรงกลปกติจะมีอัตราการขึ้นรูปขึ้นงานสูงกว่าและควบคุมการทำงานได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ โดยปกติแล้วแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปผงนั้นไม่ได้มีการส่งผ่านเข้าไปในเนื้อของวัสดุอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากจะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นระหว่างตัวของอนุภาคผงเอง และระหว่างอนุภาคของผงกับผนังของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดความเค้นที่แตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ ส่งผลให้อนุภาคผงที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมีความหนาแน่นที่ไม่สม่ำเสมอ

เมื่อได้รับแรงดันจากการเคลื่อนที่ของหัวกดและผนังแบบจะทำให้ปริมาณรูพรุนลดลง ซึ่งอาจแบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกอนุภาคจะเบียดตัวเข้าหากัน ทำให้รูพรุนระหว่างแกรนูลลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่วงที่สอง (ซึ่งเกิดขึ้นบ้างแล้วในช่วงแรก) รูพรุนภายในแกรนูลจะเริ่มลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานในช่วงที่สองนี้มักไม่ได้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เพราะมีผลจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผนังแบบเข้ามาเกี่ยวข้อง ในทางอุดมคติ เมื่อแกรนูลเสียรูปภายใต้แรงอัดตามแนวแกน ความหนาแน่นควรเพิ่มเป็นสองเท่าจากความหนาแน่นบัลค์เป็นความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอัด ซึ่งเป็นผลจากการจำกัดอากาศ ทั้งที่อยู่ระหว่างแกรนูลและที่ช่องภายในแกรนูล การอัดที่ดีจะไม่ใช้แรงดันมากเกินไป แต่ในขณะเดียวกันจะต้องมีแรงดันมากพอในการอัดชิ้นงานให้มีความหนาแน่นสูงและมีความสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยให้เครื่องมือและชุดแบบอัดเกิดการสึกกร่อนและเสียหายน้อย รวมทั้งต่อเครื่องอัดเองด้วย นอกจากนี้การใช้แรงดันไม่มากนัก ยังช่วยลดตำหนิในชิ้นงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่ปลายชิ้นงานหลุดออก (End-capping) ครีป (Finning) และการแยกชั้น (Delamination)¹

¹กุลจิรา สุจิโรจน์; ฎกามาศ แซ่ห่อ่ง; และ ดวงเดือน อาจองค์. (2545). *การผลิตเซรามิกส์โดยการอัดแบบ*. หน้า 35.

2.5.3 กระบวนการที่อุณหภูมิสูง (High temperature processing)

การเผาผนึก (Sintering) คือ กระบวนการทางความร้อนที่ทำให้อนุภาคเกิดการสร้างพันธะกัน โดยมีโครงสร้างหลักเป็นของแข็งที่พัฒนามาจากการเคลื่อนย้ายมวลลักษณะต่างๆ ที่มักจะเกิดขึ้นในระดับอะตอม การเกิดพันธะเชื่อมต่อกันดังกล่าวทำให้ระบบมีความแข็งแรงสูงขึ้นและมีพลังงานลดลง นอกจากนี้ยังอาจกล่าวได้ว่าการเผาผนึกนั้นหมายถึงการกำจัดรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคผงเริ่มต้น โดยอาศัยการหดตัวขององค์ประกอบที่เชื่อมอยู่ติดกันแล้วเกิดการเติบโตไปด้วยกัน โดยมีการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันขึ้นมาทุกขั้นตอนที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนสภาพชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปไปเป็นโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยรอยยึดกันของเกรนต่างๆ ล้วนแต่เป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการเผาผนึกทั้งสิ้น แรงขับเคลื่อนสำหรับการเผาผนึกนั้นได้มาจากการลดพื้นที่ผิวและพลังงานของพื้นที่ผิวด้วยการใช้ของแข็งที่เชื่อมยึดกันโดยมีพลังงานของขอบเกรนแบบของแข็ง-ของแข็ง (γ_{ss}) ที่ค่อนข้างต่ำเข้าไปแทนที่กลุ่มอนุภาคผงที่ยึดกันอยู่อย่างหลวมๆ ซึ่งจะมีพลังงานพื้นผิวแบบของแข็ง-ไอ (γ_{sv}) ที่สูงมาก ด้วยเหตุนี้เองการผลิตเซรามิกส์ส่วนใหญ่จึงนิยมเลือกใช้อุณหภูมิสูงตั้งต้นที่มีขนาดอนุภาคเล็กเนื่องจากอนุภาคผงที่มีขนาดเล็กเท่าใดก็ยิ่งมีพื้นที่ผิวมากขึ้นเท่านั้น จึงทำให้ระบบมีแรงขับเคลื่อนสำหรับการเผาผนึกที่สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ชิ้นงานสามารถเกิดการแน่นตัวได้ดี จึงมีความหนาแน่นสูงหรือทำให้สามารถใช้อุณหภูมิในการเผาที่ต่ำลงได้ การหดตัวของชิ้นงานเซรามิกส์ขณะที่ทำการเผาผนึก สามารถตรวจสอบได้จากการวัดขนาดหรือหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาในการเผา

การเผาผนึกจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในผลิตภัณฑ์สูงเกินครึ่งหนึ่งหรือประมาณสองในสามของค่าอุณหภูมิหลอมเหลวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เพียงพอต่อการทำให้ชิ้นงานเกิดการเผาผนึกแบบสถานะของแข็งที่แต่ละอะตอมสามารถเกิดการแพร่กระจายได้อย่างมีนัยสำคัญ และถ้ามีเฟสที่เป็นของเหลวเกิดขึ้นในระหว่างการเผาก็จะเกิดพฤติกรรมของการไหลหนืดของเฟสดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่เกิดขึ้นก่อนการเผาผนึกนั้นอาจรวมไปถึงการทำให้แห้ง การแยกสลายองค์ประกอบของพอลิเมอร์อินทรีย์ การระเหยของพอลิเมอร์อินทรีย์ที่เคยใส่เข้าไป การระเหยเป็นไอของน้ำที่เกาะหรือรวมอยู่กับโครงสร้างภายในพื้นผิวของอนุภาค

กระบวนการก่อนการเผาผนึก อนุภาคผงยึดกันอยู่แบบหลวมๆ หลังการอัดขึ้นรูป ดังภาพประกอบ 17 (ก) แต่หลังจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์อินทรีย์ที่ปนมากับวัตถุดิบที่ใช้ หรือเกิดจากการปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิต การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชันของพวกโลหะทรานซิชันและพวกไอออนของแร่หายาก (Rare earth element) ซึ่งสำคัญก็คือจะต้องคอยควบคุมขั้นตอนต่างๆ เหล่านี้ไม่ให้วัสดุเกิดความเค้นจนมีรอยร้าวหรือมีการแตกหักของชิ้นงานเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ หรือมีการเคลือบผิวจะต้อง

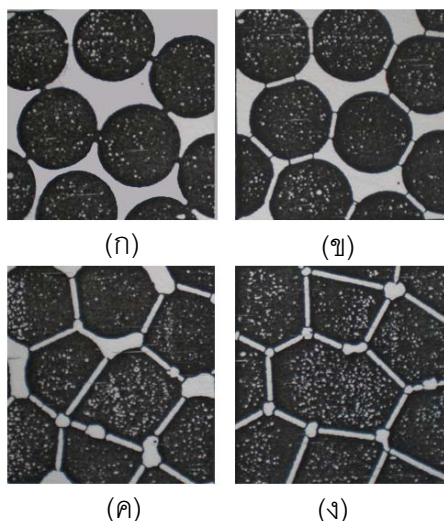
มีการระบายแก๊สที่เกิดขึ้นหรือตกค้างอยู่ภายในชิ้นงานออกไปได้ดี ในขณะที่พื้นผิวของชิ้นงานยังมีความสามารถในการซึมซับสูงอยู่

การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Organic burn out) หรือเทอร์โมไลซิส (Thermolysis) เป็นการกำจัดสารพวกอินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ภายในชิ้นงานหลังจากการอบแห้งซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ก่อนที่วัสดุจะเกิดการเทอร์โมไลซิสได้นั้นมักจะทำให้เกิดตำหนิลักษณะใหม่ขึ้นในชิ้นงานได้เสมอ การเลือกใช้สารยึดเหนี่ยวที่มีความเหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์และการควบคุมการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่ดีภายใต้บรรยากาศที่เหมาะสม จะช่วยให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้สามารถผ่านพ้นกระบวนการเทอร์โมไลซิสไปได้ด้วยดี โดยไม่มีการเสียรูป บิดเบี้ยว เกิดรอยร้าว หรือเกิดการขยายตัวของรูพรุนขึ้น การเผาไล่สารยึดเหนี่ยวจะขึ้นกับองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำเป็นสารยึดเหนี่ยว องค์ประกอบและพฤติกรรมการไหลของแก๊สที่อยู่รอบๆตัวผลิตภัณฑ์และที่อยู่ภายในรูพรุนของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับการโครงสร้างจุลภาคของสารอินทรีย์ อนุภาคของเฟสที่เป็นรูพรุนและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในขณะที่มีการเผาไล่สารยึดเหนี่ยวออกไปจากผลิตภัณฑ์ พฤติกรรมการเผาผนึกแบบสถานะของแข็ง (Solid state sintering) ทั่วไป ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ การเผาผนึกช่วงต้น การเผาผนึกช่วงกลางและการเผาผนึกช่วงสุดท้าย

1) การเผาผนึกช่วงเริ่มต้น (Initial sintering) จะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวกันใหม่อีกครั้งหนึ่งของอนุภาคผงภายในชิ้นงานและการเกิดพันธะที่แข็งแรง หรือคอ (Neck) ขึ้นมาที่บริเวณจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผง ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานในช่วงนี้อาจจะเพิ่มขึ้นได้ ส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากการที่อนุภาคผงมีการแพ็คตัวกันมากยิ่งขึ้นนั่นเอง ดังภาพประกอบ 17 (ข)

2) การเผาผนึกช่วงกลาง (Intermediate sintering) เป็นช่วงที่ขนาดของคอเริ่มโตขึ้นและปริมาณของความพรุนในชิ้นงานจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคเริ่มเข้ามาใกล้ชิดติดกันมากยิ่งขึ้น ทำให้ชิ้นงานเกิดมีการหดตัวลงอย่างชัดเจน เริ่มมีเกรนและขอบเกรนเกิดขึ้นพร้อมกับมีการเคลื่อนที่ของสิ่งเหล่านี้ ทำให้เกิดมีการเติบโตของเกรนบางเกรนขึ้น ขั้นตอนนี้จะดำเนินไปเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องในขณะที่ช่องว่างของรูพรุนจะเริ่มเกิดการเชื่อมต่อกัน (พวงรูพรุนเปิด) และจะสิ้นสุดพฤติกรรมนี้ในทันทีเมื่อรูพรุนเกิดมีการแยกตัวหลุดออกไปอยู่ต่างหาก (พวงรูพรุนปิด) การหดตัวของชิ้นงานจะเกิดขึ้นมากที่สุดในการเผาผนึกช่วงกลางนี้และอาจจะทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานมีค่าสูง ดังภาพประกอบ 17 (ค)

3) การเผาผนึกช่วงสุดท้าย (Final stage sintering) เป็นช่วงที่รูพรุนในชิ้นงานเริ่มปิดตัวเองลงและค่อยๆถูกกำจัดให้หมดไปจากชิ้นงานอย่างช้าๆโดยอาศัยกลไกการแพร่ของอากาศจากรูพรุนออกมาตามแนวของขอบเกรน แล้วหลุดออกไปจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแน่นตัวเพิ่มขึ้นจากเดิมอีกเพียงเล็กน้อย ขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นในการเผาผนึกช่วงสุดท้ายนี้ ดังภาพประกอบ 2.17 (ง)



ภาพประกอบ 17 แสดงพัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการเผาผนึกแบบสถานะของแข็ง
 (ก) อนุภาคผงยึดกันอยู่แบบหลวมๆหลังการอัดขึ้นรูป (ข) การเผาผนึกช่วงเริ่มต้น (ค)
 การเผาผนึก ช่วงกลาง และ (ง) การเผาผนึกช่วงสุดท้าย

ที่มา : สุพล อนันตา.(ม.ป.ป.). *กระบวนการประดิษฐ์สำหรับเซรามิกส์ขั้นสูง*. หน้า 136.

การเผาผนึกจะทำให้ขนาดของเกรนมีการเปลี่ยนแปลง การวัดหาขนาดของเกรนจะใช้วิธีการใช้เส้นลากตัด (Linear intercept method) ซึ่งเป็นกระบวนการวัดขนาดเกรนโดยการนับจำนวนขอบเกรนต่อหน่วยความยาวของเส้นตรงที่ตัดผ่านบริเวณที่สุ่มตรวจสอบ¹

¹ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2547). *พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี*.
 หน้า 98.

ในการเปลี่ยนแปลงหนึ่งๆ จะมีงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ เช่น การไหลของรตลงจากที่ลาดชัน งานที่ทำกับรตจะเท่ากับ น้ำหนักรตคูณด้วยความสูงของที่ลาดชันนั้น ซึ่งเป็นงานที่ทำโดยแรงโน้มถ่วง ในกรณีที่มีแรงต้านทานอื่นๆ เข้ามาร่วมด้วย งานที่กระทำโดยรวมที่ทำให้รตเคลื่อนที่ ย่อมน้อยกว่า งานที่ทำโดยสนามโน้มถ่วง งานโดยรวมนี้เรียก งานอิสระ (Free work) งานนี้ให้สิ่งที่เราเรียกว่า แรงขับเคลื่อนในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ซึ่งในที่นี้คือการเปลี่ยนตำแหน่งของรตที่ระดับความสูงหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง (ความหมายของคำว่าแรงขับเคลื่อนในที่นี้จึงไม่ได้หมายถึงแรงที่มีหน่วยเป็น นิวตัน)

ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ งานที่ทำในระหว่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ให้แรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการเปลี่ยนแปลงขนาด เช่น การเปลี่ยนแปลงของเฟสของของแข็ง (Solid-state phase changes) การโตของเกรน (Grain growth) กระบวนการเกิดของของแข็ง (Solidification) และกระบวนการทำให้ตกผลึกใหม่ (Recrystallisation) เป็นต้น¹

2.5.4 การขัด (Grinding) เป็นการกำจัดเนื้อเซรามิกส์ออกจากชิ้นงาน ซึ่งเป้าหมายหลักก็คือการทำให้ชิ้นงานสำเร็จมีขนาดและรูปร่างตรงตามที่กำหนดไว้ ซึ่งจะขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนชิ้นงาน จะได้ชิ้นงานที่มีผิวหน้าที่มีคุณภาพก่อนนำไปทำขั้วไฟฟ้าต่อไป

2.5.5 การทำขั้วไฟฟ้า (Electrode) การทำขั้วไฟฟ้ามีความจำเป็นต่อการผลิตชิ้นงานเซรามิกส์สำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพราะขั้วไฟฟ้าจะนำไฟฟ้า ส่งถ่ายประจุและความต้านทานต่อการกักร่อนจากปฏิกิริยาความร้อนและเคมี ซึ่งทำได้โดยการทาด้วยกาวเงิน (Silver paint) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของสารพวกออกไซด์ของเงินผสมกับผงแก้วในปริมาณน้อยๆ โดยการใช้พู่กันทาลงบนผิวหน้าของเซรามิกส์ เสร็จแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 650 °C เพื่อทำให้เกิดการหลอมเหน็ดช่วยยึดอนุภาคของเงินและผิวหน้าเซรามิกส์ให้แน่นยิ่งขึ้น

¹Ashby, Michael F.; & Jones, David R.H. (1998). *Engineering Materials 2*. pp. 53-55.

2.6 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

2.6.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

2.6.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น (Density) คือค่ามวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสาร ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่น เช่น ขนาดและมวลขององค์ประกอบ การจัดเรียงตัวของอะตอมในระบบผลึกและปริมาณรูพรุนในโครงสร้างของวัสดุ

สำหรับวัสดุเซรามิกส์ ค่าความหนาแน่นเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพในการอัดแน่นตัวของวัสดุในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูป นอกจากนั้นยังเป็นตัวชี้วัดความเป็นรูพรุน (Porosity) ของวัสดุได้อีกด้วย การหาค่าความหนาแน่นอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle) ที่กล่าวว่า “เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงเกิดขึ้นบนของแข็งนั้น โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็ง” ด้วยหลักการนี้จึงทำให้สามารถใช้ค่ามวลของวัตถุขณะชั่งในอากาศและขณะชั่งในน้ำสำหรับการคำนวณหาความหนาแน่นได้ ดังสมการ 2.1¹

$$D = \frac{W_a}{W_a - W_n} \times \rho_n \quad (2.1)$$

เมื่อ	D	คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)
	ρ_n	คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)
	W_a	คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (g)
	W_n	คือ น้ำหนักของชิ้นงานในของเหลว (g)

¹กุลจิรา สุจิโชน; ฎกามาศ แซ่หว่าง; และ ดวงเดือน อาจองค์. (2545). *การผลิตเซรามิกส์โดยการอัดแบบ*. หน้า 44-45.

ค่าความหนาแน่นจะหาได้จากชิ้นงานเซรามิกส์ที่ผ่านการเผาขึ้นแล้ว โดยใช้หลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส (Archimedes) โดยจะนำเกรนเซรามิกส์มาต้มในน้ำกลั่นประมาณ 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าจะไม่มีฟองอากาศออกมาจากเกรนเซรามิกส์ ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วทำการชั่งน้ำหนักในน้ำ จากนั้นบันทึกอุณหภูมิของน้ำขณะที่ทำการทดลอง และชั่งน้ำหนักเกรนเซรามิกส์ขณะเปียก นำเกรนเซรามิกส์ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 150 °C จนแห้งสนิทและนำมาชั่งในอากาศ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นตามสมการ 2.2

$$D = \frac{W_1}{W_2 - W_3} \times \rho_{H_2O} \quad (2.2)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของเซรามิกส์ (g/cm^3)

ρ_{H_2O} คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิขณะทำการทดลอง (g/cm^3)

W_1 คือ มวลของเกรนเซรามิกส์เมื่อชั่งในอากาศ (g)

W_2 คือ มวลของเกรนเซรามิกส์เมื่อชั่งในอากาศขณะเปียก (g)

W_3 คือ มวลของเกรนเซรามิกส์เมื่อชั่งในน้ำ (g)

2.6.1.2 ความเป็นรูพรุน

ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density : P_B) คืออัตราส่วนมวลของอนุภาคที่อยู่ภายในวัสดุต่อปริมาตรที่อนุภาคนั้นรวมตัวกันอยู่ ซึ่งนอกจากเนื้อสารแล้วในชิ้นงานยังประกอบด้วยรูพรุนเปิด รูพรุนปิดและตำหนิต่างๆ¹

รูพรุนเปิด (Open porosity) หรือรูพรุนปรากฏ (Apparent porosity : P_A) คือ ช่องว่างหรือที่ว่างภายในเนื้อวัสดุซึ่งรูพรุนแต่ละรูพรุนสามารถที่จะเชื่อมต่อกับรูพรุนอื่นๆภายในเนื้อวัสดุได้โดยสามารถหาค่ารูพรุนเปิดได้จากสมการ 2.3²

$$P_A (\%) = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

¹ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2547). *พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี*. หน้า 27.

²กุลจิรา สุจิโรจน์; ฝกามาศ แซ่ห่อ่ง; และ ดวงเดือน อาจองค์. (2545). *การผลิตเซรามิกส์โดยการอัดแบบ*. หน้า 44-45.

