

บทความวิจัย

การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของ
ตัวนำยิ่งยวด Y-Ba-CuO

จิตติพงษ์ เกรือหงส์ พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ* สมศักดิ์ มณีรัตนกุล
ธัญนพ นิลกำจร เสริมสุข รัตเรง กุสุมา เนียมหุ่่น
มนภัทร ศิริวัฒน์พงศ์ และ อุษณีย์ อัยรา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเคราะห์ตัวนำยิ่งยวด Y-Ba-CuO ด้วยวิธี Solid state reaction และศึกษาสมบัติของสภาพนำยิ่งยวดของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ คณะผู้วิจัยได้สร้างเครื่องมือด้วยอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย เพื่อทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤต ส่วนสมบัติอื่นๆ วัดด้วย XRD, SEM, EDS, TEM ผลการทดลองพบว่าตัวนำยิ่งยวดที่เตรียมได้มีสูตรเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{6.96}$ มีอุณหภูมิวิกฤต 92 เคลวิน สนามแม่เหล็กวิกฤต 0.03 mT โครงสร้างแบบ Orthorombic เป็นผลึกเดี่ยวขนาด 0.5 ไมโครเมตร และมีขนาดของเกรน ประมาณ 10 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: ตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิสูง อุณหภูมิวิกฤต สนามแม่เหล็กวิกฤต

Preparation and Characterization on Y-Ba-CuO Superconductors

Thitipong Kruachong, Pongkaew Udomsamuthirun*,
Somsak Maneerattanakul, Tunyanop Nilkumjohn, Sermsuk Ratreng,
Kusuma Neamhun, Monnaphat Siriwatthapong and Udsanee Aiyara

ABSTRACT

The purpose of this research is to synthesis Y-Ba-CuO superconductors by solid state reaction and investigated superconductivity's properties. We characterized our sample by using home-made instrument. The critical magnetic field and the critical temperature's instrument, and others by XRD, SEM, EDS and TEM. We find that our sample has $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.96}$ formula, critical temperature 92 K, critical magnetic field 0.03 mT, orthorombic structure, single crystal size 0.5 μm and grain size 10 μm .

Keywords: high temperature superconductors, critical temperature, critical magnetic field

บทนำ

ตัวนำยวดยิ่งเป็นตัวนำที่ไม่มีความต้านทานในสภาพหนึ่งถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ ชื่อ คาร์เมอร์ลิงจ์ ออนเนส ในปี ค.ศ. 1911 [1] ซึ่งได้ศึกษาการวัดความต้านทานของปรอท โดยใส่ปรอทลงในภาชนะรูปร่างแหวนแล้วแช่ลงในฮีเลียมเหลวเพื่อเป็นการลดอุณหภูมิผลปรากฏว่าปรอทที่ถูกหล่อเย็นด้วยฮีเลียมเหลวมีอุณหภูมิลดลงอย่างสม่ำเสมอจนถึงอุณหภูมิที่ 4.2 เคลวิน ความต้านทานของปรอทลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดสภาวะเช่นนี้เรียกว่า สภาพนำยวดยิ่ง (superconductivity) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานของปรอทเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดนี้ว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature, T_c)

หลังจากการค้นพบสภาพไร้ความต้านทาน ในปี ค.ศ. 1911 เป็นต้นมา การค้นคว้าวิจัยเพื่อให้ได้ตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่ๆ ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงได้พัฒนาได้อย่างต่อเนื่องช้ากว่าคือในปี ค.ศ. 1974 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบโลหะผสมของไนโอเบียม (Nb, Niobium) และเจอร์มาเนียม (Nb_3Ge) [2] ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต 23.2 เคลวิน จากนั้นเป็นเวลาหลายสิบปีนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามค้นคว้าวิจัยเพื่อให้ได้ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 23.2 เคลวิน แต่ไม่ประสบความสำเร็จจึงทำให้เชื่อว่า ตัวนำยวดยิ่งน่าจะไม่มีอุณหภูมิวิกฤตที่จำกัดอยู่ประมาณ 35 เคลวิน และเรียกตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ว่า “ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ” (low temperature superconductors) หรือตัวนำยวดยิ่งแบบ conventional (conventional superconductors) และในทางปฏิบัติตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีความยุ่งยากในการใช้งานหรือทดลองมาก เนื่องจากต้องใช้ฮีเลียมเหลวเป็นสารในการลดอุณหภูมิ เพราะฮีเลียมเหลวมีจุดเดือด 2.18 เคลวิน และในการใช้งานนั้นต้องใช้การกักเก็บความร้อนเป็นอย่างดีเพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิระดับต่างๆ นี้ไว้ให้ได้ อีกประการหนึ่งฮีเลียมเหลวเป็นวัสดุที่ผลิตยากและราคาแพง

