

การเตรียมอิเล็กโทรไลต์ของแข็งเบต้า-อะลูมินา เมื่อเจือด้วย Bi_2O_3

คณิตา ศรีสุรัตน์* अनुสรณ์ นียมพันธ์ และ รุ่งนภา ทิพากรฐิติกุล

Preparation of the β -alumina Solid Electrolyte Using Bi_2O_3 as Dopant

Kanita Srisurat*, Anuson Niyompan and Rungnapa Tipakonthitikul

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand.

*Corresponding author. Email address: nita_srisurat@hotmail.com (K. Srisurat)

Received 15 June 2009; accepted 15 December 2009

บทคัดย่อ

สารอิเล็กโทรไลต์ของแข็งกลุ่มเบต้า-อะลูมินา ที่มี MgO เป็นตัวทำให้โครงสร้างผลึกเสถียร ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในระบบแบตเตอรี่รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ผง $\text{Na}\beta$ -alumina เตรียมได้ จากสูตรทั่วไป คือ $\text{Na}_{1-x}\text{Mg}_{2x}\text{Al}_{15-x}\text{O}_8$ เมื่อ $x = 0.175$ ผสมสารตั้งต้น Na_2O MgO และ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ โดยเทคนิค ball-milling จากนั้น นำไปเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ผงที่แคลไซน์ได้ เจือด้วย Bi_2O_3 และอัดขึ้นรูป นำเม็ดสารตัวอย่างเผาขึ้นเตอร ที่อุณหภูมิ 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียสตามลำดับ ตรวจสอบลักษณะการเกิดเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า เฟสที่ได้เป็นเฟสของ β -alumina และเมื่อผ่านการเผาขึ้นเตอร ที่อุณหภูมิสูง ก็ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส ผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิกด้วย SEM พบว่า มีการจัดเรียงตัวของเกรนอย่างหนาแน่น

คำสำคัญ: เบต้า-อะลูมินา; การเผาผนึก; อิเล็กโทรไลต์ของแข็ง

Abstract

MgO -Stabilized β -alumina solid electrolyte proposed for development in the electric vehicle battery system. $\text{Na}\beta$ -alumina powder was prepared from the composition $\text{Na}_{1-x}\text{Mg}_{2x}\text{Al}_{15-x}\text{O}_8$ when $x = 0.175$ The mixture of Na_2O MgO and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ by ball-milling method and calcinations powder at 1200°C for 10 hours. Calcined powder was milled and mixed with Bi_2O_3 in the approximate concentration prior to forming by a dry pressing technique. The pellet were then sintering temperature at 1450, 1500 and 1550°C respectively. Phase identification by X-ray diffraction (XRD) technique on calcined powders and sintered β -alumina found that β -alumina phase and show no phase change after sintering. SEM demonstrate the plate-like structure strong packing.

Keywords: β -alumina; Sintering; Solid electrolyte

บทนำ

สารอิเล็กโทรไลต์ของแข็ง β -alumina ถูกพัฒนา เพื่อใช้สำหรับเป็นยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า เป็นที่รู้จักกันดี ในชื่อ Zebra battery (Van Zyl, 1996; Dustman, 2004) การนำ β -alumina มาสร้างเป็นแบตเตอรี่ครั้งแรกที่แอฟริกาใต้ และจดสิทธิบัตรเมื่อปี ค.ศ. 1978 (Dustman, 2004) เนื่องจาก แบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า มีข้อกำหนดหรือคุณลักษณะพิเศษหลายประการ เช่น แบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานสูง (high power density) มีอัตราการอัดประจุ และคายประจุเร็ว (high charge/discharge rate) เป็นต้น ดังนั้น การพัฒนาระบบแบตเตอรี่ Zebra ที่ประกอบด้วย β -alumina จึงมุ่งประเด็นไปที่ การสังเคราะห์เบต้า-อะลูมินาให้มีความบริสุทธิ์และสภาพการนำไฟฟ้าสูงขึ้น โดยสังเคราะห์ β -alumina จากสารตั้งต้น Na_2O กับ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ แต่เนื่องจาก β -alumina ที่ได้ เป็นเฟสที่ไม่เสถียร จึงมีการเติม Li_2O หรือ MgO (Youngblood et al., 1977) เข้าไปในสูตรองค์ประกอบ เพื่อเป็นตัวทำให้เสถียร (stabilizer) ดังนั้น จะต้องประกอบทางเคมีเป็น $(\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x)\text{Al}_{15-x}\text{O}_8$ เมื่อ $0.18 < x < 0.28$ และ $\text{Na}_{1-x}\text{Mg}_{2x}\text{Al}_{15-x}\text{O}_8$ เนื่องจาก การสังเคราะห์เบต้า-อะลูมินาให้มีความบริสุทธิ์สูง จะต้องผ่านกระบวนการเผาผนึก

ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนเฟส อันเนื่องมาจากอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการสูญเสีย Na_2O ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมี ดังนั้น จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามหาเทคนิคสำหรับการเตรียม เช่น pos-sinter anneal (Jatkar et al., 1978), a two-peak firing schedule (Duncan & Bugden, 1981) และ the so-called zeta process (Virkar et al., 1978) เป็นต้น และต่อมาได้มีการเปลี่ยนสารตั้งต้น ที่มีลักษณะบรรจุแบบชนิดของออกซิเจนเหมือนกับ β -alumina ได้แก่ boehmite gibbsite และ bayerite (Van Zyl et al., 1993) จากการศึกษา พบว่า การใช้ boehmite ในการเตรียม β -alumina ด้วยกระบวนการเตรียมปฏิกิริยาของแข็ง แบบดั้งเดิม ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 องศาเซลเซียส ใช้ช่วงเวลายาวนาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจาก β -alumina ไปเป็น β -alumina ได้ง่าย จะเห็นว่า การลดอุณหภูมิในการเผาผนึก ยังเป็นประเด็นวิจัยที่สำคัญ

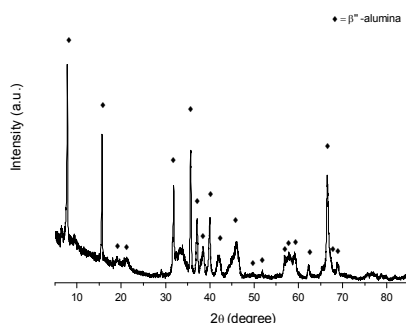
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อเตรียม β -alumina ceramic ด้วยกระบวนการ solid state reaction สำหรับพัฒนาเป็นแบตเตอรี่รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยการเติมสารเจือ Bi_2O_3 ซึ่งทำหน้าที่เป็น liquid phase sintering จากนั้น ตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของ β -alumina ที่เตรียมได้

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

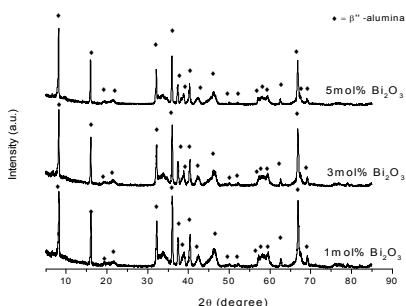
Na. β'' -alumina เตรียมจากสารตั้งต้น Na_2CO_3 - γ - Al_2O_3 และ MgO โดยเตรียมได้จาก สูตร $\text{Na}_{1-x}\text{Mg}_{2x}\text{Al}_{15-x}\text{O}_8$ เมื่อ $x = 0.175$ เริ่มจากผสมสารตั้งต้นทั้งสามกับสารละลาย ethanol และปั่นผสมด้วยเครื่อง ball-mill เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้น นำมาปั่นระเหย ethanol ด้วยเครื่อง hotplate and stirrer และนำไปอบให้แห้ง จากนั้นเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ เป็น 5 องศาเซลเซียสต่อมิล นำผงเบต้า-อะลูมินาที่เตรียมได้ เจือด้วย Bi_2O_3 ในสัดส่วน 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล อัดขึ้นรูป ด้วยเครื่องอัด Hydraulic และนำเม็ดสารไปเผาซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเผา 4 ชั่วโมง จากนั้นตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) วัดค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยใช้หลักของ อาร์คิมิดีส (Archimedes's Principle) และศึกษาสภาพการนำไฟฟ้า ของชิ้นงานที่เตรียมได้ ด้วยเครื่อง RCL meter