เมื่อ	P_A คือ รูปพรุนปรากฏ (apparent porosity)
	W_1 คือ มวลของเกรนเซรามิกส์เมื่อชั่งในอากาศ (g)
	W_2 คือ มวลของเกรนเซรามิกส์เมื่อชั่งในอากาศขณะเปียก (g)
	W_3 คือ มวลของเกรนเซรามิกส์เมื่อชั่งในน้ำ (g)

2.6.1.3 การหดตัวหลังการเผา (Firing shrinkage)

การศึกษาค่าการหดตัวของตัวอย่างหลังเผา โดยการหาค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) สามารถหาได้โดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซรามิกส์ทั้งก่อนและหลังการเผาผืนึก จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าการหดตัวเชิงเส้นตามสมการ 2.4

$$S_L = \left[1 - \frac{D}{D_B} \right] \times 100\% \quad (2.4)$$

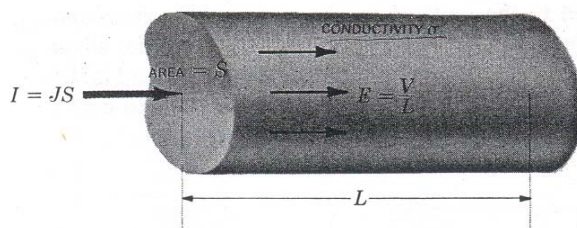
เมื่อ	S_L คือ ค่าการหดตัวเชิงเส้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
	D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างหลังการเผาผืนึก (mm)
	D_B คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างก่อนการเผาผืนึก (mm)

2.6.2 สมบัติทางไฟฟ้า

2.6.2.1 สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity : σ)

สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำคืออัตราส่วนระหว่างขนาดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับขนาดสนามไฟฟ้าในตัวนำนั้น¹ ซึ่งการนำไฟฟ้าในโลหะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แต่การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะตัวนำ 2 ชนิดคือ อิเล็กตรอนและโฮล เรียกว่าเป็นการนำไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Bipolar) เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำต่อแท่งสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็น $-q$ และ $+q$ ตามลำดับและเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดกระแสจากพาหะทั้งสอง การเคลื่อนที่ของพาหะตัวนำเกิดได้ 2 กรณี คือ กรณีแรกคือเมื่อได้รับอิทธิพลจากกระแสลอยเลื่อน (Drift current) ซึ่งกระแสลอยเลื่อนนี้เกิดขึ้นจากการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำทำให้พาหะประจุในสารกึ่งตัวนำเกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้นกระแสลอยเลื่อนจึงเป็นกระแสที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุตัวนำนั้นเอง² กรณีที่สอง เมื่อมีเกรเดียนของความเข้มข้น (Concentration gradient) เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ โดยที่เกรเดียนของความเข้มข้นคือความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารในบริเวณที่ใกล้เคียงกันหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นความชันของ

กราฟระหว่างปริมาณความเข้มข้นของสารกับตำแหน่ง³ ถ้าสารกึ่งตัวนำได้รับแรงดันและเกิดกระแสแล้ว กระแสจะกระจายไปตามพื้นที่ภาคตัดขวางของสารกึ่งตัวนำ⁴ ดังแสดงในภาพประกอบ 18 โดยสามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสของตัวนำและค่าสภาพนำไฟฟ้าได้ ดังสมการ (2.5) – (2.17)



ภาพประกอบ 18 การนำไฟฟ้าในแท่งสารกึ่งตัวนำ

ที่มา : Hayt.H,William,Jr. (1989). *Engineering electromagnetics*. p 122.

¹สมพงษ์ ใจดี. (2547). ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 3. 173.

²Torres, Monica; Sandoval,Michael; & Gregory,Lush. (2008). *Drift current*. (online).

³ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2547). *พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี*. หน้า 43

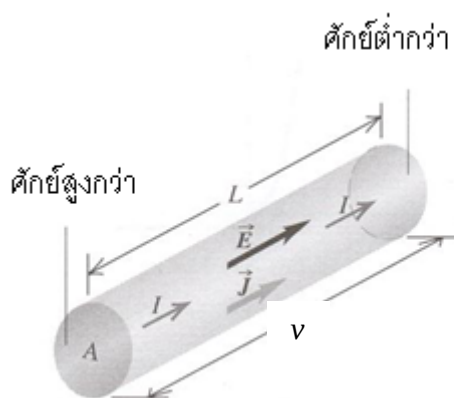
⁴มงคล เดชนครินทร์และชาติรี ศรีไพพรรณ. (2528). *อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน*. หน้า 35-40.

โดยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำคือประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ภาคตัดขวางต่อหนึ่งหน่วยเวลา ให้ q เป็นผลรวมของประจุที่ผ่านพื้นที่แรกจะ ได้ $q = q^+ + q^-$

$$I = \frac{q}{t} \quad (2.5)$$

เมื่อ q คือ ผลรวมของประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่ง (C)
 t คือ เวลาที่ประจุไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ (s)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

การหากระแสไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำ ถ้าให้เส้นลวดตัวนำมีพื้นที่หน้าตัด A อิเล็กตรอนวิ่งด้วยความเร็ว $\vec{v}$ ดังภาพประกอบ 19 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในตัวนำเท่ากับ n ตัวต่อปริมาตรและอิเล็กตรอนแต่ละตัวมีประจุ e จะได้กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในเส้นลวดตัวนำ



ภาพประกอบ 19 ประจุอิสระวิ่งในเส้นลวดตัวนำ

ที่มา : Young & Freedman. (2005). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2. หน้า 805.

จากรูป จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนจากพื้นที่หน้าตัด A ไปยังพื้นที่หน้าตัดอีกฝั่งหนึ่ง ซึ่งระยะห่างระหว่างพื้นที่หน้าตัดมีค่า L โดย N คือจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด

$$N = nLA \quad (2.6)$$

เมื่อ $\bar{S} = \frac{\bar{v}}{t} = \bar{L}$

$$\bar{L} = \bar{v}t$$

ดังนั้น

$$N = n\bar{v}tA \quad (2.7)$$

ประจุทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด

$$\bar{q} = Ne = n\bar{v}tAe \quad (2.8)$$

$$\frac{\bar{q}}{t} = n\bar{v}Ae$$

$$\bar{I} = n\bar{v}Ae \quad (2.9)$$

จากความหนาแน่นกระแส ($\bar{J}$: current density) $\bar{J} = \frac{\bar{I}}{A}$; $\bar{v} = \mu\bar{E}$ (2.10)

โดย μ คือ ความคล่องตัวประจุตัวนำ (Carrier mobility)

$\bar{E}$ คือ สนามไฟฟ้า

$$\bar{I} = ne\bar{v}A = ne\mu\bar{E}A \quad (2.11)$$

$$\frac{\bar{I}}{A} = ne\mu\bar{E}$$

$$\bar{J} = ne\mu\bar{E} \quad (2.12)$$

$$\bar{J} = \sigma\bar{E} \quad (2.13)$$

ในสารกึ่งตัวนำมีประจุพาหะตัวนำสองตัวคืออิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นความหนาแน่นกระแสรวมได้จากความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนกับความหนาแน่นกระแสของโฮล

เมื่อ ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน $\bar{J}_e = nq\mu_e\bar{E} \quad (2.14)$

ความหนาแน่นกระแสของโฮล $\bar{J}_p = pq\mu_h\bar{E} \quad (2.15)$

ดังนั้นความหนาแน่นรวมของกระแสการนำจะได้

$$\bar{J} = \bar{J}_e + \bar{J}_p = (n\mu_e + p\mu_h)q\bar{E} = \sigma\bar{E} \quad (2.16)$$

ดังนั้น $\sigma = (n\mu_e + p\mu_h) \quad (2.17)$

เมื่อ n และ p คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระและโฮล ตามลำดับ (cm^{-3})

μ_e และ μ_h คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮล (Carrier mobilities) ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)

$\bar{J}_e$ และ $\bar{J}_p$ คือความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการนำของอิเล็กตรอนและโฮล (A/m^2)

σ คือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของสารกึ่งตัวนำ ($\Omega.\text{cm}$)⁻¹

2.6.2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity : ρ)

สภาพต้านทานไฟฟ้า(Resistivity) เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าและเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า¹ ซึ่งวัสดุทุกชนิดจะมีความต้านทานต่อการไหลของกระแสอิเล็กทรอนิกส์ ความต้านทานจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆปัจจัย เช่น ขนาดและรูปร่าง อุณหภูมิ เป็นต้น ค่าความต้านทานนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.18

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.18)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทาน (Ω)
 L คือ ความยาวของแท่งสารกึ่งตัวนำ (cm)
 A คือ พื้นที่ภาคตัดขวาง (cm^2)
 ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) ($\Omega \cdot \text{cm}$) เป็นส่วนกลับกับสภาพนำไฟฟ้า ดังสมการ 2.19

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.19)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹

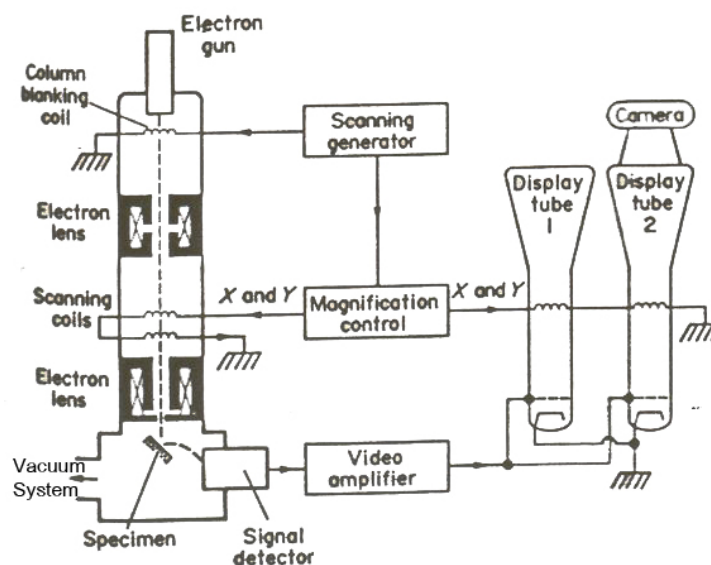
¹Callister,William D.,Jr. (2005). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. แปลโดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์; เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ; และ มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา. หน้า 715.

2.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

โครงสร้างจุลภาคของสารกึ่งตัวนำมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมและสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) หรือโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เช่นลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของเกรน คือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่มีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าจนถึงมากกว่า 100,000 เท่า โดยการแจกแจงรายละเอียดของภาพมีความเป็นไปได้ถึงประมาณ 3 nm จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่าง¹

หลักการทำงานของกล้อง ภาพประกอบ 20 ใช้ลำอิเล็กตรอนสแกนลงบนตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศโดยลำอิเล็กตรอนนี้เกิดขึ้นจากการทำให้แคโทดทั้งสแตนร้อนจนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูงและถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่เล็ก ซึ่งลำอิเล็กตรอนนี้เราเรียกว่าอิเล็กตรอนปฐมภูมิ อิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง โดยทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหลุดออกจากวงโคจร และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้ว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยสามารถศึกษาลักษณะของพื้นผิวตัวอย่างได้จากการใช้หัววัดสัญญาณ (Detector) รับอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้และนำไปประมวลผลต่อไป

¹ณัฐยา ต๊ะวิไชย. (2548). โครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์สังกะสีออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์. หน้า 39.



ภาพประกอบ 20 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM

ที่มา : Lifshin, Eric. (1993). *Concise Encyclopedia of Materials Characterization*. p 423.

วิธีการวิเคราะห์ด้วย SEM กรณีวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าจะมีประจุลบอันเนื่องมาจากการสะสมอิเล็กตรอนบนผิวหน้าและไม่สามารถระบายออกไปได้ ทำให้เกิดประจุลบสะสมอยู่บนผิวหน้าประจุเหล่านี้จะทำให้เกิดแรงผลักต่ออิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนที่กวาดไปบนพื้นผิว ทำให้ความคมชัดของภาพลดลง อัตราการขยายภาพหาได้จากอัตราส่วนของภาพบนจอมอนิเตอร์ต่อความยาวของส่วนที่ถูกสแกน อาจมีค่าสูงถึงแสนเท่า สำหรับความคมชัด (Resolution) ของภาพจะถูกจำกัดโดยขนาดของลำอิเล็กตรอนที่ต้องโฟกัสให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งขนาดของลำอิเล็กตรอนก็就会被กำหนดโดยการแผ่กระจายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยด้วยความร้อน ซึ่งจะถูกจำกัดให้มีค่าประมาณ 8 nm ในกรณีที่ต้องการให้มีความคมชัดที่ดีควรลดกระแสของอิเล็กตรอนลงและความลึกของสนาม (Depth field) ควรมีค่าประมาณ 1 μm การเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้แก่เครื่องมือ SEM จะทำให้สามารถได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้นและหนึ่งในจำนวนเครื่องมือที่มีประโยชน์ก็คือเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectroscopy หรือ EDS) โดยเมื่อลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงตกกระทบกับอะตอมของสารตัวอย่างจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในๆ หลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะมาแทนที่โดยการปล่อยรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นแสงสีเดียว (คลื่นความถี่เดียว) คลื่นที่ปล่อยออกมาจะแสดงลักษณะเฉพาะของธาตุองค์ประกอบของตัวอย่าง ดังนั้นเครื่องมือ EDS สามารถใช้หาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าสาร โดยมักจะใช้ร่วมกับ SEM

2.6.3.1 ลักษณะการใช้งาน SEM (SEM operation mode)

ในทางปฏิบัติ ลักษณะการใช้งาน SEM อาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ดังนี้

- 1) High Resolution Mode สำหรับงานที่ต้องการกำลังขยายสูง จึงต้องการจุดตกกระทบขนาดเล็ก
- 2) High Depth of Field Mode สำหรับงานที่ต้องการความชัดลึกสูง จึงต้องการใช้มุมคอนเวอร์เจนต์ของลำอิเล็กตรอนเล็กๆ
- 3) High Current Mode สำหรับการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้รังสีเอกซ์ ต้องการปริมาณกระแสมากเพื่อเพิ่มความไว (Sensitivity) ต่อการตรวจวัดปริมาณของธาตุ
- 4) Low Voltage Mode นอกเหนือไปจากการใช้งาน SEM ในแบบต่างๆข้างต้น ในปัจจุบัน SEM บางแบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ค่าต่ำกว่า 5 kV เนื่องจากการใช้ SEM ลักษณะนี้จะได้ข้อมูลพื้นผิวที่ดีขึ้น อีกทั้งยังลดปริมาณประจุสะสมบนผิว (Charging) จึงทำให้สามารถศึกษาตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าโดยไม่ต้องเคลือบด้วยคาร์บอน

2.6.3.2 สัญญาณแบบต่างๆ (Various types of signal)

- 1) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวและเป็นสัญญาณที่เราสามารถนำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมียังมีแบบย่อยอีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด
- 2) อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered electrons) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมีและลักษณะโทโพกราฟิกของพื้นผิว
- 3) รังสีเอกซ์ (X-Ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบเป็นสัญญาณที่ใช้ในเทคนิค EDS และ WDS (Wavelength Dispersive Spectrometer)

2.6.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystal structure) จะใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD) ซึ่งเป็นเทคนิควิเคราะห์วัสดุโดยให้ข้อมูลทางด้านโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative)

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและมีความยาวคลื่นระหว่าง 10 – 0.01 nm รังสีเอกซ์จะแสดงคุณสมบัติเชิงคลื่น คือการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่าง

อะตอมในผลึกและหลังจากผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบอะตอมของผลึกแล้วเกิดการกระเจิงโดยการชนกันกับอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึก ซึ่งการกระเจิงของรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นทุกทิศทางโดยความยาวคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงเรียกการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบนแบบนี้ว่า การกระเจิงแบบอาพันธ์ (Coherent scattering) ซึ่งสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

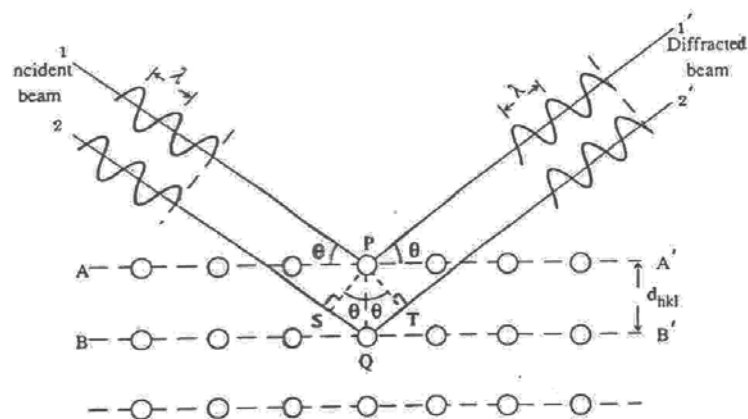
2.6.4.1 กฎของแบรกก์

ในปี ค.ศ. 1912 แบรกก์ (W.H. Bragg) ได้อธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอมเคลื่อนที่ไปตกกระทบระนาบอะตอมที่ขนานกันทำมุม θ กับระนาบของอะตอม โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นอะตอม (d) ในผลึกที่แน่นอน รังสีเอกซ์เลี้ยวเบนจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุดเมื่อผลต่างของทางเดินรังสีเอกซ์กระเจิงออกจากระนาบต่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law)¹ ดังภาพประกอบ 21 ซึ่งแสดงรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบบนผิวหน้าของผลึกด้วยมุม θ โดย A และ B แทนระนาบของผลึกที่มีระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d โดยรังสีตกกระทบคือรังสี 1P และ 2Q ขณะที่รังสีสะท้อนคือรังสี 1P' และ 2Q' บนระนาบ A และ B ตามลำดับ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน จะเห็นได้ว่าทางเดินของลำแสง 2Q2' ยาวกว่าทางเดินของลำแสง 1P1' เป็นระยะทาง SQ+QT โดยเรียกว่า ความแตกต่างของทางเดินคลื่นและพบว่ามีค่าเท่ากับ $2d\sin\theta$ ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ โดยเขียนเป็นสมการดังนี้

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.13)$$

สมการ 2.13 เรียกว่ากฎของแบรกก์ โดยถ้า n เป็นจำนวนเต็ม จะเกิดการสะท้อนโดยเรียกรังสีที่สะท้อนออกมาว่าการสะท้อนของแบรกก์ (Bragg reflection) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ $\lambda \leq 2d$

¹วรรณ ชูรส. (2546). การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์บางประเภทในประเทศไทยโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์. หน้า 20.



ภาพประกอบ 21 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์

ที่มา: ปัญญา ธนบุญสมบัติ. (2544). การศึกษาวัสดุโดยใช้เทคนิคดิฟแฟรกชัน. หน้า 25.

จากภาพประกอบ 20 รังสีเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบอะตอมในชั้นที่ต่างกัน ทำมุม θ และมีการสะท้อนออกไปตามกฎการสะท้อน ถ้าความแตกต่างกันของทางเดินรังสีทั้งสองมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ นั่นคือรังสีทั้งสองมีเฟสเดียวกัน จะได้ว่า

$$SQ + QT = n\lambda \quad (2.20)$$

จากรูปจะได้ว่า

$$SQ + QT = 2d \sin \theta \quad (2.21)$$

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.22)$$

เมื่อ n คือ อันดับการสะท้อน (Order of reflection) ซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ...

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

เรียกสมการที่ 2.22 ว่า กฎของแบรกก์¹

¹ปัญญา ธนบุญสมบัติ. (2544). การศึกษาวัสดุโดยใช้เทคนิคดิฟแฟรกชัน พื้นฐานสำหรับฟิสิกส์เคมี วัสดุศาสตร์และวิศวกรรม. หน้า 107.

จากกฎของแบรกก์เราสามารถนำค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (Lattice spacing : d_{hkl}) มาคำนวณหาค่าความยาวของค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) ¹

จาก
$$d_{hkl} = \frac{1}{|d_{hkl}^*|} \quad (2.23)$$

โดยที่
$$d_{hkl}^* = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$$

$$d_{hkl}^* = \sqrt{(h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*) \cdot (h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*)}$$

$$d_{hkl}^* = \sqrt{h^2 a^{*2} + k^2 b^{*2} + l^2 c^{*2} + 2(hk\vec{a}^* \cdot \vec{b}^* + kl\vec{b}^* \cdot \vec{c}^* + lh\vec{c}^* \cdot \vec{a}^*)} \quad (2.24)$$

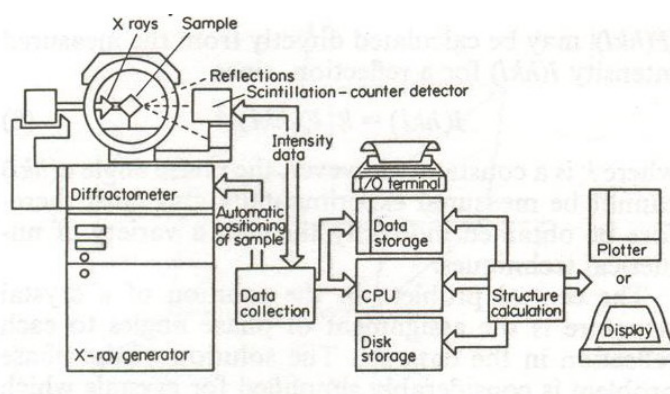
โดย a, b, c คือ ค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) (Å)
 a^*, b^*, c^* คือ แลตทิซพารามิเตอร์ส่วนกลับ (Reciprocal lattice parameter) (Å)
 h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices)
 d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing)
 d_{hkl}^* คือ ส่วนกลับของระยะห่างระหว่างระนาบ (Reciprocal d-spacing)

ZnO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล ดังนั้นในที่นี้ขอกล่าวเฉพาะระบบเฮกซะโกนอล ซึ่งมีค่าคงที่ผลึก $a = b \neq c$ และมีมุม $\alpha, \beta = 90^\circ$ และ $\gamma = 120^\circ$ สามารถหาค่าส่วนกลับกำลังสองของระยะห่างระหว่างระนาบจากสมการ (2.24) ดังนี้

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.25)$$

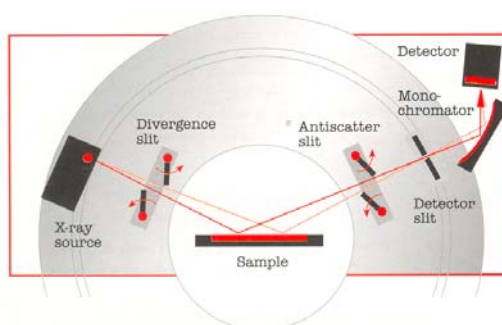
2.6.4.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer)

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้แก่ 1.หลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์ที่ออกจากหลอดจะต้องผ่านการกรองให้เหลือเพียงความยาวคลื่นเดียว หรืออาจเป็นสองความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกันมาก ก่อนเข้าสู่สารตัวอย่าง 2.แท่นยึดสารตัวอย่าง 3.หัววัดความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปในแนวทำมุมต่างๆกับแนวรังสีต้นกำเนิดโดยมีศูนย์กลางการหมุนอยู่ที่ตำแหน่งผิวของสารตัวอย่าง 4.อุปกรณ์ทั้งสามข้างต้นยึดติดบนแท่นที่มีมอเตอร์ขับเคลื่อนเรียกโกนิโอมิเตอร์ (Goniometer) 5.ชุดช่องเล็กลาย (Slit) ใช้กำหนดขนาดและความหนาของลำรังสีเอ็กซ์ 6.หน่วยประมวลผลและควบคุมการทำงานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ ทำการเก็บบันทึกข้อมูลความเข้มของรังสีที่ผ่านหัววัดรังสีที่มุมต่างๆ เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป ดังแสดงในภาพประกอบ 2.22



ภาพประกอบ 22 ส่วนประกอบของเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ที่มา : Lifshin, Eric. (1993). *Concise Encyclopedia of Materials Characterization*. p 460.