จนกระทั่งในปี ค.ศ.1986 ได้มีการค้นพบครั้งสำคัญของตัวนำยวดยิ่งอีกครั้งหนึ่งโดยเบททอสและมูลเลอร์ [3] ตัวนำยวดยิ่งที่ค้นพบเป็นตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่ที่มีองค์ประกอบของสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์คือ La_2BaCuO_4 และเป็นสารประเภทเซรามิกส์ที่อุณหภูมิห้องมีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่เมื่อลดอุณหภูมิลงประมาณ 30 เคลวิน จะมีสภาพนำยวดยิ่ง

จากนั้นในปี ค.ศ. 1987 ชูและคณะ [4] ได้ค้นพบสารกลุ่มคิวเพอร์ทอีกกลุ่มหนึ่งที่มีองค์ประกอบของ ยิทเทรียม - แบเรียม - คิวเพอร์ท (Y-Ba-CuO) ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 92 เคลวิน ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวที่ 77 เคลวินและเป็นตัวนำยวดยิ่งชนิดที่สอง (type 2) ในการใช้งานตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้จึงสามารถใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารที่ใช้ในการลดอุณหภูมิได้ เนื่องจากไนโตรเจนเหลวหาง่ายราคาถูก การค้นพบครั้งนี้ทำให้การทดลองและการประยุกต์ใช้งานตัวนำยวดยิ่งสามารถทำได้ง่ายขึ้น จะเรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 35 เคลวินนี้ว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (high temperature superconductors)

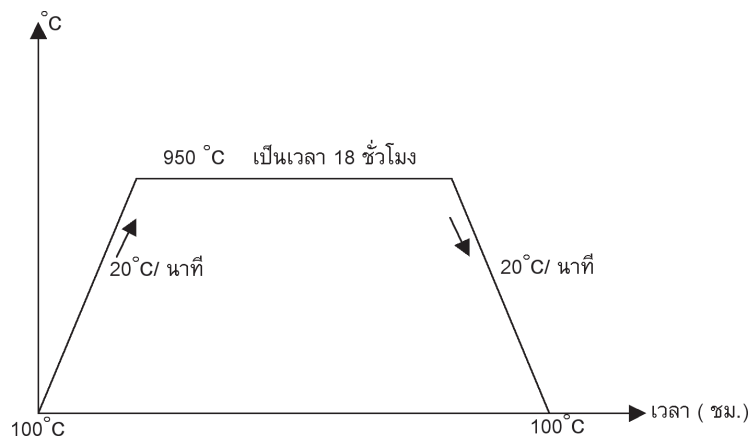
หลังจากนั้นก็ได้มีการนำเสนอวิธีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงจากกลุ่มวิจัยต่างๆ อย่างแพร่หลายและต่อเนื่องไปทั่วโลกจนถึงปัจจุบัน คณะผู้วิจัยได้ศึกษาวิธีการเตรียมและการวัดสมบัติของตัวนำยวดยิ่งที่ได้มีการนำเสนอ [5-9] แล้วพบว่าในปัจจุบันสามารถเตรียมและสร้างชุดทดลองเพื่อทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤตได้โดยใช้อุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพงมากนัก

ซึ่งสามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการพื้นฐาน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้คณะผู้วิจัยจะได้สังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO ขึ้นมา และทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤตด้วยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นเอง รวมทั้งวัดโครงสร้างด้วย X-Ray Diffraction (XRD), Transmission Electron Microscope (TEM) และสมบัติอื่นๆ ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

วิธีการทดลอง

คณะผู้วิจัยได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO โดยวิธี solid state reaction โดยเริ่มต้นจากการนำสารยิบเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) จำนวน 11.29 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) จำนวน 39.46 กรัม คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) จำนวน 23.86 กรัม มาคลุกให้เข้ากันในครกอลูมินา จนได้สารผสมที่มีสีเทาและเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำไปใส่ในถ้วยอลูมินา แล้วนำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงซึ่งมีกระบวนการเผาต่างๆ กันดังนี้