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

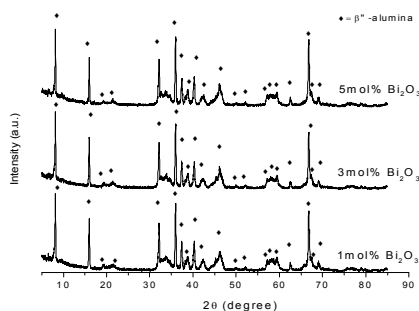
จากรูปที่ 1 พบว่าลักษณะเฟสของสารที่ได้นั้น เป็นเฟสของ β'' -alumina ตรงกับแฟ้มข้อมูลมาตรฐาน (Joint Committee for Powder Diffraction Standards: JCPDS) ที่สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ในแฟ้มหมายเลข 35-0438 มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) และขนาดของหน่วยเซลล์ $a = 5.624$ $b = 5.624$ และ $c = 33.56$ เมื่อเจือสาร Bi_2O_3 ในสัดส่วน 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยโมลนำไปเผาซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1450-1550 องศาเซลเซียส ที่เวลาการเผาเท่ากัน และนำเม็ดสารตัวอย่างที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์อีกครั้ง พบว่า ลักษณะของเฟสที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (แสดงดังรูปที่ 2-4) ซึ่งลักษณะเฟสของสารที่ได้เป็นเฟสที่เสถียร คือเมื่อผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส เป็นผลมาจากการสัดส่วนของ MgO ที่อยู่ในสูตรองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Youngblood (Youngblood et al., 1977) และงานวิจัยของ Subasri (Subasri et al., 2003) ที่มีการเติม MgO เข้าไปในสูตรองค์ประกอบ เพื่อเป็นตัวทำให้โครงสร้างผลึกเสถียร



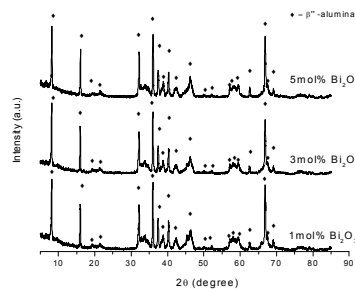
รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเบต้า-อะลูมินา เคาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ เบต้า-อะลูมินา เซรามิก ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส



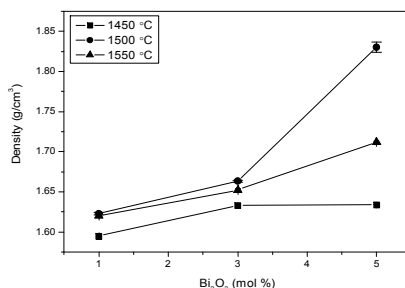
รูปที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ เบต้า-อะลูมินา เซรามิก ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ เบต้า-อะลูมินาเซรามิก ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5 เมื่อผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าความหนาแน่นที่ได้ นั้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณสารเจือปนที่ได้ นอกจาก ช่วยลดอุณหภูมิในการเผาไหม้แล้ว ยังช่วยในเรื่องการแน่นตัวของเซรามิกด้วย ซึ่งการแน่นตัวของผลึกนี้ เกิดจากการถูกกระตุ้นให้เกิดการลดขอบเกรนในระหว่างการเผาไหม้ (Moulson & Herbert, 2003) โดยที่สารเจือปนเกิดการหลอม และดึงเอาแต่ละเกรนของผลึกจับกันแน่นขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือปน และพบว่า ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าสูง เมื่อเผาซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้าทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (ดังแสดงตารางที่ 1) เมื่อเจือ Bi_2O_3 ในสัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เผาซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าจะสูงกว่าสารเจือสัดส่วนอื่น ส่วนที่

อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1500 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูง เมื่อสัดส่วนของสารเจือ เป็น 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1550 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูง เมื่อสัดส่วนสารเจือ เป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เมื่อสังเกต ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้กับอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ พบว่า ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือ ส่วนที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้ไม่มีแนวโน้มแน่ชัด และที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ การนำไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษา มีค่าสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการเตรียมด้วยเทคนิคอื่น (Sartori et al, 2004) ซึ่งเกิดเฟสเบต้า-อะลูมินา



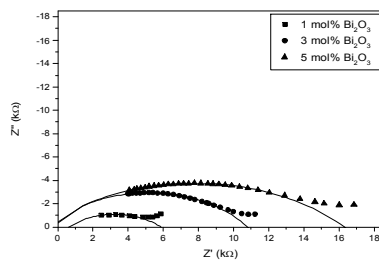
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับปริมาณสารเจือ

ตารางที่ 1 ค่าการนำไฟฟ้าของ เบต้า-อะลูมินา เซรามิก ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

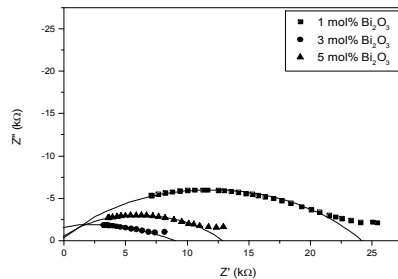
Bi_2O_3 (mol %)	$\sigma_{\text{DC}} (\times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1})$		
	1450 °C	1500 °C	1550 °C
1	12.27	3.02	4.16
3	6.60	8.03	5.69
5	4.26	5.45	5.84

จากรูปที่ 6-8 แสดง impedance plot ระหว่าง ส่วนจริง (Z') และส่วนจินตภาพ (Z'') ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ $Z^* = Z'_{\text{(real)}} - jZ''_{\text{(imaginary)}}$ ลักษณะของกราฟที่ได้นั้น เป็นครึ่งวงกลม บอกถึงสภาพการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง อันเนื่องมาจาก การเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้นของไอออน และเป็นการเคลื่อนที่ภายในก้อนผลึกของสารตัวอย่าง โดยโซเดียมไอออนและออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่เข้าไปแทรกอยู่ใน ระหว่างชั้นโครงสร้างของเบต้า-อะลูมินา มีการจัดเรียงตัว แบบสปินเนล (spinel) ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของออกซิเจนไอออน เป็นโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ (cubic) โดยที่ อะลูมิเนียมไอออนเข้ายึดในตำแหน่ง

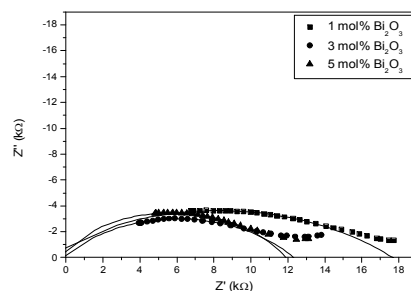
ออกตะฮีดรอล (octahedral) และเตตระฮีดรอล (tetrahedral) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบสปินเนล จะเรียงตัวกันแบบหลวม ๆ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุ ให้โซเดียมไอออนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของโครงสร้างได้ และการเคลื่อนที่ของโซเดียมไอออนนี้ ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้นั้น หาได้จากความสัมพันธ์ของค่าความต้านทาน (R) ที่ได้จากกราฟ และขนาดของเม็ดสารตัวอย่าง (ความหนา; L และพื้นที่ผิวเล็กโทรด; A) เขียนเป็นสมการดังนี้ $\sigma = L/(R \times A)$ (Li et al, in press)



รูปที่ 6 Impedance plot ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สำหรับเบต้า-อะลูมินา เซรามิก ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส



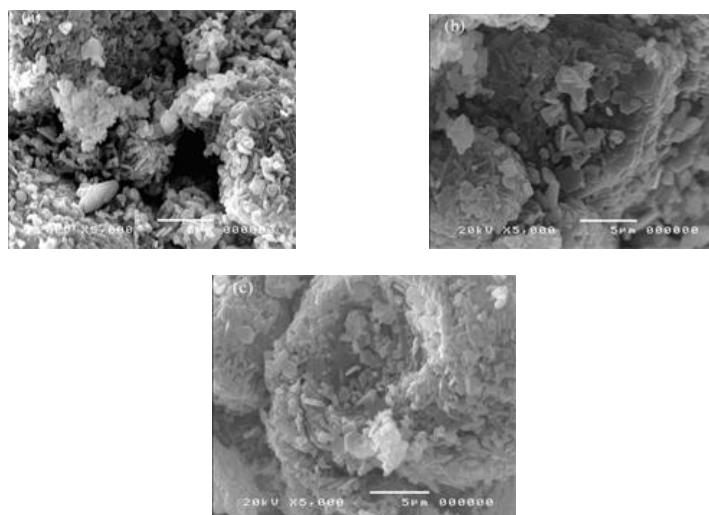
รูปที่ 7 Impedance plot ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สำหรับเบต้า-อะลูมินาเซรามิก ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 Impedance plot ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สำหรับเบต้า-อะลูมินาเซรามิก ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 9 พบว่า ผลึก มีลักษณะการจัดเรียงตัวกันเป็นแผ่น ๆ อย่างหนาแน่น แต่มีการจัดเรียงแบบไม่เป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวของผลึกเป็นแผ่น ๆ นั้น ก็เป็นลักษณะเฉพาะของ β'' -alumina และจากรายงานวิชาการที่ผ่านมา เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยานี้ ก็พบว่า มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเหมือนกัน (Kuo &