ภาพประกอบ 23 องค์ประกอบและแนวรังสีเอ็กซ์บนโกนิโอมิเตอร์

ที่มา : Bruker Advance X-ray. (1997). *Solutions. Bruker axs, inc. Germany*. p.10

การทำงานของเครื่องเริ่มจาก การจ่ายกระแสเข้าไปในขั้วแคโทดทำให้ไส้หลอดร้อนขึ้น อิเล็กตรอนไปจับกับหนาแน่นบริเวณไส้หลอด หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง ทำหน้าที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้ระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดกับแคโทด อิเล็กตรอนจากแคโทดจะถูกเร่งไปยังแอโนดด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงดันสูงนี้ อิเล็กตรอนที่มาถึงแอโนดจะมีความเร็วสูงเข้าชนกับแอโนด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในวัสดุที่ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด หรือทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำอย่างในชั้น K หลุดออก และอิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่สูงกว่าตกกลับเข้าแทนที่ เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนรังสีเอกซ์ การเกิดรังสีเอกซ์นอกจากเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานแล้ว ยังสามารถเกิดขึ้นได้จากอิเล็กตรอนที่เข้าชนแอโนดเฉียดเข้าไปใกล้นิวเคลียสของอะตอมแอโนดทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ เกิดการปลดปล่อยพลังงานเป็นรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นต่างๆ เป็นรังสีต่อเนื่องด้วย รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมธาตุที่เป็นขั้วแอโนดจะมีความถี่เฉพาะตามชนิดของวัสดุที่ทำเป็นแอโนด โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าแอโนดจะนิยมใช้ทองแดง (Copper : Cu) เป็นขั้วไฟฟ้า การที่ขั้วแอโนดเป็นขั้วที่อิเล็กตรอนเข้าชน บางครั้งเราจึงเรียกแอโนดว่าเป้า(target) จากนั้นรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กันจะผ่านไปผ่านฟิลเตอร์ (Filter) เพื่อกรองให้เหลือความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว จากนั้นรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวจะถูกบีบให้เป็นลำแคบลงโดยไดเวอร์เจนสลิตและตกกระทบบนตัวอย่างซึ่งติดไว้กับแกนของโกนิโอมิเตอร์ โดยตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่หัววัดสัญญาณรังสีเอกซ์เรย์ (X-ray detector) จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ดังแสดงในภาพประกอบ 21 จากนั้นรังสีเลี้ยวเบนจะผ่านไปยัง รีซีฟิงสลิต (Receiving slit) และเข้าไปยังหน่วยรับสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และค่าความเข้มรังสี นำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากฐานข้อมูลของ JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards :JCPDS) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกต่อไป

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1998 คาสโตรและอัลแดน (Castro, M.S.; & Aldao, C.M.) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาผนึกที่มีผลต่อการดูดซึมออกซิเจนในเซรามิกส์ ZnO พบว่า อุณหภูมิการเผาผนึกมีผลโดยตรงต่อการดูดซึมของออกซิเจนในเซรามิกส์ ZnO โดยอุณหภูมิการเผาผนึกต่ำๆ (600°C) จะส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กและมีรูพรุนเกิดขึ้นในเนื้อเซรามิกส์ ZnO มาก ทำให้เกิดการดูดซึมออกซิเจนได้ดีส่งผลให้ออกซิเจนแพร่เข้าสู่เกรนได้มาก และให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ ZnO สูงขึ้น แต่เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงขึ้น (700°C และ 800°C) พบว่าอุณหภูมิการเผาผนึกจะส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น รูพรุนมีจำนวนน้อยลง และให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ ZnO ลดลง

นอกจากนั้นอุณหภูมิการเผาผนึกยังส่งผลต่อค่าความหนาแน่นในเซรามิกส์ ZnO ด้วย โดยอุณหภูมิการเผาผนึกที่สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นเพราะเกิดการผนึกเชื่อมติดกันระหว่างขอบเกรน การเชื่อมติดกันของขอบเกรนทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนหายไปส่งผลให้ผิวหน้า (Surface) ลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นของเซรามิกส์ ZnO เพิ่มขึ้น

สำหรับตัวอย่างที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Quenched) และตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวลงเองอย่างช้าๆ (Cooled) หลังการเผาผนึกพบว่า ตัวอย่างที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว จะให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวลงเองอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการทำให้ตัวอย่างเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วหลังการเผาผนึกจะทำให้ขอบเกรนมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและตัวกั้น (barrier) กว้างขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมของออกซิเจนเกิดขึ้นได้น้อยซึ่งทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าสู่เกรนได้น้อย และให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง

ในปี 2004 โตโสภณ; สิริกุลรัตน์; และตันหมศิริ (T.Tohsophon; N. Sirikulrat; & T.Sirikulrat) ได้ศึกษาผลของการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Quenched) หลังการเผาผนึก และลักษณะการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ ZnO ที่เจือด้วย Al_2O_3 หรือ AZO พบว่าการเจือ Al_2O_3 ปริมาณน้อยๆ (0.3 - 2 mol%) ใน ZnO ส่งผลให้เซรามิกส์ AZO มีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 80-120 S/m การนำไฟฟ้าเกิดจากการละลายของของแข็ง Al_2O_3 ในโครงสร้างของ ZnO ทำให้เกิดประจุพาหะ (Carrier charge) ขึ้นในโครงสร้างของ ZnO ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าในเซรามิกส์ AZO สูงขึ้น แต่ถ้าปริมาณของสารเจือ Al_2O_3 มากเกินไป กล่าวคือมากกว่า 2 mol% จะไปยับยั้งการโตของเกรนและมีผลทำให้แรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการเผาผนึกลดลง อีกทั้งทำให้เกิดการก่อตัวของเฟสที่สอง (Second phase) ซึ่งทำให้การนำไฟฟ้าลดลง

สำหรับตัวอย่างที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Quenched) และตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวลงเองอย่างช้าๆ (Cooled) หลังการเผาผนึก พบว่าตัวอย่างที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วให้ค่าการนำไฟฟ้าดีกว่าตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวลงเองอย่างช้าๆ เพราะการทำตัวอย่างให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว

หลังการเผาไหม้จะทำให้เกิดตำหนิแบบช็อตตี (Schottky defect) ขึ้น ผลคือทำให้เกิดประจุตัวนำอิสระและการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวอย่างของการเกิดตำหนิแบบช็อตตี เช่น การเกิดช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancies) การละลายของ Al_2O_3 ในโครงสร้างของ ZnO นอกจากนี้การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วก็ยังก่อให้เกิดตัวกั้น (barrier) ที่สูงขึ้นเป็นการป้องกันไม่ให้ออกซิเจนแพร่เข้าสู่เกรนได้

ในปี 2006 ชางและฮาน (Yongheng, Zhang; & Juan, Han) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของเซรามิกส์ AZO พบว่า ZnO ที่เจือด้วย Al_2O_3 ปริมาณ 0.25 wt% เกรนมีขนาดใหญ่ที่สุดและให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดแต่การเจือด้วย Al_2O_3 มากกว่า 1 wt% ขึ้นไปจะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพราะการเจือที่มากเกินไปทำให้เกิดประจุไฟฟ้าอยู่กันอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง ทำให้ขาดความคล่องตัวและส่งผลให้การนำไฟฟ้าลดลง

สำหรับโครงสร้างจุลภาคพบว่าค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อมีการเติมสารเจือ Al_2O_3 มากกว่า 1wt% การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในตัวอย่างที่เจือด้วย Al_2O_3 มากกว่า 1wt% เนื่องจากในโครงสร้างมีรูพรุนมากขึ้น ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะไปขัดขวางการเชื่อมต่อกันระหว่างเกรนส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กและเนื่องมาจากการเกิดเฟสที่สอง (ZnAl_2O_4) ที่ไม่นำไฟฟ้าขึ้นในโครงสร้าง

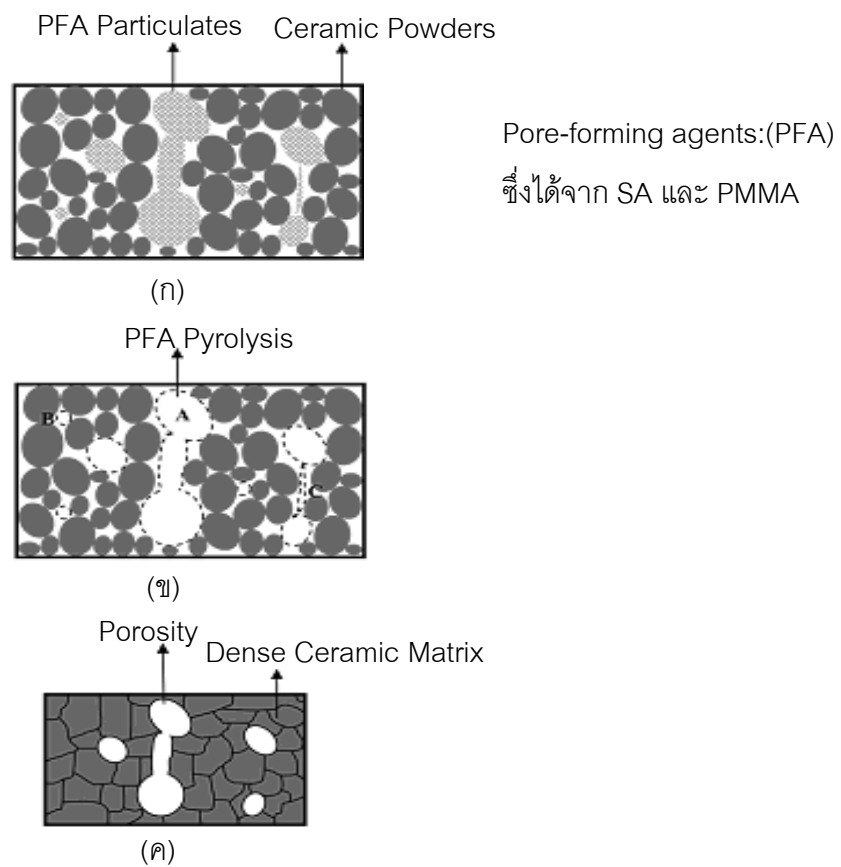
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PMMA และ SA รวมถึงการเกิดรูพรุนในวัสดุ ได้มีรายงานดังต่อไปนี้

ในปี 2007 โฮอีและเทเลอร์ (Hoey, David.; & Taylor, David) ศึกษาเรื่องการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่นภายในวัสดุ PMMA ที่มีรูพรุน : ผลของความรุนแรงของความเค้น พบว่ารอยบากที่แหลมคมและลึกภายในวัสดุ PMMA ส่งผลให้ความเป็นรูพรุนมีค่ามากขึ้นแต่ค่าการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่นมีค่าลดลง โดยค่าความเป็นรูพรุนแปรผกผันกับค่าการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่น ส่วนรอยบากเพียงเล็กน้อยและรอยบากที่ตื้นหรือรอยบากที่เป็นครึ่งวงกลมเล็กๆ จะไม่มีผลต่อค่าการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่น ส่วนจำนวนของรูพรุนอิสระที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ PMMA ส่งผลต่อค่าการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่น โดยจำนวนของรูพรุนอิสระที่มีจำนวนมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่นมีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นรูพรุนกับค่าความเป็นรูพรุนอิสระที่ส่งผลต่อค่าการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่นพบว่า วัสดุ PMMA ที่มีรูพรุนน้อยๆจะมีค่าการสูญเสียสภาพความยืดหยุ่นน้อยกว่าวัสดุ PMMA ที่มีรูพรุนอิสระ

ในปี 1998 ที่เซ็งและคณะ (Tseng, Wenjea J; Liu, Dean-Mo; & Hsu, Chung-King) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ SA ที่ส่งผลต่อโครงสร้างการแขวนลอยและโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกส์เซอร์โคเนียที่ยังไม่ได้เผาโดยวิธีการฉีดผ่านบั่ว พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวหน้าของเซรา

มิกซ์เซอร์โคเนียเมื่อใส่ SA ในปริมาณที่แตกต่างกันและเกิดการแขวนลอยของสารขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค โดยอนุภาคจะมีการเกาะกลุ่มกันอย่างมีรูปแบบมากขึ้นเมื่อมีการเติม SA มากกว่า 3 wt% การดูดซึมที่บริเวณผิวหน้าจะมากเมื่อมีการเติม SA มากขึ้นและทำให้การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมีความเป็นระเบียบมากขึ้นด้วย แต่ในขณะเดียวกันความหนืดและความเค้นจะลดลง นอกจากนั้นการเพิ่มปริมาณ SA จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตัวกันและเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหน้าของอนุภาคเซรามิกซ์เซอร์โคเนีย แต่การใส่ SA ในปริมาณที่มากเกินไป 5 wt% จะทำให้เกิดรอยแตกในเนื้อวัสดุได้ นอกจากปริมาณ SA ที่มากเกินไปแล้วอุณหภูมิก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับรอยแตกที่เกิดขึ้น โดยจะเริ่มเห็นรอยแตกในตัวอย่างที่มีอุณหภูมิในการเผามากกว่า 250 °C

ในปี 2006 ซาง; ลี; และ โบปิงซาง (H.L. Zhang; Jing-Feng Li; & Bo-Ping Zhang) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกซ์ PZT ที่มีรูพรุนแตกต่างกัน พบว่าความเป็นรูพรุนของเซรามิกซ์ PZT จากการเติม SA ให้ค่าของความเป็นรูพรุน 3 - 43 % ในขณะที่ความเป็นรูพรุนของเซรามิกซ์ PZT จากการเติม PMMA มีค่าความเป็นรูพรุน 3 - 40% เมื่อเผาผนึกเซรามิกซ์ PZT ที่อุณหภูมิ 1,200 °C ความเป็นรูพรุนของเซรามิกซ์ PZT จากการเติม SA มีรูปร่างของรูพรุนที่ไม่แน่นอนแต่รูพรุนจากการเติม PMMA มีรูปร่างเป็นทรงกลม โดยรูพรุนของเซรามิกซ์ที่ได้จากการเติม SA จะมีรูพรุนเปิด (Open pore) มากกว่าที่ได้จาก PMMA ดังนั้นจึงมีโอกาที่จะเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างเกรนได้มากกว่า สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant : ϵ_r) และค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant : d_{33}) พบว่าค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกจะลดลงเชิงเส้นเมื่อความเป็นรูพรุนมีค่ามากขึ้นสำหรับเซรามิกซ์ที่เติม SA และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นมากกว่า 35% ทั้งนี้เป็นผลมาจากเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างรูพรุน จึงสรุปได้ว่าค่าทางไฟฟ้าของเซรามิกซ์ PZT ขึ้นกับทั้งรูปร่างของรูพรุนและจำนวนรูพรุน การเกิดรูพรุนนั้นเริ่มจากการที่อนุภาคของสารที่ก่อให้เกิดรูพรุนไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของเซรามิกซ์ PZT เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารเหล่านั้นจะระเหยไปเหลือไว้แต่ช่องว่างหรือรูพรุนซึ่งมีขนาดเท่ากับขนาดของอนุภาคของสารที่ระเหยไป เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีกโครงสร้างของอะตอมที่เป็นรูพรุนเหล่านั้นจะเกิดการเชื่อมต่อกันส่งผลให้ความหนาแน่นภายในโครงสร้างเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 24 แสดงการเกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของเซรามิกส์ PZT

ที่มา : Zhang,H.L.; Jing-Feng Li; & Bo-Ping Zhang.(2006).

*Microstructure and electrical properties of porous PZT ceramics derived from different pore-forming agents.*p 178.

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยนำผง ZnO และผงของ Al_2O_3 มาผสมกันด้วยอัตราส่วน 98 : 2 wt% จากนั้นนำ SA และ PMMA มาเจือในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% ตามลำดับ นำส่วนผสมทั้งหมดมาเตรียมเป็นเซรามิกส์ด้วยวิธีการผสมออกไซด์แบบดั้งเดิม (Conventional mixed oxide method) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 % ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich. ประเทศเยอรมัน ใช้เป็นสารตั้งต้น
2. อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide : Al_2O_3) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน
3. กรดสเตียริก (Stearic acid: SA) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99% ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
4. โพลีเมทิลเมทาไครเลต (Polymethylmethacrylate : PMMA) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99% ผลิตโดยบริษัท (Aldrich) ประเทศเยอรมัน
5. เอทานอล (Ethanol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9% ผลิตโดยบริษัท MERCK ประเทศเยอรมัน
6. อะซิโตน (Acetone : CH_3COCH_3)
7. กาวเงิน (Silver paste)
8. น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์ขนาดต่างๆ
2. กระบอกพลาสติกพร้อมฝาปิด ใช้สำหรับบดย่อย
3. ช้อนตักสาร
4. เทปกาวยและเทปพันเกลียว
5. อลูมิเนียมฟอยล์ (Foil)

6. ครกบดสาร (Agate mortar)
7. ลูกบดเซอร์โคเนียทรงกลม (Zirconia milling ball)
8. ถ้วยอลูมินา (Alumina crucible)
9. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนผสมสาร (Magnetic bar)
10. แม่พิมพ์โลหะทรงกระบอกสำหรับอัดขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm
11. กระจกทรายน้ำ เบอร์ 400 800 1000 และ 1,200
12. เตาแผ่นความร้อน (Hot plate) ผลิตโดยบริษัท VELP
13. ถังมือยาง
14. หน้ากาก (Mask)
15. เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Vecstar Furnaces รุ่น XF1 ผลิตโดยบริษัท Labquip ประเทศ

อังกฤษ

16. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper) ความละเอียด 0.001 (mm)
 17. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 (g) ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo รุ่น CG1003
- สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร)
18. เครื่องบดผสมแบบมอเตอร์ ผลิตจากประเทศอิตาลี สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร)
 19. ตู้บดสาร สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร)
 20. เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic pressing) แรงดัน 650 psi. สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร)
 21. เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น JDX-3530 ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
 22. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
 23. มัลติมิเตอร์ (Multimeter) รุ่น DM-879
 24. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Power supply) รุ่น ITL-1043 ผลิตโดยบริษัท Intellect 0 - 30 V, 3 A

3.3 สถานที่ดำเนินการวิจัย

1. ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
3. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

3.4 กระบวนการทำเซรามิกส์

1. การเตรียมผง

1.1 ชั่งสารเคมี ZnO Al_2O_3 SA และ PMMA ตามอัตราส่วนดังตาราง 1 เพื่อเตรียมเซรามิกส์ในระบบ $(100-x)$ AZO + xPMMA โดย $x = 0 \quad 1 \quad 5 \quad 10$ และ 25 wt%, AZO = 98 : 2 wt% ตามลำดับ และระบบ $(100-x)$ AZO + xSA โดย $x = 0 \quad 1 \quad 5 \quad 10$ และ 25 wt%, AZO = 98 : 2 wt% ตามลำดับ