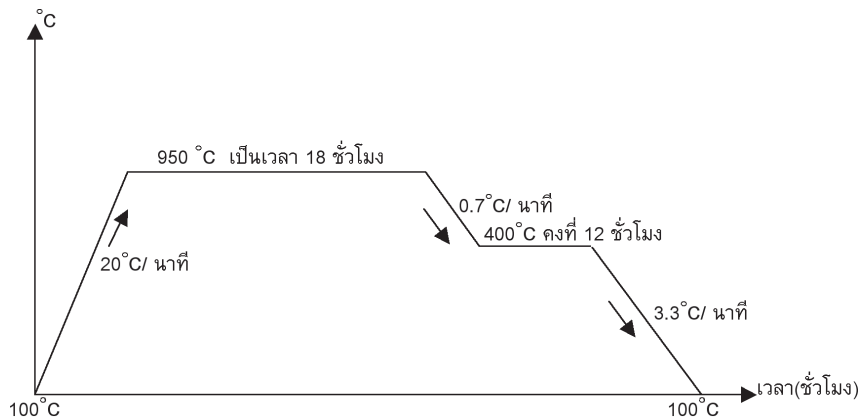
กระบวนการเผาครั้งที่ 1 เริ่มต้นกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการเพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิของเตาสูงถึง 950 องศาเซลเซียส แล้วคงที่อุณหภูมิไว้ 18 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิลดลงมาถึง 100 องศาเซลเซียส อีกครั้งก็เป็นอันเสร็จของกระบวนการเผาครั้งที่ 1 ซึ่งมีกระบวนการเผารูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 1

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเผาครั้งที่ 1 สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นสารสีดำ จับตัวกันเป็นก้อนแข็ง แต่มีรูพรุน หลังจากนั้นนำสารที่ได้จากกระบวนการเผาครั้งที่ 1 ไปบดในครกอลูมินาจนได้สารที่เป็นผงละเอียด แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดจนได้สารที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมสีดำ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และมีความหนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปในกระบวนการเผาครั้งที่ 2 ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

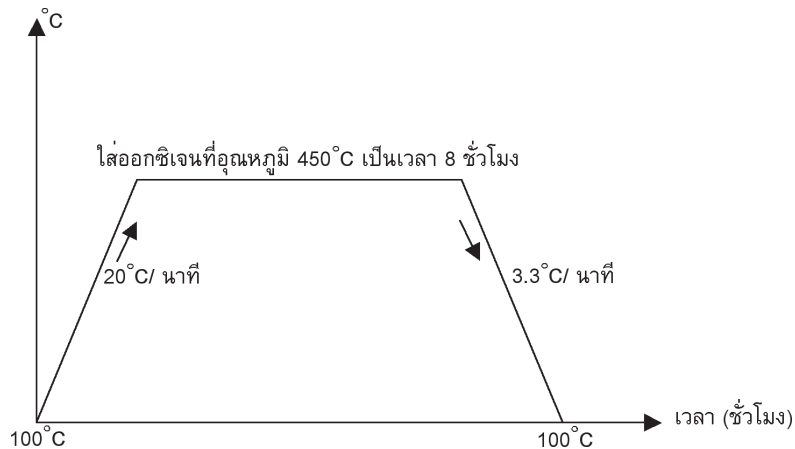
กระบวนการเผาครั้งที่ 2 เริ่มต้นกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส แล้วคงที่ไว้เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 0.7 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แล้วคงที่ที่อุณหภูมินี้ไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 3.3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสอีกครั้ง ซึ่งมีกระบวนการเผาดังรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 2

สารที่ได้จากการเผาครั้งที่ 2 จะมีความแกร่งมากกว่ากระบวนการเผาครั้งที่ 1 จากนั้นนำสารที่ได้ไปโด๊ปด้วยออกซิเจน เพราะว่อกออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งของสารกลุ่มนี้ โดยการนำไปเผาครั้งที่ 3 ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

กระบวนการเผาครั้งที่ 3 เริ่มเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 450 องศาเซลเซียส เริ่มให้ออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศด้วยการเปิดฝาเตาเป็นเวลา 8 ชั่วโมงแล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 3.3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิถึง 100 องศาเซลเซียสอีกครั้ง ซึ่งมีกระบวนการเผาดังรูปที่ 3 ดังนี้



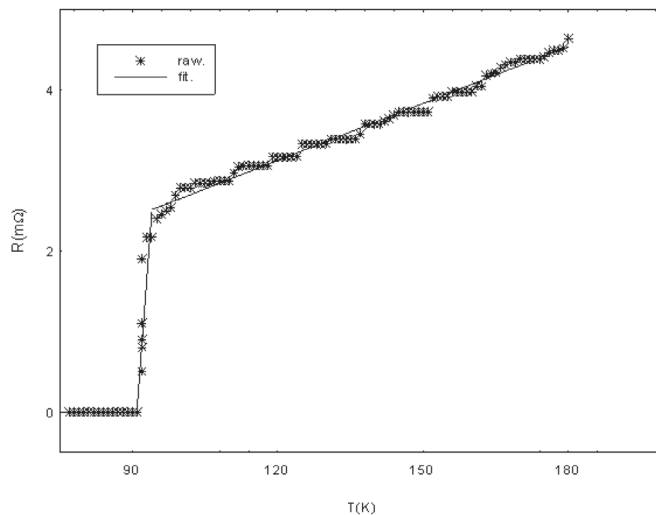
รูปที่ 3 แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 3