Nicholson, 1996) เมื่อสังเกต จากรูป (a) พบว่า เม็ดเซรามิกยังมีรูพรุนอยู่มาก ทำให้การจัดเรียงตัวยังไม่หนาแน่นพอ เมื่อเทียบกับ รูป (b) และ (c) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของผลึกได้ดีกว่า และนอกจากนี้ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้นั้น ยังส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของเซรามิกอีกด้วย



รูปที่ 9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาครอยแตกด้านข้างของ เบต้า-อะลูมินา เซรามิก เมื่อผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เมื่อเจือด้วย Bi_2O_3 (a) 1 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล (b) 3 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล และ (c) 5 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล

สรุปผลการศึกษา

จากการเตรียม Na. β'' -alumina เพื่อพัฒนาระบบแบตเตอรี่ของยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า เเผินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1450–1550 องศาเซลเซียส เจือด้วย Bi_2O_3 พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสของสาร เมื่ออุณหภูมิและปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น และค่าการนำไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ของเบต้า-อะลูมินา เซรามิก เมื่อผ่านการเผินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เจือด้วย Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง $12.26 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$ สภาพการนำไฟฟ้าของเซรามิกนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง ของผลึก ลักษณะโครงสร้างจุลภาค และค่าความหนาแน่นของเม็ดสาร ตัวอย่าง ซึ่งจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของตัวนำไอออน

เอกสารอ้างอิง

Duncann, J. H., & Bugden, W. G. (1981). *Special Ceramics*, 7, 221.

Dustmann, C-H. (2004). Advances in ZEBRA batteries. *Journal of Power Sources*, 127, 85–92.

Jatkar, A. D., Cutler, I. B., & Gordon, R. S. (1977). Conversion catalysis and microstructure control in the sintering of lithia-stabilized β'' -alumina. In R. M. Fulrath, & J. A. Pask (Eds.), *Ceramic Microstructures*. (pp. 414). Boulder, Colorado: Westview Press.

Kuo, C. K., & Nicholson, P. S. (1996). The chemical transformation of single-crystal α - Al_2O_3 platelates to β'' - Al_2O_3 . *Solid State Ionics*, 83, 225–228.

Li, N., Wen, Z., Wu, X., Zhang, J., & Liu, Y. (in press). Synthesis of nano-Na- β''/β - Al_2O_3 powders by a citrate complex process. *Journal of Alloys and Compounds*.

Moulson, A. J., & Herbert, J. M. (2003). *Electroceramics* (2nd ed). Southren Gate: Wiley & Sons.

Sartori, S., Martucci, A., Muffato, A., & Guglielmi, M. (2004). Sol-gel synthesis of Na^+ beta- Al_2O_3 powders. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 911–914.

Subasri, R., Mathews, T., Sreedharan, O. M., & Raghunathan, V. S. (2003). Microwave processing of sodium beta alumina. *Solid State Ionics*, 158, 199–204.

Van Zyl, A. (1996). Review of the zebra battery system development. *Solid State Ionics*, 86–88, 883–889.

Van Zyl, A., Thackeray, M. M., Duncan, G. K., Kingon, A. L., & Hackrodt, R. O. (1993). The Synthesis of beta alumina from aluminum hydroxide and oxyhydroxide precursors. *Materials Research Bulletin*, 28, 145–157.

Virkar, A. V., Miller, M. L., Cutler, J. B., & Gordon, R. S. (1978). Us Patent 3 113 928.

Youngblood, G. E., Virkar, A. V., Cannon, W. R., & Gordon, R. S. (1977). Sintering processes and heat treatment schedules for conductive lithia-stabilized β'' - Al_2O_3 . *America Ceramic Society Bulletin*, 56, 206–210.