1.2 นำสารที่ชั่งได้ใส่ในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุแกรนเซอร์โคเนียเต็มเอทิลเอทานอลให้ท่วมแกรนเซอร์โคเนียเพื่อช่วยในการบดผสมและช่วยให้ผงมีการกระจายตัวที่ดี ใช้เทปพันเกลียวพันรอบขอบกระป๋องก่อนปิดฝากระป๋องให้สนิทแล้วพันรอบฝากระป๋องด้วยเทปกาว ทำการบดผสมโดยใช้เครื่องบดผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3 นำสารที่ผ่านการบดผสมแล้วไปทำให้แห้ง โดยใช้แท่งแม่เหล็กสำหรับหมุนสารในขณะให้ความร้อนจากเตาแผ่นความร้อนไปด้วย

ตาราง 1 อัตราส่วนสารเคมีและปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมผง 100 g

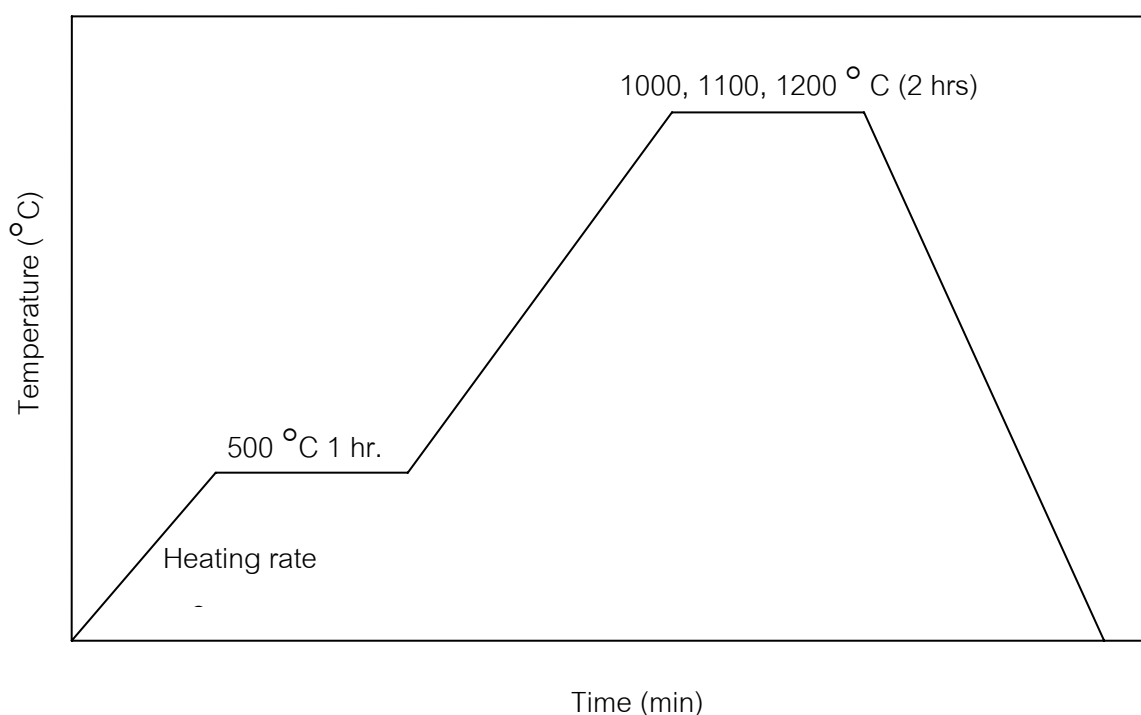
ชุดที่	AZO:SA/PMMA (wt%)	ปริมาณสารที่ใช้ (g)		
		ZnO	Al_2O_3	SA/PMMA
		(g)	(g)	(g)
1	100 : 0	19.600	0.400	0.000
2	99 : 1	19.404	0.396	0.200
3	95 : 5	18.620	0.380	1.000
4	90 : 10	17.640	0.360	2.000
5	75 : 25	14.700	0.030	5.000

หมายเหตุ อัตราส่วนของ ZnO: Al_2O_3 (AZO) คงที่ที่ 98:2 wt%

2. การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

2.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปปดสารที่แห้งสนิทด้วยครกบดให้เป็นผงละเอียด จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปผงละเอียดในแม่พิมพ์ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก แรงดัน 650 psi เป็นเวลา 1 นาที จะได้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.10 mm ความหนา 4.00 mm

2.2 ขั้นตอนการเผาเซรามิกส์ เรียงตัวอย่างในถ้วยอลูมินาโดยใช้ผงอลูมินาเป็นตัวอย่างพื้นทำการเผาผนึกในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1,000°C 1,100°C และ 1,200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้นอุณหภูมิ 5°C/min



ภาพประกอบ 25 แผนผังการเผาผนึกเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SAPMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000°C 1,100°C และ 1,200 °C ตามลำดับ

3. การตกแต่งชิ้นงาน

3.1 นำเซรามิกส์ที่ได้จากการเผามาขัดตกแต่งผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 400 800 1000 และ 1200 โดยขัดวนเป็นเลขแปดเพื่อให้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอก่อนนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและสมบัติทางไฟฟ้า

3.2 นำเซรามิกส์ที่ทำขั้วอิเล็กโทรดด้วยการทากาวเงิน (Silver paint) ไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้ฟู่กันทากาวเงินลงบนผิวหน้าของเซรามิกส์ เสร็จแล้วปล่อยให้แห้ง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้กาวเงินยึดติดกับผิวของเซรามิกส์

3.5 วิธีการวัดสมบัติทางกายภาพ

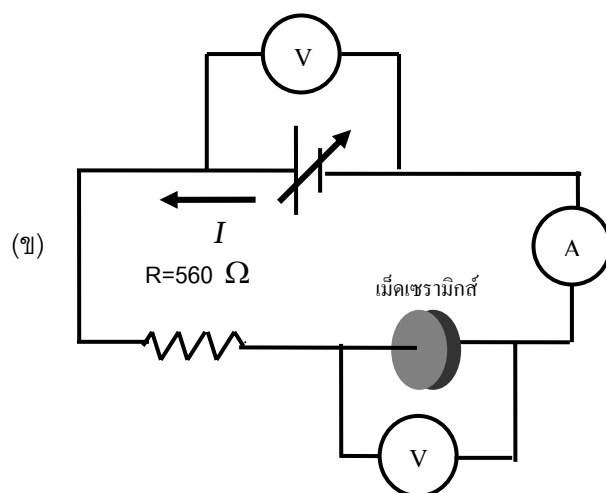
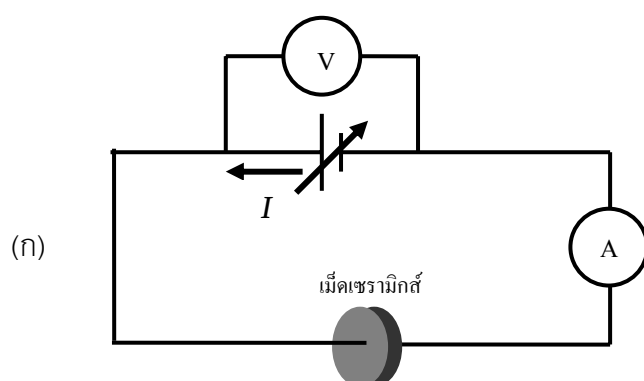
1. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ด้วยวิธีการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter : d) และวัดความหนา (Thickness : t) ของเซรามิกส์ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ทั้งก่อนเผาผืนึกและหลังเผาผืนึก จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวัดไปคำนวณหาค่าการหดตัวเชิงเส้นหลังการเผาดังสมการ (2.4)

2. วัดความหนาแน่นด้วยวิธีอาคิมีดิส (Archimedes Method) โดยนำเซรามิกส์ในแต่ละเงื่อนไขทั้งหมด 27 ตัวอย่างไปต้มในปิกเกอร์ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำ เข้าไปแทนที่รูพรุนในเซรามิกส์ นำไปชั่งในน้ำ ชั่งเปียกและชั่งแห้ง นำค่าที่ได้ไปหาความหนาแน่นจากสมการ (2.2) และหาค่าความเป็นรูพรุนเปิดโดยใช้สมการ (2.3)

3.6 วิธีการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

1. นำเซรามิกส์ที่ทำให้เกิดขั้วอิเล็กโทรดด้วยการทากาวเงินมาวัดค่าทางไฟฟ้า โดยต่อวงจรดังภาพประกอบ 3.2 โดยการให้ความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 - 30 V ในวงจร แล้ววัดกระแสที่ไหลผ่าน ในวงจรเพื่อนำมาหาลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V characteristics)

2. คำนวณหาความต้านทานไฟฟ้าจาก I-V characteristic สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าโดยใช้สมการ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ นำไปเขียนกราฟและหาความสัมพันธ์เทียบกับอุณหภูมิการเผาผืนึกและปริมาณการเจือ SA และ PMMA ที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 26 (ก) แสดงการต่อวงจรการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า

(ข) แสดงการต่อวงจรการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าในกรณีที่

เซรามิกส์มีความต้านทานต่ำ

3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกส์ AZO ด้วยเครื่อง SEM การเตรียมชิ้นงานก่อนการนำไปถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM นั้นมีวิธีการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้



ภาพประกอบ 27 แสดงการเตรียมเซรามิกส์ก่อนนำไปวัดโครงสร้างจุลภาค

งานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งเป็นสัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคนำข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) โดยวิธีการใช้เส้นลากตัด (Linear intercept method)

3.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาวិเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างว่ามีการจัดเรียงตัวของโครงผลึกเป็นรูปแบบใด เริ่มต้นจากการนำเซรามิกส์ AZO ไปทำความสะอาด จากนั้นนำไปขัดผิวหน้าตัวอย่างจนขึ้นเงาและได้ระนาบ แล้วจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการวัดด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD) โดยกำหนดมุมการหมุนของหัววัดสัญญาณ (detector) ตั้งแต่ 20° - 80° ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ จากนั้นนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และค่าระยะห่างระหว่างระนาบที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลของ JCPDS เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและคำนวณหาค่าคงที่ผลึกโดยใช้สมการ (2.25)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในบทที่ 3 โดยเริ่มจากการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณและการเผาผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เช่น ลักษณะของเม็ด สีของเม็ด ความหนาแน่น การหดตัวเชิงเส้น และความเปราะบาง จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD) สดทำยวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกส์ (I-V characteristics)

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเม็ดเซรามิกส์

4.1.1 การตรวจวิเคราะห์ลักษณะทั่วไปของเซรามิกส์ที่เตรียมได้

เซรามิกส์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีผสมออกไซด์แบบดั้งเดิมในอัตราส่วนต่างๆ ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ด้วยอัตราขึ้น-ลงของอุณหภูมิ 5 °C /นาที่ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าสีของตัวอย่างที่เจือด้วย SA และ PMMA หลังผ่านการเผาผนึกแล้ว มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากภาพประกอบ 28 แสดงลักษณะทั่วไปของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณและการเผาผนึกที่ต่างกันพบว่า สีของเม็ดตัวอย่างก่อนเผา (Green body) ในทุกอัตราส่วนและอุณหภูมิเผาผนึกเป็นสีขาว เมื่อผ่านกระบวนการเผาผนึกแล้ว ที่อุณหภูมิ 1,000 °C สีของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่ไม่เจือเป็นสีเหลืองอ่อน แต่เมื่อเจือด้วย SA แล้ว พบว่าสีของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ทุกอัตราส่วนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองแกมเขียว สีเม็ดจางลงเมื่อปริมาณการเจือเพิ่มขึ้น แต่การเจือในปริมาณ 25 wt% พบว่าสีของเซรามิกส์เป็นสีเขียวอ่อนและมีรูพรุนบางส่วน

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกเป็น 1,100 °C พบว่าสีของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่ไม่เจือเป็นสีเหลืองอ่อนเข้มขึ้นกว่าที่อุณหภูมิเผาผนึก 1,000 °C ส่วนเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA พบว่าที่ปริมาณการเจือ 1-5 wt% เซรามิกส์เป็นสีเหลืองอ่อนและสีเข้มขึ้นเมื่อปริมาณการเจือเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่เจือ SA ในปริมาณ 10 wt% เซรามิกส์เป็นสีขาว ส่วนในตัวอย่างที่เจือ SA 25 wt% เป็นสีเขียวอ่อนและมองเห็นรูพรุนชัดเจนขึ้น

เมื่ออุณหภูมิเผาขึ้นเป็น 1,200 °C พบว่าสีของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่ไม่เจือเป็นสีเหลืองอ่อนซึ่งเข้มขึ้นกว่าอุณหภูมิเผาขึ้น 1,000 °C และ 1,100 °C ส่วนเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 1-5 wt% เป็นสีเหลืองเข้มโดยสีตัวอย่างเข้มขึ้นเมื่อปริมาณการเจือเพิ่มขึ้น ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างที่เจือ SA 10 wt% เซรามิกส์เป็นสีขาว และตัวอย่างที่เจือ SA 25 wt% เป็นสีเขียวอ่อนโดยเห็นรูพรุนจำนวนมากอย่างชัดเจน

จากภาพประกอบ 29 แสดงลักษณะทั่วไปของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณและอุณหภูมิเผาขึ้นที่ต่างกันพบว่า ที่อุณหภูมิ 1,000 °C เซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA 1 wt% มีสีเหลืองอ่อน เมื่อปริมาณการเจือเพิ่มเป็น 5 - 25 wt% สีของเม็ดเปลี่ยนเป็นสีขาว โดยตัวอย่างที่เจือ PMMA ในปริมาณ 25 wt% มีลักษณะผิวไม่เรียบและเปราะ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาขึ้นเป็น 1,100 °C เซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 1-5 wt% มีสีเหลืองอ่อน ในขณะที่ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 10-25 wt% เป็นสีขาว เม็ดเซรามิกส์ที่เจือด้วย PMMA ทุกอัตราส่วนมีผิวหน้าที่เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียว

เมื่ออุณหภูมิเผาขึ้นเป็น 1,200 °C พบว่าเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA 1 wt% มีสีเหลืองอมเขียว เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ PMMA เป็น 5 wt% สีของเซรามิกส์เปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน ขณะที่ปริมาณการเจือ PMMA เป็น 10-25 wt% เซรามิกส์เปลี่ยนเป็นสีขาว เซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในทุกอัตราส่วนมีผิวหน้าที่เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียว

เม็ดเซรามิกส์ที่ผ่านการเผาขึ้นแล้ว รูปร่างของเม็ดไม่มีลักษณะบิดเบี้ยวหรือแตกหัก มีเพียงตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA 25 wt% เท่านั้นที่เม็ดมีลักษณะเปราะและพรุนเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเป็นไปอย่างหลวมๆ เซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA มีสีและรูพรุนแตกต่างกันตามปริมาณการเจือและอุณหภูมิเผาขึ้น โดยเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณน้อยๆ (1-5 wt%) เซรามิกส์จะมีสีเหลืองอ่อนและเข้มขึ้นตามปริมาณการเจือ เมื่อเพิ่มปริมาณ SA เป็น 10 wt% เซรามิกส์เป็นสีขาวและเมื่อปริมาณการเจือสูงถึง 25 wt% จะเป็นสีเขียวอ่อนและมองเห็นรูพรุนได้ชัดเจน ในขณะที่เซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ก็ให้ผลในทางเดียวกันแต่มีสีจางกว่าและเมื่อปริมาณการเจือเป็น 5-25 wt% เซรามิกส์เป็นสีขาว มีผิวหน้าเรียบเนียนเป็นเนื้อเดียว ส่วนผลของอุณหภูมิเผาขึ้นไม่ส่งผลต่อสีและรูพรุนของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA อย่างชัดเจน

ตัวอย่างก่อนเผา (Green body)			
ตัวอย่างหลังเผา ปริมาณสารเจือ SA(wt%)	1,000 °C	1,100 °C	1,200 °C
0			
1			
5			
10			
25			

ภาพประกอบ 28 แสดงเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ปริมาณสารเจือ PMMA (wt%)	อุณหภูมิการเผาผนึก		
	1,000 °C	1,100 °C	1,200 °C
0			
1			
5			
10			
25			

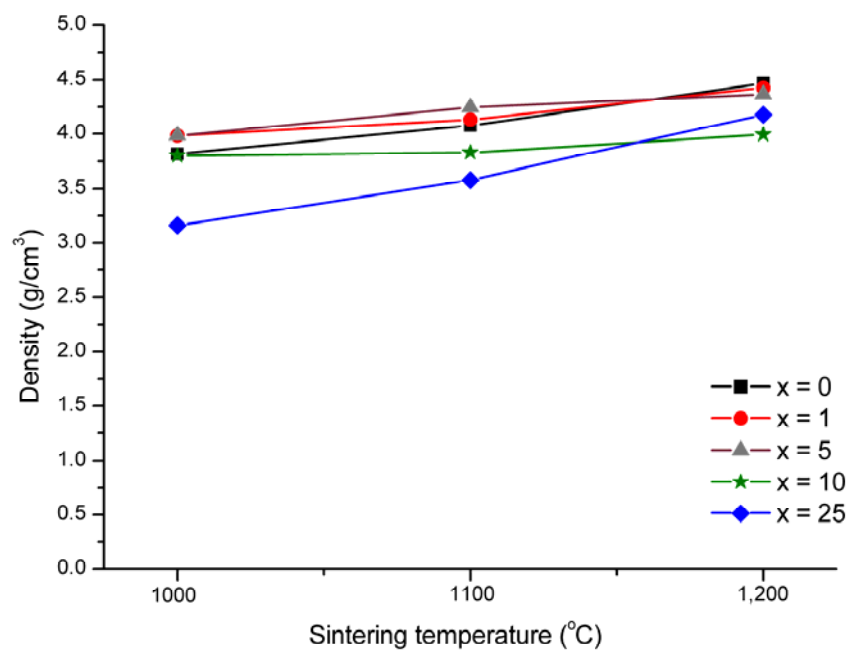
ภาพประกอบ 29 แสดงเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

4.1.2 ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกส์ (Density)

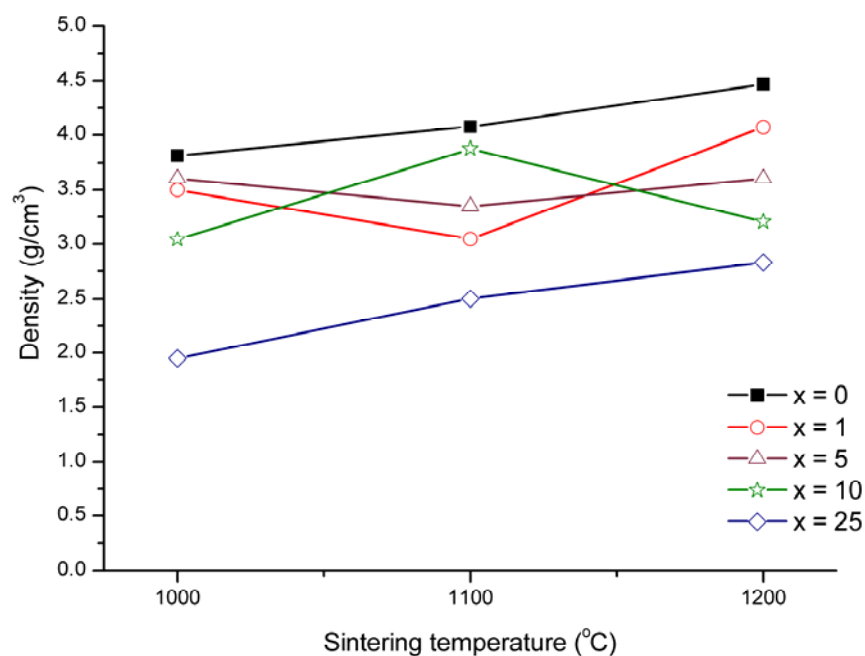
ผลของอุณหภูมิเผาผนึกและปริมาณการเจือที่มีต่อความหนาแน่นของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA แสดงดังภาพประกอบ 30 พบว่า ตัวอย่างที่ไม่เจือมีความหนาแน่นระหว่าง $3.8-4.5 \text{ g/cm}^3$ ส่วนตัวอย่างที่เจือด้วย SA ทั้งหมดมีความหนาแน่นระหว่าง $3.2 - 4.4 \text{ g/cm}^3$ โดยตัวอย่างที่มีอุณหภูมิเผาผนึกสูงจะมีความหนาแน่นสูงขึ้นตามลำดับ ตัวอย่างที่มีการเจือ SA ในปริมาณน้อยๆ (1-5 wt %) มีความหนาแน่นสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เจือ SA ในขณะที่ตัวอย่างที่มีการเจือ SA ในปริมาณมาก (10-25 wt%) มีความหนาแน่นน้อยลง

ภาพประกอบ 31 แสดงอุณหภูมิการเผาผนึกที่มีผลต่อความหนาแน่นของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีความหนาแน่นระหว่าง $2 - 4 \text{ g/cm}^3$ ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ทุกปริมาณและอุณหภูมิการเผาผนึกให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ อุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้นไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของตัวอย่างอย่างชัดเจน ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 1-10 wt% มีความหนาแน่นระหว่าง $3 - 4 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เจือ PMMA ในปริมาณมาก (25 wt%) ที่มีค่าความหนาแน่นเพียง $2 - 2.8 \text{ g/cm}^3$

จากกราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA พบว่าตัวอย่างที่เจือด้วย SA มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA โดยตัวอย่างที่เจือด้วย SA มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือที่มากขึ้น แต่ปริมาณสารเจือที่มากเกินไปทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างลดลง โดยความหนาแน่นของตัวอย่างที่เจือ SA และ PMMA มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกสูงขึ้น เพราะอุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อกันบริเวณขอบเกรน ทำให้เกรนมีขนาดใหญ่และการเชื่อมต่อกันของเกรนทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนหายไปมีผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 30 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ



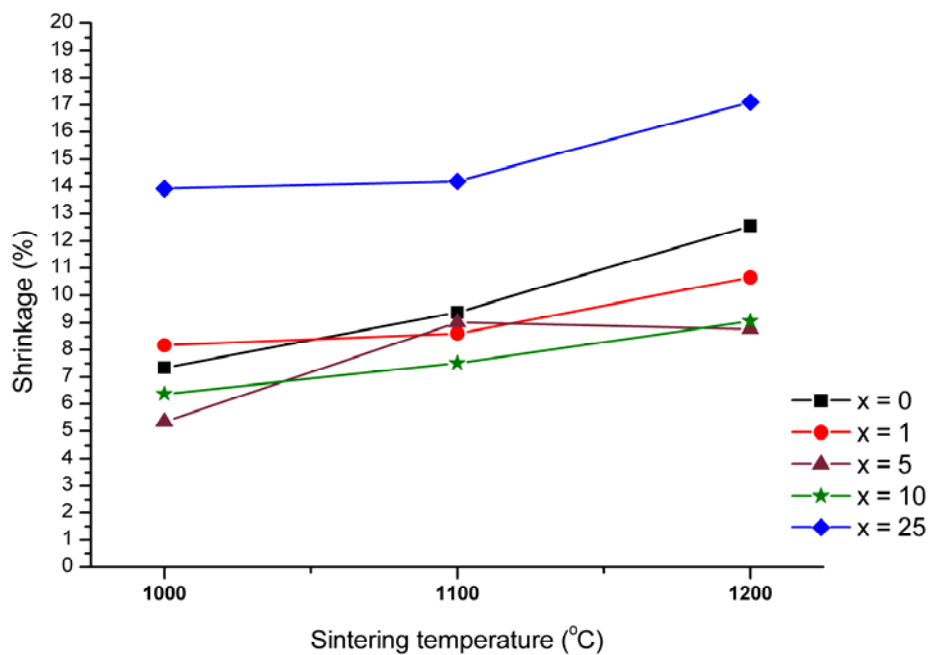
ภาพประกอบ 31 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ

4.1.3 การหดตัว (Shrinkage)

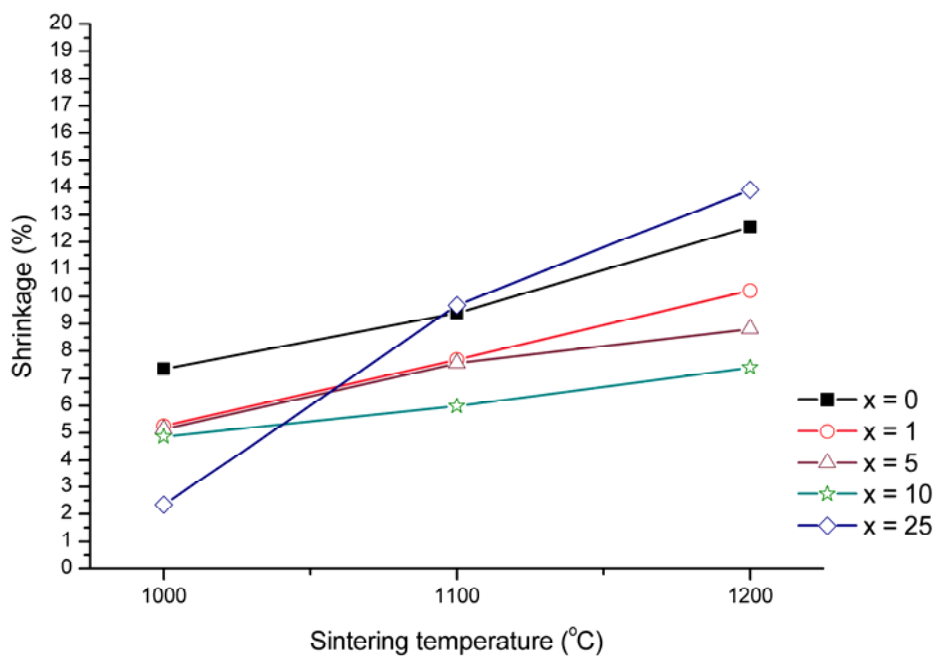
สำหรับผลของอุณหภูมิเผาผนึกและปริมาณการเจือที่มีต่อการหดตัวของเซรามิกส์แสดงดังภาพประกอบ 32 โดยพบว่าที่อุณหภูมิเผาผนึก 1000 °C ตัวอย่างที่ไม่เจือมีเปอร์เซ็นต์การหดตัว 7 -12 % ส่วนตัวอย่างที่มีการเจือ SA ปริมาณน้อยกว่า 25 wt% มีเปอร์เซ็นต์หดตัวใกล้เคียงกับเซรามิกส์ที่ไม่ได้เจือ SA โดยอยู่ในช่วง 5-9% แต่เมื่ออุณหภูมิเผาผนึกสูงขึ้นถึง 1200 °C ปริมาณสารเจือที่มากขึ้นจะทำให้ตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์หดตัวน้อยลงตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างที่มีการเจือ SA ที่ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000 °C มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงถึง 14 % และเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเป็น 1200 °C ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเจือ SA ในตัวอย่างปริมาณมาก เมื่อนำไปเผาผนึก จึงมี SA ระเหิดไปจำนวนมาก เนื่องจาก SA มีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงทำให้ตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูง

ผลของอุณหภูมิเผาผนึกและปริมาณการเจือที่มีต่อการหดตัวของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA แสดงดังภาพประกอบ 4.6 พบว่า ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1,000°C ตัวอย่างที่เจือ PMMA ทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์หดตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ โดยอยู่ในช่วง 2-5% แต่เมื่ออุณหภูมิเผาผนึกสูงขึ้นเปอร์เซ็นต์การหดตัวก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยอยู่ในช่วง 7-14% ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA 1-10 wt% มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวใกล้เคียงกันในทุกอุณหภูมิการเผาผนึก ในขณะที่ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA 25 wt% ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1,000 °C มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อย โดยมีค่าเพียง 2 % แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกถึง 1,200°C กลับมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงสุดถึง 14 %

ปริมาณการเจือ SA และ PMMA ในเซรามิกส์ AZO ที่ 25 wt% ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างทั้งสองมีค่าสูงสุด โดยตัวอย่างที่เจือด้วย SA 25 wt% มีค่าการหดตัวสูงกว่าตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่เจือด้วย SA ที่มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ทั้งนี้ SA และ PMMA ต่างมีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อนำตัวอย่างไปเผาผนึกที่อุณหภูมิสูง ทั้ง SA และ PMMA จะระเหิดไปส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างมากขึ้น ส่วนอุณหภูมิการเผาผนึกที่มีต่อการหดตัวของตัวอย่างพบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาผนึกสูงขึ้นส่งผลให้ตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเพิ่มขึ้นตามลำดับ



ภาพประกอบ 32 แสดงการหดตัวของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25wt%
 เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ



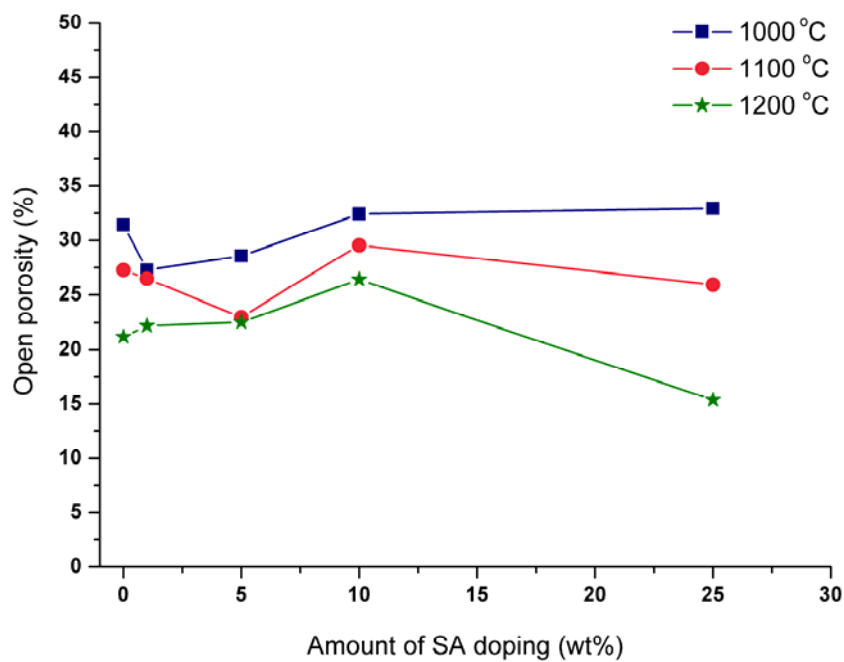
ภาพประกอบ 33 แสดงการหดตัวของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25wt%
 เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ

4.1.4 ความเป็นรูพรุน (Porosity)

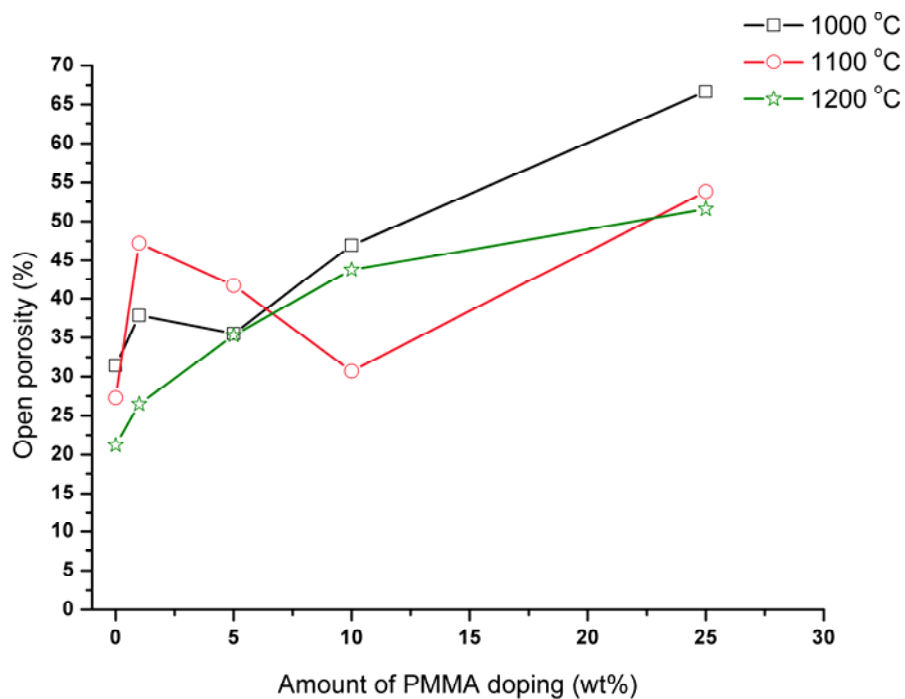
ผลการเจือ SA ในเซรามิกส์ AZO ในปริมาณและอุณหภูมิการเผาที่ต่างกันแสดงดังภาพประกอบ 34 พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีรูพรุนเปิดระหว่าง 16 – 33% โดยตัวอย่างมีรูพรุนเปิดลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการหลอมที่บริเวณขอบเกรน จึงเกิดการเชื่อมต่อระหว่างเกรนทำให้รูพรุนที่เคยพบระหว่างเกรนหายไป ส่วนผลของปริมาณสารเจือ SA ต่อรูพรุนเปิดของตัวอย่างพบว่า ที่อุณหภูมิเผา 1000 °C และ 1100 °C การเจือ SA ในเซรามิกส์ AZO ปริมาณน้อย (1-5 wt%) ทำให้รูพรุนเปิดของตัวอย่างลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือ SA มากขึ้น (10-25 wt%) กลับพบว่าปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อจำนวนรูพรุนเปิดของตัวอย่าง ซึ่งสังเกตได้จากมีจำนวนรูพรุนเปิดใกล้เคียงกับเซรามิกส์ AZO ที่ไม่มีการเจือ ในขณะที่อุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นเป็น 1200 °C ปริมาณสารเจือ SA ที่เพิ่มถึง 10 wt% ทำให้เกิดรูพรุนเปิดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือ SA สูงถึง 25 wt% กลับทำให้จำนวนรูพรุนเปิดลดลงถึง 16% ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด โดยสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การหดตัว ซึ่งมีความมากที่สุด

ส่วนจำนวนรูพรุนเปิดของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณและการเผาที่ต่างกันแสดงดังภาพประกอบ 4.8 พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีรูพรุนเปิดระหว่าง 21 – 67 % ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA มีจำนวนรูพรุนเปิดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือและปริมาณการเจือที่มากขึ้นส่งผลให้จำนวนรูพรุนเปิดเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้จำนวนรูพรุนเปิดในเซรามิกส์ลดลงซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากการเปรียบเทียบผลของการเจือเซรามิกส์ AZO ด้วย SA และ PMMA ที่มีต่อจำนวนรูพรุนเปิดของตัวอย่างพบว่า เซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA มีจำนวนรูพรุนเปิดมากกว่าเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA โดยตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA มีจำนวนรูพรุนเปิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือที่มากขึ้นตามลำดับ แต่ตัวอย่างที่เจือด้วย SA กลับมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างที่เจือ SA ในปริมาณ 1-5 wt% ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับขนาดเกรนของตัวอย่างที่เจือด้วย SA (ในหัวข้อ 4.2 โครงสร้างจุลภาค) โดยพบว่าปริมาณสารเจือที่มากขึ้นถึง 5 wt% ทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรูพรุนเปิดของตัวอย่างที่ลดลง สำหรับอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้จำนวนรูพรุนเปิดของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของเกรนที่บริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นบริเวณที่อ่อนที่สุด การเชื่อมต่อกันของเกรนนี้ทำให้จำนวนรูพรุนเปิดลดลงและเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพประกอบ 34 แสดงรูพรุนเปิดของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt%
เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ



ภาพประกอบ 35 แสดงรูพรุนเปิดของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt%
เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ

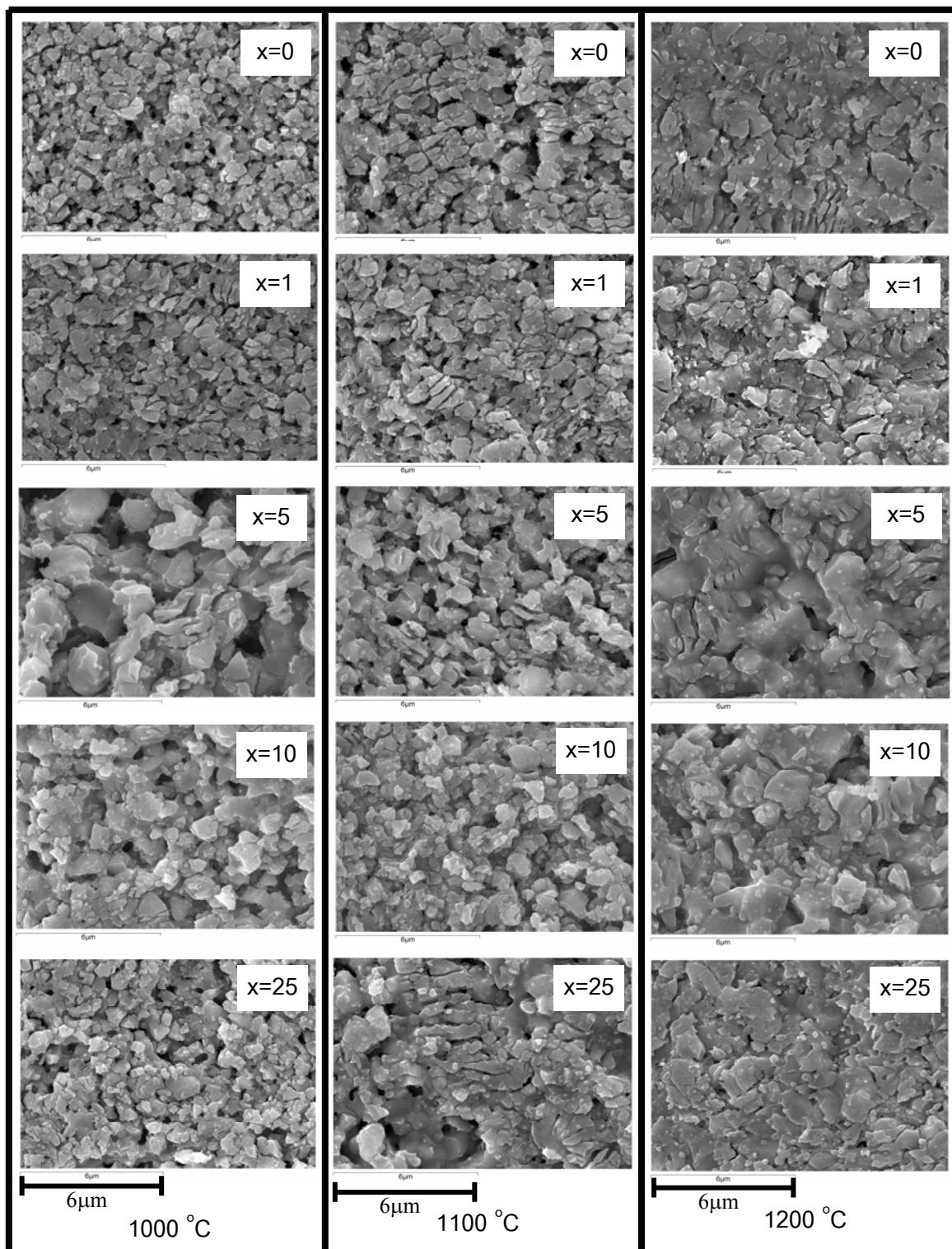
4.2 โครงสร้างจุลภาค

ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกและปริมาณสารเจือที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกส์ AZO เป็นดังนี้

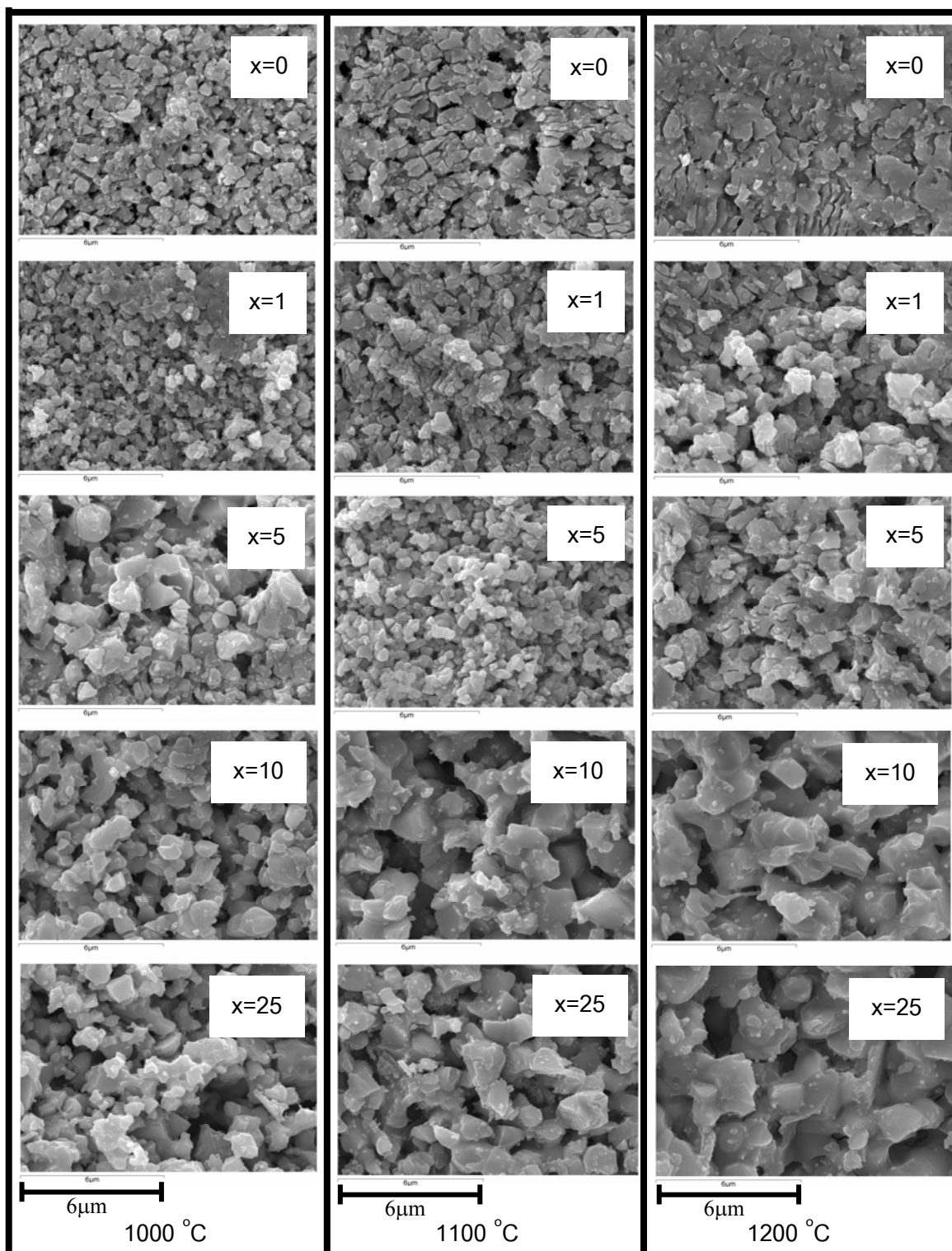
ภาพประกอบ 36 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณและอุณหภูมิการเผาผนึกที่ต่างกัน พบว่าปริมาณการเจือ SA น้อยๆ (1-5 wt%) เกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นเป็น 10-25 wt% พบว่าขนาดของเกรนลดลง ผลของอุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้นทำให้ขนาดของเกรนเซรามิกส์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนรูพรุนเปิดที่ลดลง ซึ่งขนาดเกรนของตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณและเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างกันแสดงดังภาพประกอบ 4.11 โดยขนาดเกรนของตัวอย่างมีค่าระหว่าง $0.5 - 1.2 \mu m$ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการเจือ SA ในเซรามิกส์ AZO ส่งผลต่อขนาดเกรนของตัวอย่างโดยเกรนมีขนาดใหญ่สุดเมื่อปริมาณสารเจือเป็น 5 wt% อย่างไรก็ตาม เกรนที่ได้จากการเจือทุกอัตราส่วนมีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เจือ โดยผลการเจือ SA ที่อุณหภูมิเผาผนึกที่สูงส่งผลต่อขนาดเกรนของเซรามิกส์สอดคล้องกันทั้งหมดดังกราฟ

ภาพประกอบ 37 แสดงภาพถ่าย SEM ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณและอุณหภูมิเผาผนึกที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือและอุณหภูมิการเผาผนึกที่สูงขึ้นตามลำดับ ผลของการเจือ PMMA ในเซรามิกส์ AZO ที่มีต่อขนาดของเกรนแสดงดังภาพประกอบ 39 ตัวอย่างมีขนาดของเกรนอยู่ระหว่าง $0.5 - 1.6 \mu m$ จากกราฟพบว่าปริมาณสารเจือที่มากขึ้นทำให้ขนาดเกรนของตัวอย่างใหญ่ขึ้น แต่เมื่อปริมาณสารเจือมากกว่าหรือเท่ากับ 10 wt% พบว่าปริมาณสารเจือที่มากขึ้นไม่ส่งผลชัดเจนต่อการเพิ่มขนาดของเกรนและอุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้นส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ

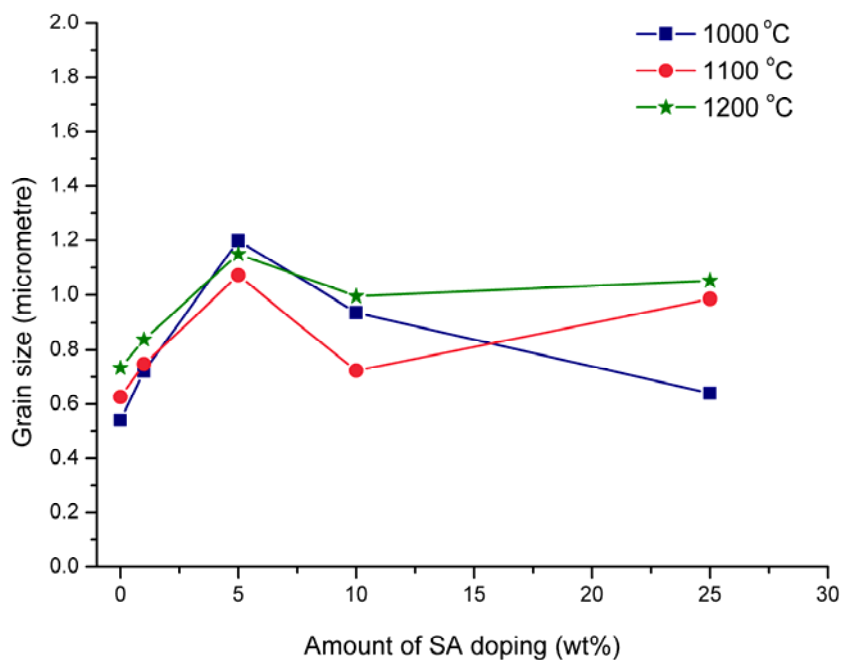
จากการเปรียบเทียบผลการเจือ SA และ PMMA ที่มีต่อขนาดเกรนของเซรามิกส์ AZO พบว่า ขนาดเกรนของตัวอย่างที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณน้อย (1-5 wt%) มีขนาดใกล้เคียงกัน ขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือมากขึ้นเป็น 10 - 25 wt% เกรนของตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA มีขนาดใหญ่กว่าเกรนของตัวอย่างที่เจือด้วย SA ส่วนผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อขนาดของเกรน พบว่าเกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาผนึกที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิเผาผนึกที่สูงทำให้ขอบเกรนเกิดการหลอมและเชื่อมต่อกัน ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับจำนวนรูพรุนที่ลดลงในตัวอย่าง



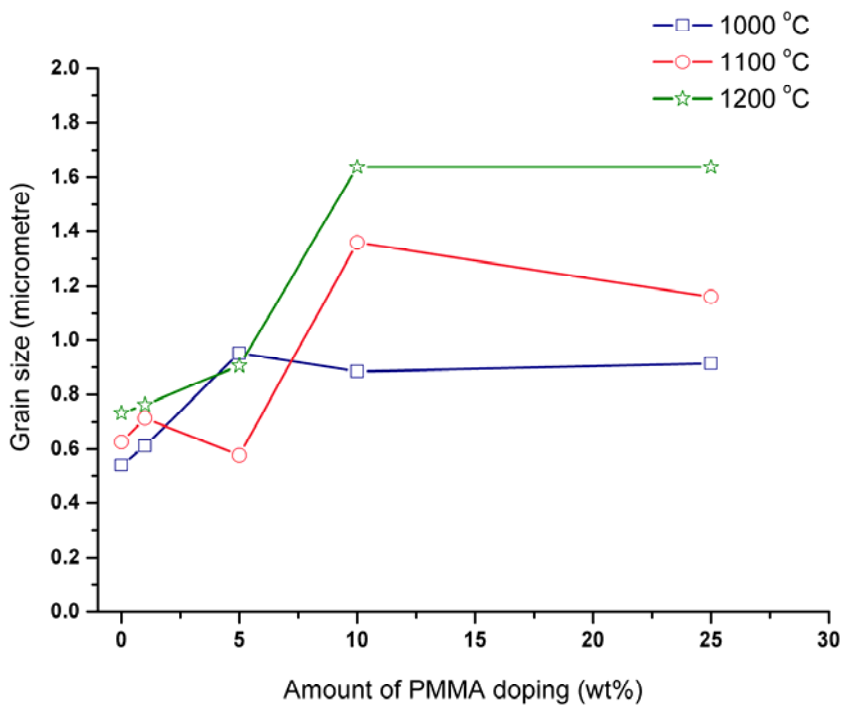
ภาพประกอบ 36 แสดงภาพถ่าย SEM (กำลังขยาย 10,000 เท่า) ของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ใน ปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C



ภาพประกอบ 37 แสดงภาพถ่าย SEM (กำลังขยาย 10,000 เท่า) ของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C



ภาพประกอบ 38 แสดงขนาดของเกรนของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0, 1, 5, 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ



ภาพประกอบ 39 แสดงขนาดของเกรนของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0, 1, 5, 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ

4.3 โครงสร้างผลึก

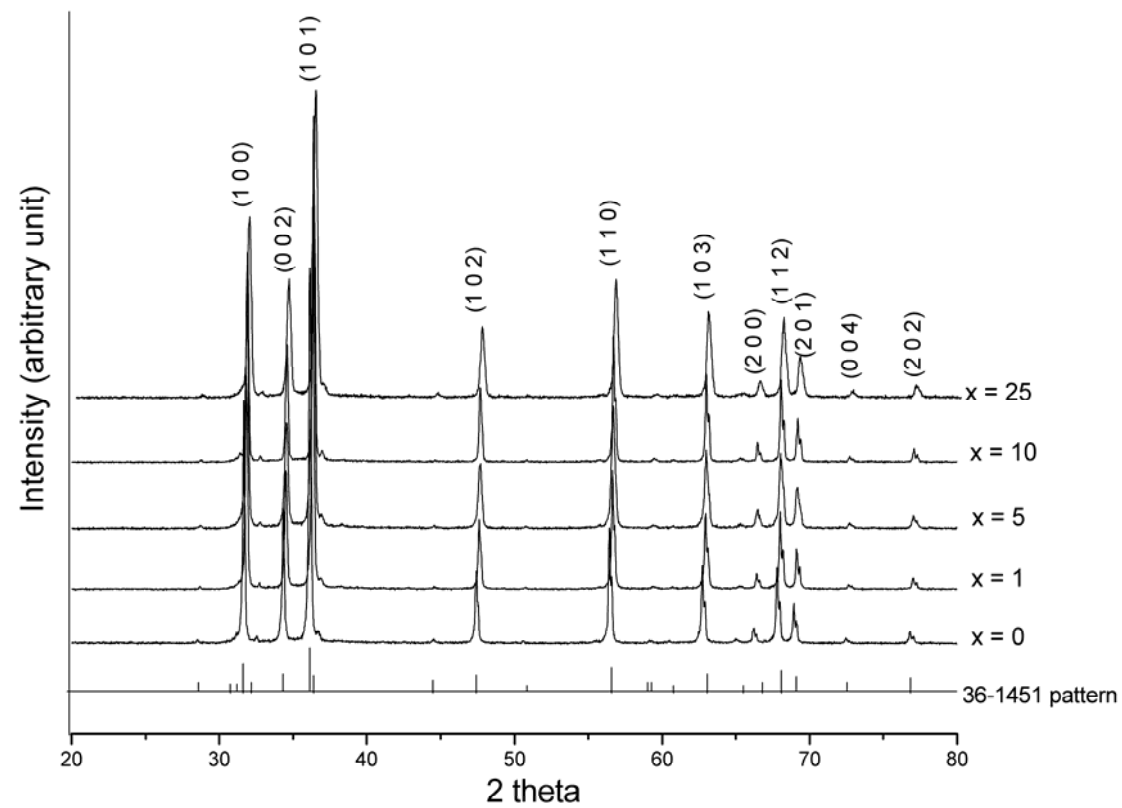
ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์ (XRD) ของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,100 °C แสดงดังภาพประกอบ 4.13 พบว่าทุกตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวทช์ไซต์ (JCPDS file no.36-1451)

ภาพประกอบ 41 แสดงภาพโครงสร้างผลึกของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,100 °C พบว่าทุกตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวทช์ไซต์

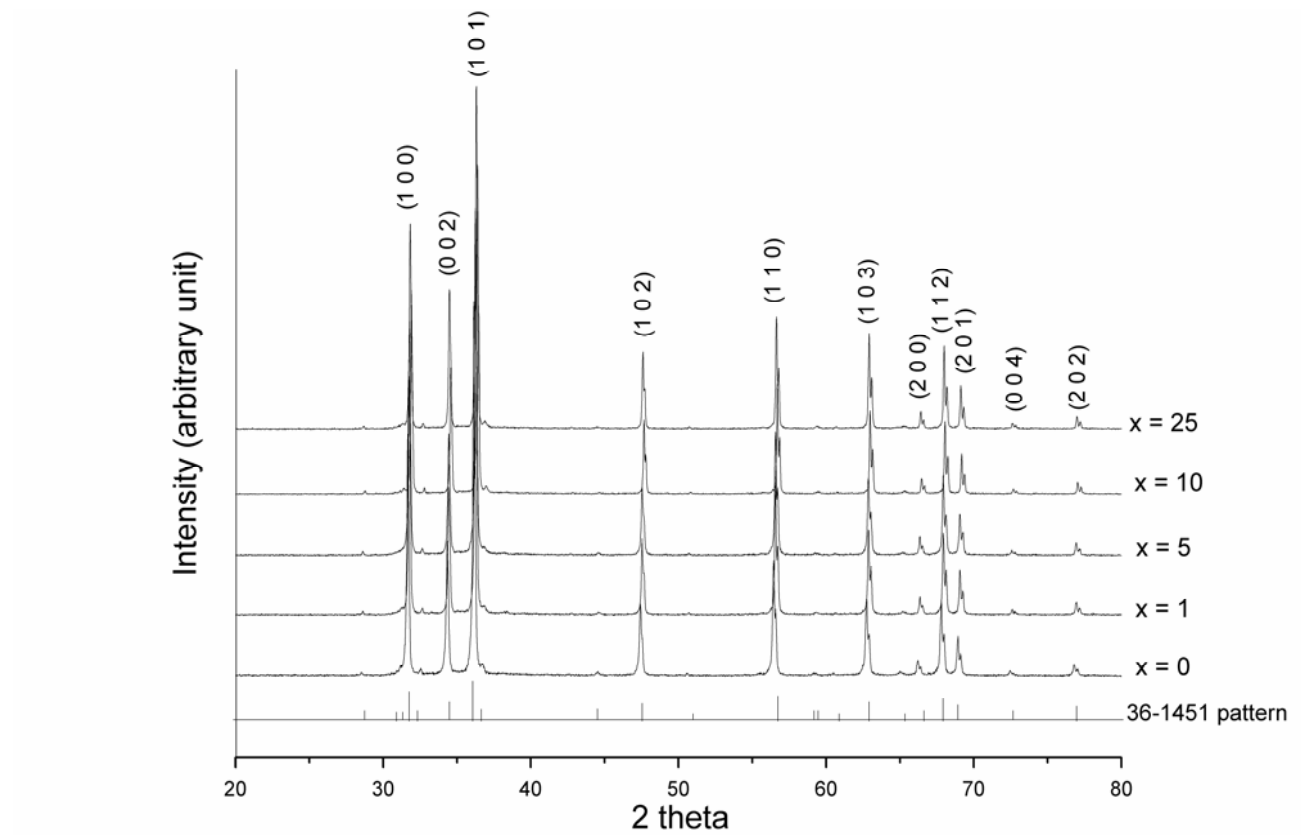
ภาพประกอบ 42 และ 43 แสดงภาพโครงสร้างผลึกของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 25 wt% ตามลำดับ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1100 °C และ 1200 °C พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวทช์ไซต์ ถึงแม้จะมีปริมาณสารเจือมากถึง 25 wt% และเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงถึง 1200 °C

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์ของตัวอย่าง สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ของผลึกได้ตามสมการ 2.25 ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงค่าคงที่ผลึกของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณต่างกัน เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,100 °C และตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ผลึกของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 10 wt% และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C จากผลการคำนวณพบว่าค่าคงที่ผลึกของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าคงที่ผลึก a ของทุกตัวอย่างมีค่าโดยเฉลี่ย $3.2 \text{ (}\overset{0}{\text{\AA}}\text{)}$ และค่าคงที่ผลึก b มีค่าโดยเฉลี่ย $5.2 \text{ (}\overset{0}{\text{\AA}}\text{)}$

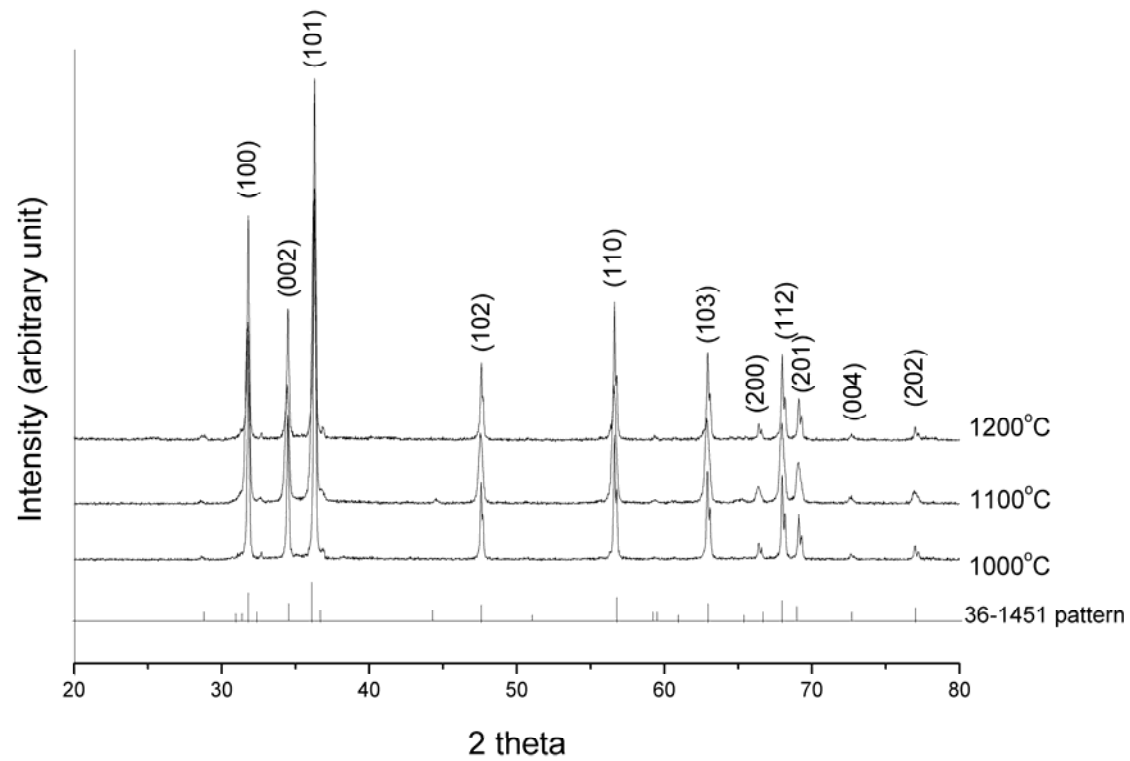
จากการเปรียบเทียบผลของการเจือเซรามิกส์ AZO ด้วย SA และ PMMA ในปริมาณและอุณหภูมิเผาผนึกต่างกันที่มีต่อโครงสร้างผลึกของตัวอย่างพบว่า ชนิดของสารเจือ ปริมาณของสารเจือและอุณหภูมิเผาผนึกไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกและค่าคงที่ผลึก โดยตัวอย่างทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวทช์ไซต์



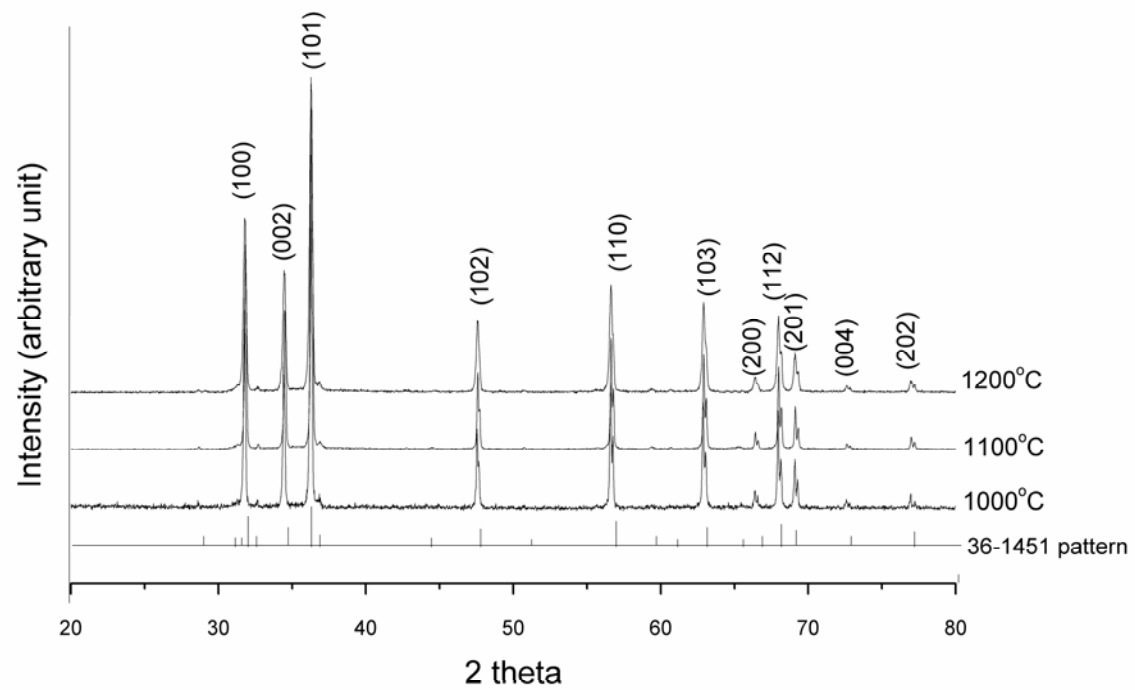
ภาพประกอบ 40 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt%
 เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,100 °C



ภาพประกอบ 41 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt%
 แผนผิวกึ่งอุณหภูมิ 1,100°C



ภาพประกอบ 42 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 25 wt%
เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C



ภาพประกอบ 43 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 25 wt%
 เเผผนี้ที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ตาราง 2 ค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เเผ่นนี้ที่อุณหภูมิ 1,100 °C

ตัวอย่าง	ปริมาณการเจือ (wt%)	a (Å)	c (Å)
AZO	x=0	3.258	5.209
SA	x=1	3.245	5.197
	x=5	3.243	5.192
	x=10	3.241	5.190
	x=25	3.251	5.202
	x=1	3.250	5.203
PMMA	x=5	3.250	5.204
	x=10	3.242	5.191
	x=25	3.246	5.200

ตาราง 3 ค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 10 และ 25 wt% เเผ่นนี้ที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ตัวอย่าง	ปริมาณการเจือ (wt%)	1000 °C		1100 °C		1200 °C	
		a (Å)	c (Å)	a (Å)	c (Å)	a (Å)	c (Å)
SA	10	3.248	5.209	3.241	5.190	3.247	5.200
	25	3.247	5.212	3.251	5.202	3.250	5.206
PMMA	10	3.245	5.203	3.242	5.191	3.249	5.208
	25	3.250	5.206	3.246	5.200	3.248	5.209

4.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

4.4.1 ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V characteristics)

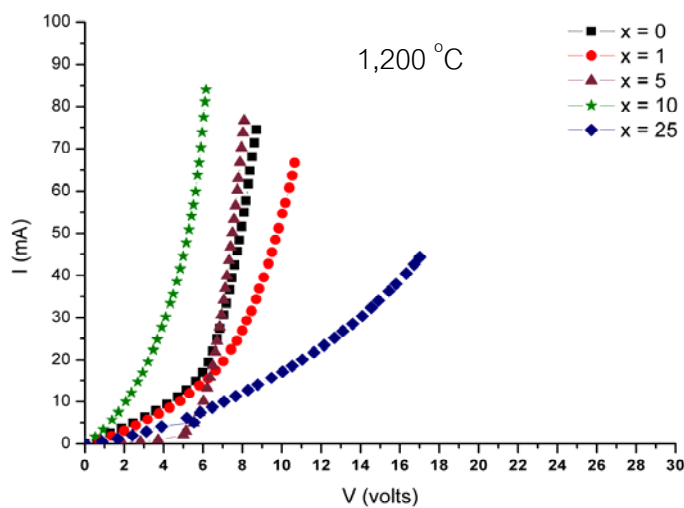
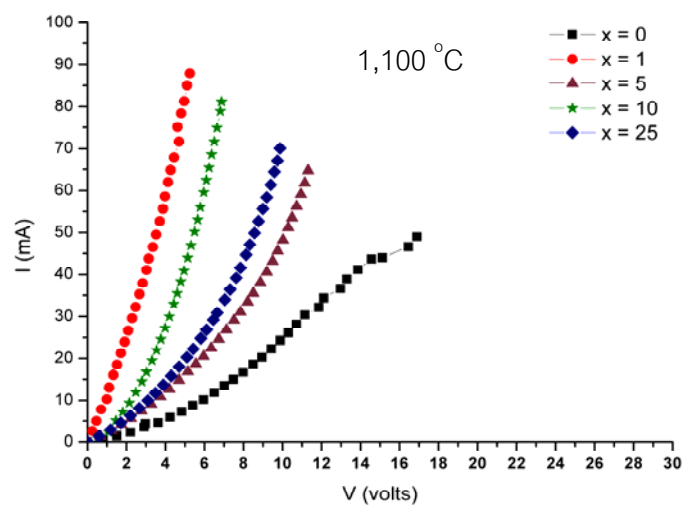
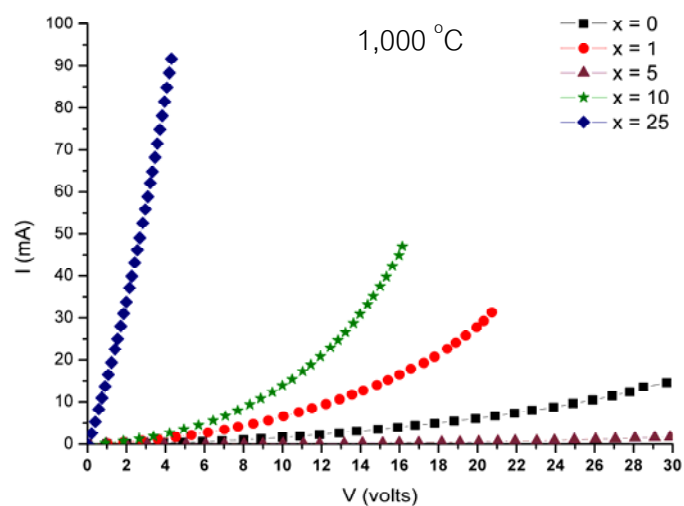
ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA แสดงดังภาพประกอบ 44 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาผนึก $1,000^{\circ}\text{C}$ ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 และ 10 wt% ไม่เป็นแบบเชิงเส้นซึ่งไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม จึงถือว่าเป็นตัวนำนอนโอห์มิก (nonohmic conductor) ตัวอย่างที่เจือด้วย SA เกือบทั้งหมด ยกเว้นตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 5 wt% ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ โดยเฉพาะตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 25 wt% ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงถึง 90 mA เมื่อให้ความต่างศักย์ 4 V ขณะที่ตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 5 wt% กลับแสดงคุณสมบัติเป็นฉนวน เมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าดีขึ้น โดยที่อุณหภูมิเผาผนึก $1,100^{\circ}\text{C}$ ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่เจือด้วย SA ทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกเป็น $1,200^{\circ}\text{C}$ ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 5 -10 wt% ให้ค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ ในขณะที่ตัวอย่างที่เจือ SA ในปริมาณน้อย (1wt%) และในปริมาณมาก (25wt%) ให้ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ

ภาพประกอบ 45 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA พบว่าที่อุณหภูมิการเผาผนึก $1,000^{\circ}\text{C}$ ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 และ 25 wt% ไม่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็น ตัวนำนอนโอห์มิก ผลของการเจือด้วย PMMA พบว่าตัวอย่างจะแสดงความเป็นฉนวน ยกเว้นตัวอย่าง ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 10 wt% ที่แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส - ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ดี นอกจากนั้นพบว่าที่อุณหภูมิเผาผนึก $1,100^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA 1 wt% เป็นตัวนำนอนโอห์มิกเช่นกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกเป็น $1,100^{\circ}\text{C}$ และ $1,200^{\circ}\text{C}$ พบว่าลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของทุกตัวอย่างดีขึ้นตามลำดับ ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 5 - 10 wt% ให้ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ดี แต่การเจือในปริมาณที่น้อย (1wt%) หรือมากเกินไป (25wt%) ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ

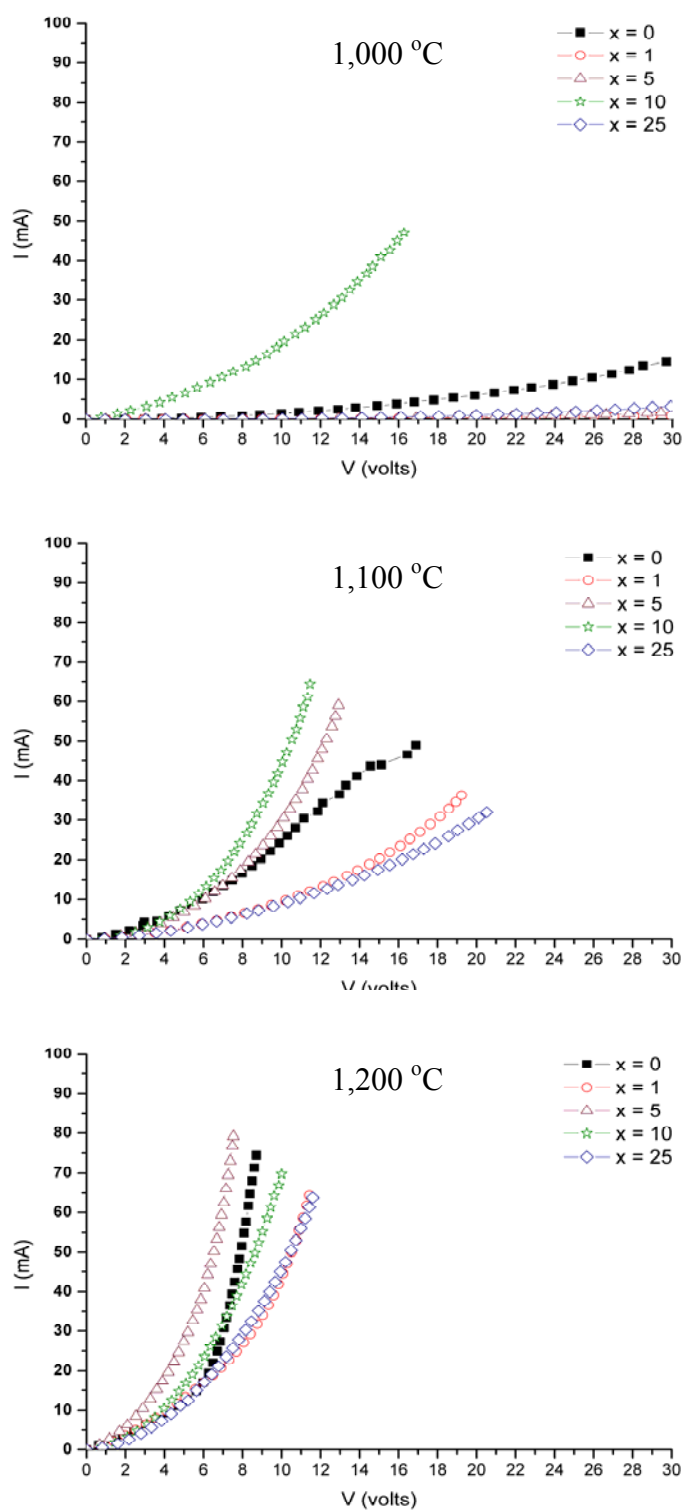
จากการเปรียบเทียบผลของการเจือ SA และ PMMA ต่อลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO พบว่าลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างที่เจือด้วย SA มีค่าดีกว่าตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ส่วนผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA พบว่าที่อุณหภูมิการเผาผนึก $1,000^{\circ}\text{C}$ ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างมีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกเป็น $1,100^{\circ}\text{C}$ และ $1,200^{\circ}\text{C}$ ลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของทุก

ตัวอย่างดีขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิการเผาผนึกที่สูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นและจำนวนรูพรุนลดลงซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO

เนื่องจากบางตัวอย่างเป็นตัวนำแบบนอนโอห์มมิก จึงสามารถหาความต้านทานไฟฟ้าได้สองค่าคือ ความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum resistance) และความต้านทานไฟฟ้าสูงสุด (Maximum resistance) เมื่อนำค่าความต้านทานไฟฟ้าไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จึงทำให้ได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสองค่าด้วยเช่นกัน คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum resistivity) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงสุด (Maximum resistivity) ดังตาราง 4.3 และตาราง 5



ภาพประกอบ 44 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA เหนืออุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C



ภาพประกอบ 45 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA เผาผืนที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ตาราง 4 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย

SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉนึ่งที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

อุณหภูมิ เผาฉนึ่ง (°C)	ปริมาณ สารเจือ SA (wt%)	Diameter		Resistance :		Resistivity :	
		(cm)	Area	R(Ω)		ρ (Ω.cm)	
			(cm ²)	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1,000	0	1.40	1.54	1.33	3.32	0.05	0.12
	1	1.39	1.51	0.67	1.40	4.05	8.46
	5	1.43	1.61	8.20	10.00	52.65	64.21
	10	1.41	1.57	0.47	0.77	2.95	4.84
	25	1.29	1.30	0.33		1.70	
1,100	0	1.37	1.47	0.59		3.47	
	1	1.38	1.50	0.34		2.05	
	5	1.38	1.53	0.46		2.74	
	10	1.40	1.53	0.36		2.21	
	25	1.27	1.26	0.42		2.14	
1,200	0	1.32	1.37	0.39		2.14	
	1	1.35	1.43	0.44		2.52	
	5	1.38	1.49	0.36		2.15	
	10	1.37	1.48	0.35		2.09	
	25	1.25	1.22	0.67		3.24	

หมายเหตุ ความหนาของทุกตัวอย่าง = 0.25 cm

ตาราง 5 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เเผฉนีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

อุณหภูมิ เผฉฉนีก (°C)	ปริมาณ สารเจือ PMMA (wt%)	Diameter (cm)	Area (cm ²)	Resistance :		Resistivity :	
				R(Ω)		ρ (Ω .cm)	
				Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
	0	1.40	1.54	1.33	3.32	0.05	0.12
	1	1.43	1.61	10.91	20	70.18	128.66
	5	1.43	1.61	10	10.60	64.49	68.36
	10	14.37	1.62		0.62		4.05
	25	14.65	1.69	4.94	10	33.30	67.40
	0	1.37	1.47		0.59		3.47
	1	1.39	1.53	0.60	0.84	3.66	5.13
1,100	5	1.40	1.53		0.49		3.01
	10	14.20	1.58		0.45		2.83
	25	13.60	1.45		0.89		5.17
	0	1.32	1.37		0.39		2.14
	1	1.36	1.44		0.46		2.82
1,200	5	1.38	1.49		0.37		2.21
	10	14.00	1.54		0.42		2.56
	25	13.02	1.33		0.45		2.42

หมายเหตุ ความหนาของทุกตัวอย่าง = 0.25 cm

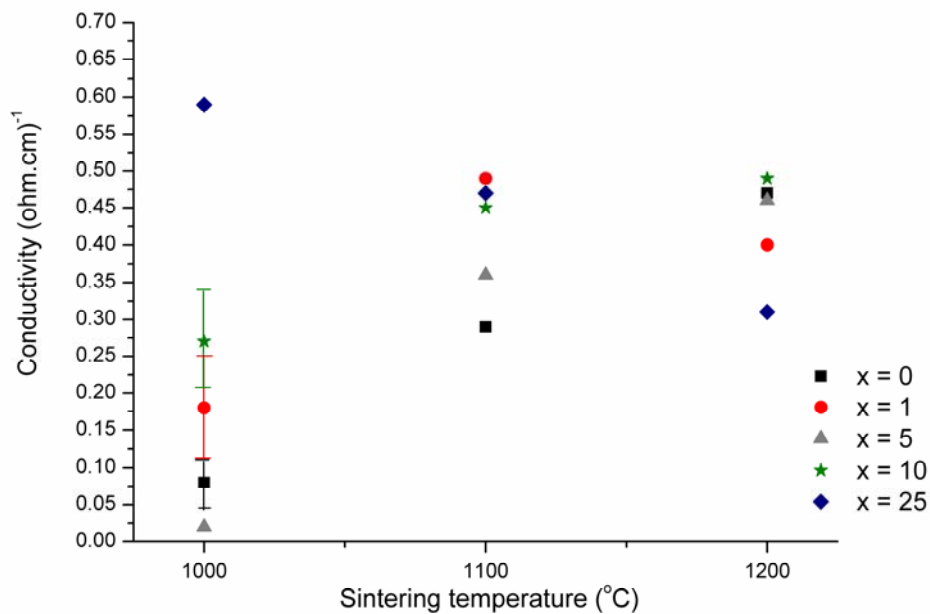
4.4.2 สภาพนำไฟฟ้า

สภาพนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณและอุณหภูมิการเผาผนึกที่ต่างกัน แสดงดังภาพประกอบที่ 46 พบว่าที่อุณหภูมิเผาผนึก $1,000^{\circ}\text{C}$ สภาพนำไฟฟ้าของตัวอย่างแตกต่างกันขึ้นกับปริมาณสารเจือซึ่งมีค่าระหว่าง $0.01 - 0.59 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ตัวอย่างที่เจือด้วย SA เกือบทุกตัวอย่างให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่ได้เจือ SA ยกเว้นตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 5 wt% ซึ่งแสดงความเป็นฉนวน เนื่องจากตัวอย่างบางตัว (ในหัวข้อ 4.4.1 ลักษณะเฉพาะของ กระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า) เป็นตัวนำอนโอห์มมิกจึงมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสองค่าดังตาราง 4.3 เมื่อนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าไปคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าจึงทำให้ได้ค่าสภาพนำไฟฟ้าสองค่าคือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum conductivity) และค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุด (Maximum conductivity) ตามลำดับ

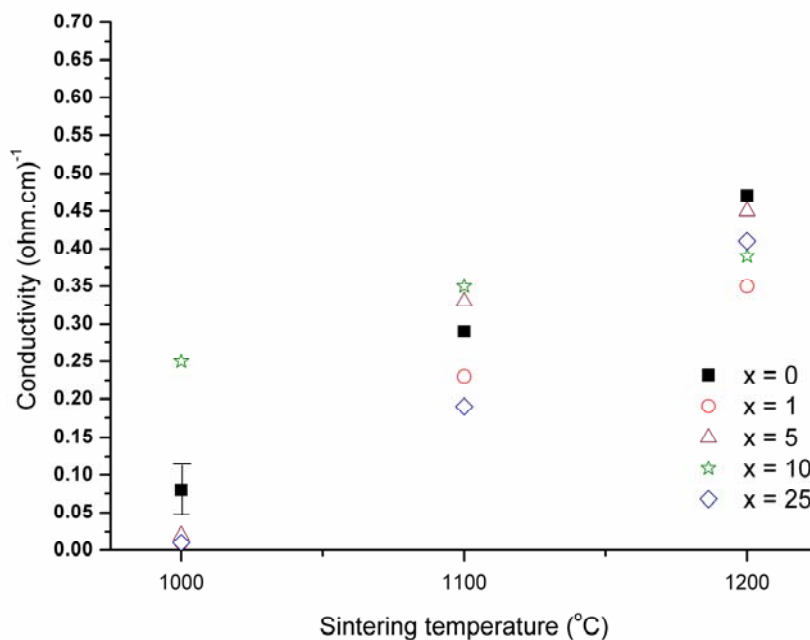
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกเป็น $1,100^{\circ}\text{C}$ สภาพนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่เจือด้วย SA ทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เจือ SA ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือ SA ในตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 1 wt% มีสภาพนำไฟฟ้าดีที่สุด ($0.5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกเป็น $1,200^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณน้อยกว่า 25 wt% มีสภาพนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ได้เจือ SA โดยอยู่ในช่วง $0.4 - 0.5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ เนื่องจากอุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีแรงขับเคลื่อนเพื่อให้ตัวอย่างหลอมตัวมากยิ่งขึ้น จำนวนรูพรุนลดลงและเกรนมีขนาดใหญ่ การนำไฟฟ้าจึงดีขึ้น

สภาพนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณและอุณหภูมิการเผาผนึกต่างกัน แสดงดังภาพประกอบที่ 47 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาผนึก 1000°C ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA เกือบทุกตัวอย่างมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือซึ่งมีค่าระหว่าง $0.05 - 0.12 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ยกเว้นตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 10 wt% ที่มีการนำไฟฟ้าดีกว่าตัวอย่างที่ไม่เจือ เนื่องจากตัวอย่างบางตัวเป็นตัวนำอนโอห์มมิกจึงสามารถหาค่าสภาพนำไฟฟ้าได้สองค่าคือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำสุดและค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุด (ดังแสดงในภาคผนวก ตาราง 5) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกเป็น $1,100^{\circ}\text{C}$ และ $1,200^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างทั้งหมดแสดงสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นตามลำดับ ที่อุณหภูมิการเผาผนึก $1,200^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA มีสภาพนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่เจือ ซึ่งมีค่าระหว่าง $0.35 - 0.47 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ สภาพนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นนี้สอดคล้องกับขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาผนึกสูงขึ้น ตัวอย่างที่เจือ PMMA ในปริมาณน้อย (1 wt%) ให้สภาพนำไฟฟ้าต่ำกว่าตัวอย่างที่เจือในปริมาณตั้งแต่ 5 wt% ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่าง

จากการเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA พบว่าที่อุณหภูมิเผาผนึกต่ำกว่า $1,200^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างที่เจือด้วย SA ให้สภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ทั้งนี้เพราะตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA มีจำนวนรูพรุนมากและมีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวอย่างที่เจือด้วย SA จำนวนรูพรุนและความหนาแน่นนี้ส่งผลต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้า เนื่องจากจำนวนรูพรุนที่สูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นน้อยลงซึ่งมีผลทำให้การนำไฟฟ้าลดลงด้วย ขณะที่อุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มเป็น $1,200^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างที่เจือด้วย SA และ PMMA มีสภาพนำไฟฟ้าใกล้เคียงกัน ส่วนอุณหภูมิเผาผนึกที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA พบว่าอุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้นทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้นตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้มีแรงขับเคลื่อนให้เกรนเชื่อมต่อกันส่งผลให้จำนวนรูพรุนลดลง เซรามิกส์หดตัวมากขึ้น ความหนาแน่นสูงขึ้น การนำไฟฟ้าจึงดีขึ้น



ภาพประกอบ 46 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ



ภาพประกอบ 47 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C ตามลำดับ
หมายเหตุ เส้นตรงที่ลากผ่านสัญลักษณ์แสดงตัวอย่างที่เป็นนอนไอห์มิก

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าเซรามิกส์ AZO เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณและผาฉนิกที่อุณหภูมิต่างกัน จะให้ค่าการนำไฟฟ้าและรพพุนเปิดแตกต่างกัน โดยตัวอย่างทั้งหมดแสดงโครงสร้างเฮกซะโกนอลแบบเวทช์ไซต์ ซึ่งการเจือ SA และ PMMA ในตัวอย่างไม่มีผลต่อโครงสร้างและค่าคงที่ผลึกของเซรามิกส์ AZO เนื่องจา SA และ PMMA มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อนำตัวอย่างไปเผาผนิกที่อุณหภูมิสูง SA และ PMMA จะระเห็ดไปและทิ้งรพพุนไว้ โดยสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเซรามิกส์และจำนวนรพพุนที่เกิดขึ้น ซึ่งผลของการเจือและอุณหภูมิเผาผนิกที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าและความเป็นรพพุนของเซรามิกส์ AZO สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA มีค่าการนำไฟฟ้าดีกว่าเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ทั้งนี้เพราะตัวอย่างที่เจือด้วย SA มีจำนวนรพพุนลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาผนิกเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเชื่อมกันของเกรนซึ่งทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA มีรพพุนสูงกว่าจึงทำให้การนำไฟฟ้าต่ำกว่า เพราะจำนวนรพพุนที่มากเกินไปจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าลดลง

2. ผลของอุณหภูมิเผาผนิกต่อค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA พบว่าที่อุณหภูมิเผาผนิก 1,000 °C ตัวอย่างให้ค่าการนำไฟฟ้าไม่ดีแต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนิกเป็น 1,100 °C ขึ้นไปจะให้ค่าการนำไฟฟ้าดีขึ้นตามลำดับ ส่วนผลของอุณหภูมิเผาผนิกต่อความเป็นรพพุนพบว่าอุณหภูมิเผาผนิกที่สูงขึ้นส่งผลให้จำนวนรพพุนเปิดมีแนวโน้มลดลง เซรามิกส์ AZO ที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีและมีรพพุนเหมาะสมคือตัวอย่างที่เผาผนิกที่อุณหภูมิ 1,100 °C เพราะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 1,200 °C แต่มีจำนวนรพพุนเปิดมากกว่า

3. ผลของปริมาณการเจือต่อค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA พบว่าเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ในปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 wt% จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีและความหนาแน่นสูงเมื่ออุณหภูมิเผาผนิกเพิ่มขึ้น ขณะที่การเจือ SA ในปริมาณมากถึง 25 wt% ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างกลับลดลง ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารเจือแต่กลับลดลงเมื่อปริมาณสารเจือมากเกินไป ทั้งนี้เพราะปริมาณสารเจือที่มากเกินไปนั้นส่งผลต่อแรงขับเคลื่อนระหว่างการเผาผนิกให้ลดลงซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า ส่วนเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA พบว่าปริมาณสารเจือ 1 wt% จะให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุดในทุกอุณหภูมิการเผาผนิก ขณะที่ปริมาณสารเจือมากกว่าหรือเท่ากับ 5 wt% ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนิกเพิ่มขึ้นและพบว่าที่อุณหภูมิเผาผนิก 1,100 °C ขึ้นไปค่าการนำไฟฟ้าของทุกตัวอย่างมีค่าดีขึ้นตามลำดับ

ตัวอย่างที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,200 °C ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือและอุณหภูมิเผาผนึกที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ให้ความเป็นรูปพรุนสูงและยังคงสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีคือตัวอย่างที่เจือด้วย SA ในปริมาณ 1 และ 10 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,100 °C และตัวอย่างที่เจือด้วย PMMA ในปริมาณ 25 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,200 °C

เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ขึ้นกับจำนวนรูพรุน จึงพบว่าผลงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการสร้างเซรามิกส์นำไฟฟ้าที่ดีและมีรูพรุนสูงเพื่อประยุกต์ใช้งานต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมสารตัวอย่างต้องอาศัยความระมัดระวังในเรื่องการปนเปื้อน การบดสารตัวอย่าง การอัดสารตัวอย่างและความเรียบของผิวหน้าของสารตัวอย่าง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีผลต่อรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ปรากฏออกมา
2. อัตราการขึ้นอุณหภูมิเผาผนึกที่มากกว่าหรือน้อยกว่า 5 °C/min อาจมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของเซรามิกส์ AZO
3. การเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกสูงกว่า 1,200 °C อาจส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของเซรามิกส์ AZO เนื่องจากในระหว่างกระบวนการเผาผนึก อุณหภูมิในการเผาผนึกจะมีผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในของเซรามิกส์ อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การหลอมเชื่อมกันระหว่างเกรนเพิ่มมากขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กุลจิรา สุจิโรจน์; ฌกามาศ แซ่ห้วง; และ ดวงเดือน อาจองค์. (2545). *การผลิตเซรามิกส์โดยการอัดแบบ*. กรุงเทพฯ:ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ณัฐยา ต๊ะวิไชย. (2548). *โครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์สังกะสีออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียมออกไซด์*. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (วัสดุศาสตร์). เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ถ่ายเอกสาร.
- ปัญญา ธนบุญสมบัติ. (2544). *การศึกษาวัสดุโดยใช้เทคนิคดีฟแฟรกชัน*. กรุงเทพฯ: สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยีไทย- ญี่ปุ่น (ส.ส.ท.)
- แม่น อมรสิทธิ์; และสมชัย อัครทิวา. (2549). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: ทอปป.
- มงคล เดชนครินทร์; และชาติศรี ศรีไพพรรณ. (2528). *อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วรรณ ชูรักษ์. (2546). *การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์บางประเภทในประเทศไทยโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์*. วิทยานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC). (2547). *พจนานุกรมศัพท์ วัสดุศาสตร์ และเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค).
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC). (2550, 8 มีนาคม). *ไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง : พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับวันพรุ่งนี้*. 5(51): หน้า 78-80. สืบค้นเมื่อ 19 ธันวาคม 2551, จาก <http://www.technologymedia.co.th/column/columnview.asp?id=202>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548, 20 ตุลาคม). *กรดสเดียริก*. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2551, จาก <http://escivocab.ipst.ac.th/readdoc.asp?no=1079>
- สุพล อนันตา. (ม.ป.ป.) *กระบวนการประดิษฐ์สำหรับเซรามิกส์ขั้นสูง*. (เอกสารประกอบคำสอน). เชียงใหม่: ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. จัดสำเนา.
- สุศักดิ์ ไททองวงศ์กุล. (2551). *อลูมินา วัสดุสารพัดประโยชน์*. สืบค้นเมื่อ 17 ตุลาคม 2551, จาก <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/february/radio2-5.htm>.
- สมพงษ์ ใจดี. (2547). *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 3. พิมพ์ครั้งที่ 4*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. (2543). *วัสดุศาสตร์มูลฐาน*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- APC International, Ltd. (2005,10 มิถุนายน). *Piezoelectric constant*. สืบค้นเมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2551, จาก http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/piezoelectric_constants.html.
- Ashby, Michael F.; & Jones, David R.H. (1998). *Engineering Materials* 2. 2nd ed. London: Biddles Ltd, Guildford and King's Lynn
- Bruker Advance X-ray. (1997). Solutions. Bruker axs. Germany. p.10.
- Callister, William D., Jr. (2005). *วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน*. แปลโดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์; เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ; และ มาวิน สุประดิษฐ์ ณ ออยุธยา. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- Castro, M.S.; & Aldao, C.M. (1998, August). *Effects of the Sintering Temperature on the Oxygen Adsorption in ZnO Ceramics*. Journal of the European Ceramic Society. pp.511-515. Retrieved may 1, 1998, from <http://www.sciencedirect.com/science>.
- Cotton, F. Albert; Wilkinson, Geoffrey; & Gaus, Paul L. (1997). *Basic inorganic chemistry*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Guojia, Fang; Dejie, Li; & Bao-Lun, Yao (2003). *Fabrication and vacuum annealing of transparent conductive AZO thin films prepared by DC magnetron sputtering*. Vacuum surface engineering, surface instrumentation & vacuum technology. pp. 363-372. Retrieved december 5, 2009, from <http://www.sciencedirect.com>
- Gersten, Joel I.; & Smith, Frederick W. (2001). *The Physics and chemistry of materials*. New York: John Wiley & Sons.
- Hayt, H. William, Jr. (1989). *Engineering electromagnetics*. 5th ed. Singapore : McGraw-Hill.
- H.L. Zhang; Jing-Feng Li; & Bo-Ping Zhang. (2006). *Microstructure and electrical properties of porous PZT ceramics derived from different pore-forming agents*. ACTA Materialia. pp.171-181. Retrieved may 15, 2006, from <http://www.sciencedirect.com/science>.

- Hoey, David.; & Taylor, David. (2007, August). *Fatigue in porous PMMA: The effect of stress concentrations*. International Journal of Fatigue. pp. 989-995. Retrieved may 5, 2007, from <http://www.sciencedirect.com/science>
- IPCS inchem home. (2000, October). *Aluminium oxide*. Retrieved October 18, 2009, from <http://www.inchem.org/documents/icsc/icsc/eics0351.htm>.
- Lifshin, Eric. (1993). *Concise Encyclopedia of Materials Characterization*. Oxford: Pergamon press.
- Moulsom, A.J. ; and Herbert, J.M. (2003). *Electroceramics*. 2nd edition. West Sussex. John Wiley & Sons.
- O'Neil, Maryadele J ; et al. (2006). *The merck index an encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals*. 14th ed. NJ: Merck & Co.
- Schmid, George H. (1996). *Organic chemistry*. St. Louis: Mosby-year book.
- Streetman, Ben G. (1995). *Solid State Electronic Devices*. New jersey: Prentice-Hall international.
- Tanoglu, Metin ; & Ergun Yelda. (2006, April). *Porous nanocomposites prepared from layered clay and PMMA [poly(methyl methacrylate)]*. Journal of composites part A: applied science and manufacturing. pp 318. Retrieved may 12, 2006, from <http://www.sciencedirect.com/science>.
- Torres, Monica; Sandoval, Michael; & Gregory, Lush. (2008, 25 November). *Drift current*. Carrie Actions. retrieved November 25, 2008, from <http://www.ece.utep.edu/courses/ee3329/ee3329/Studyguide/index.html>
- Tseng, Wenjea J; Liu, Dean-Mo; & Hsu, Chung-King . (1998). *Influence of stearic acid on suspension structure and green microstructure of injection-molded zirconia ceramics*. Ceramics International. pp.191-195. Retrieved may 10, 1998, from <http://www.sciencedirect.com/science>.
- T. Tohsophon; N. Sirikulrat; & T. Tunkasiri. (2004). *Quenching Effects and Conduction Characteristics of Al doped ZnO ceramics*. Transactions the Materials Research Society of Japan. 29(7): pp.3227-3229.
- Washington. (2006, October). *Polymethylmethacrylate*. Retrieved October 20, 2009, from http://www.cheme.washington.edu/images/cent/pmma_orig.gif.

Wikipedia. (2008, August). *Polymethylmethacrylate*. Retrieved August 18,2008, from <http://en.wikipedia.org/wiki/PMMA>.

Wikipedia. (2008,November). *Solid oxide fuel cell*. Retrieved November 5,2008, From http://en.wikipedia.org/wiki/Solid-oxide_fuel_cell

Wikipedia. (2008, August). *Straric acid*. Retrieved August 15,2008, from http://en.wikipedia.org/wiki/Stearic_acid.

Young & Freedman. (2005). *ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2*. แปลโดยปิยพงษ์ สิริตติง. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.

Yongheng ,Zhang; & Juan, Han (2006). *Microstructure and temperature coefficient of resistivity for ZnO ceramics doped with Al₂O₃*. Journal of materials letters. pp 2522-2525. Retrieved may15, 2006, from <http://www.sciencedirect.com/science>.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ชนิดสารเจือ	ปริมาณสารเจือ (wt%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)		
		1,000 °C	1,100 °C	1,200 °C
SA	0	3.82	4.08	4.47
	1	3.99	4.13	4.43
	5	3.99	4.25	4.37
	10	3.80	3.83	3.99
	25	3.17	3.58	4.18
PMMA	1	3.50	3.04	4.07
	5	3.60	3.34	3.61
	10	3.04	3.88	3.21
	25	1.95	2.50	2.83

ตารางที่ 2 แสดงการหดตัวของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ชนิดสารเจือ	ปริมาณสารเจือ (wt%)	เปอร์เซ็นต์การหดตัว (%)		
		1,000 °C	1,100 °C	1,200 °C
SA	0	7.35	9.38	12.56
	1	8.18	8.60	10.65
	5	5.33	9.02	8.77
	10	6.38	7.52	9.07
	25	13.93	14.20	17.11
PMMA	1	5.25	7.68	10.21
	5	5.14	7.55	8.80
	10	4.88	5.98	7.39
	25	2.35	9.67	13.93

ตารางที่ 3 แสดงรูพรุนเปิดของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

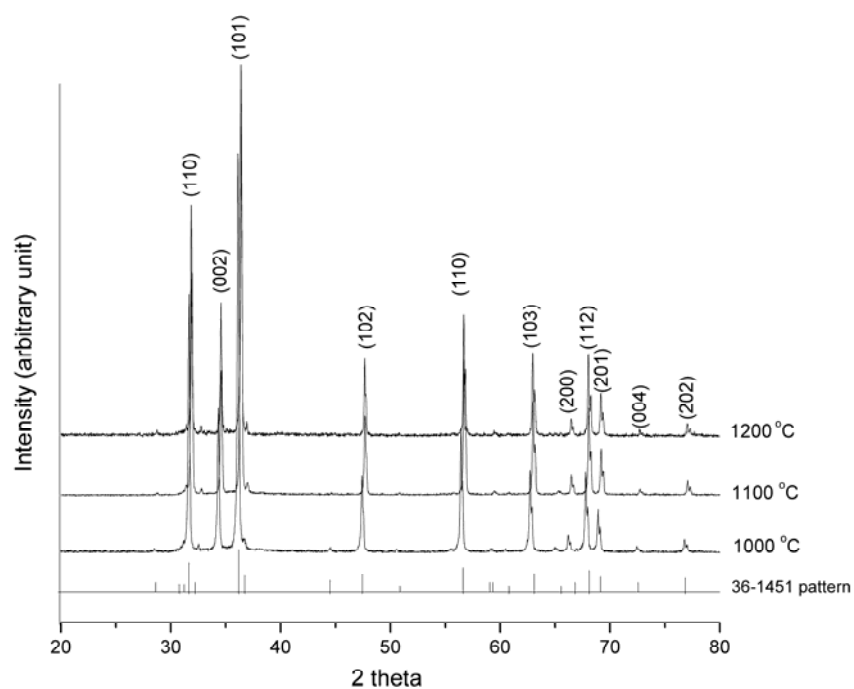
ชนิดสารเจือ	ปริมาณสารเจือ (wt%)	รูพรุนเปิด (%)		
		1,000 °C	1,100 °C	1,200 °C
SA	0	31.4-	27.27	21.21
	1	27.27	26.47	22.22
	5	28.57	23	22.55
	10	32.43	29.55	26.40
	25	32.94	25.93	15.38
PMMA	1	37.84	47.22	26.47
	5	35.51	41.67	35.29
	10	46.96	30.69	43.75
	25	66.67	53.85	51.61

ตารางที่ 4 แสดงขนาดเกรนของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาฉีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

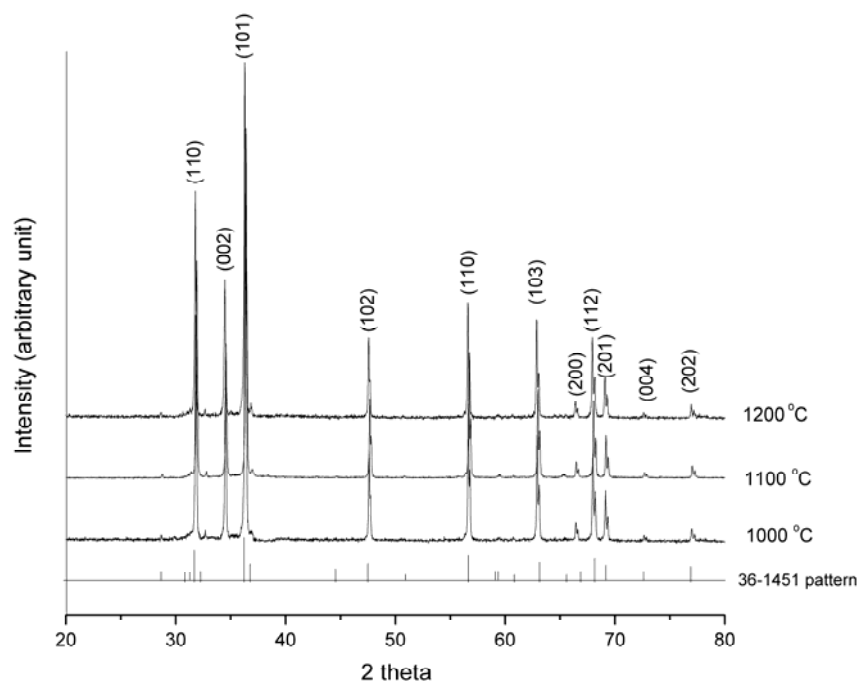
ชนิดสารเจือ	ปริมาณสารเจือ (wt%)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm) ที่อุณหภูมิเผาฉีก		
		1,000 °C	1,100 °C	1,200 °C
SA	0	0.54	0.63	0.73
	1	0.72	0.75	0.84
	5	1.20	1.07	1.15
	10	0.94	0.72	0.10
	25	0.64	0.99	1.05
PMMA	1	0.61	0.71	0.76
	5	0.95	0.58	0.91
	10	0.88	1.36	1.64
	25	0.91	1.16	1.64

ตารางที่ 5 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA และ PMMA ในปริมาณ 0 1 5 10 และ 25 wt% เผาผนังที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ชนิดสารเจือ	ปริมาณสารเจือ (wt%)	สภาพนำไฟฟ้า ($\Omega \cdot \text{cm}$) ⁻¹					
		1,000 °C		1,100 °C		1,200 °C	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
SA	0	0.05	0.12	0.29		0.47	
	1	0.12	0.25	0.49		0.40	
	5	0.01	0.02	0.36		0.46	
	10	0.21	0.34	0.45		0.49	
	25	0.59		0.47		0.31	
PMMA	1	0.01	0.02	0.19	0.27	0.35	
	5	0.01	0.02	0.33		0.45	
	10	0.25		0.35		0.39	
	25	0.01	0.03	0.19		0.41	



ภาพประกอบที่ 1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย SA ใน ปริมาณ 10 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C



ภาพประกอบที่ 2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ AZO ที่เจือด้วย PMMA ใน ปริมาณ 10 wt% เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C 1,100 °C และ 1,200 °C

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อชื่อสกุล	นางสาวอ้อมตะวัน แสงจักรวาท
วันเดือนปีเกิด	9 พฤษภาคม พุทธศักราช 2525
สถานที่เกิด	อำเภอสามชัย จังหวัดกาฬสินธุ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	85 หมู่ 9 ตำบลสำราญ อำเภอสำราญ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46180
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2544	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอุดรพัฒนาการ จังหวัดอุดรธานี
พ.ศ. 2548	ค.บ. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
พ.ศ. 2552	กศ.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