ผลการทดลอง

นำสารที่ได้จากกระบวนการเผาครั้งสุดท้ายไปทำขั้ว 4 ขั้ว เรียงตามยาวด้วย silver paint เพื่อนำไปทดลองวัดอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤตจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นเอง โดยคณะผู้วิจัยได้ตัดตัวนำยวดยิ่งออกไปบางส่วนเพื่อนำไปวัดด้วยเครื่องมือวัดชนิดอื่น ซึ่งจะได้ผลการทดลองตามลำดับดังต่อไปนี้

การวัดอุณหภูมิวิกฤต

นำตัวนำยวดยิ่งที่ทำขั้วเรียบร้อยแล้วใส่ในภาชนะทรงกระบอกที่ทำจากทองเหลืองเพื่อป้องกันไม่ให้นิโตรเจนเหลวสัมผัสสารตัวอย่างโดยตรง แล้วใส่ในถังโฟม ใส่ไนโตรเจนเหลวลงไปเพื่อลดอุณหภูมิจนถึง 77 เคลวิน ตัวนำจะอยู่ในสภาพนำยวดยิ่งแล้ว หลังจากนั้นใส่กระแสไฟฟ้าตรงขนาด 300 mA เข้าไปที่สองขั้วด้านนอก ส่วนสองขั้วด้านในใช้วัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น เพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยอุณหภูมินี้วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล type K ที่ติดอยู่ที่ผิวหน้าของสาร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4



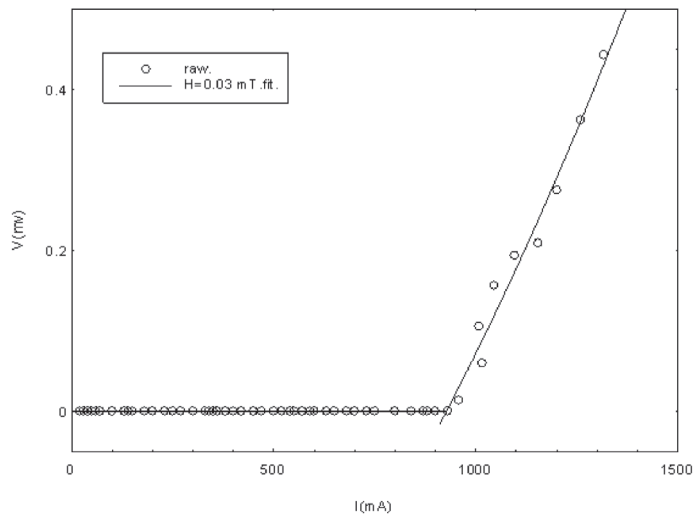
รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

ผลการทดลองพบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO ที่เตรียมได้ มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 92 เคลวิน

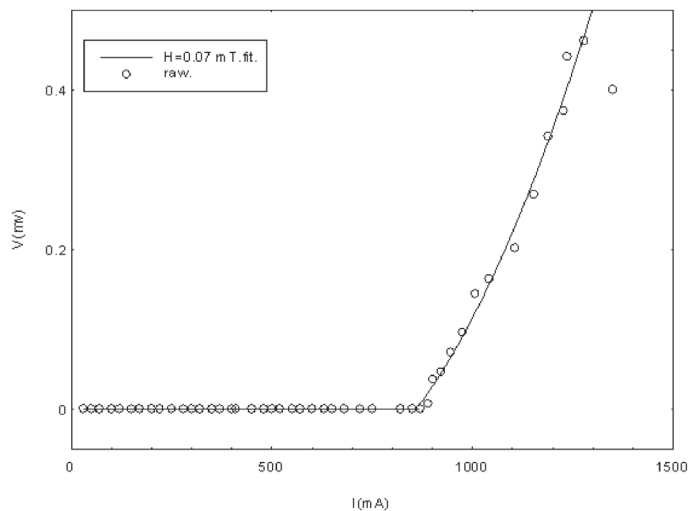
การวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

ระบบที่ใช้ในการทดลองวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ 77 เคลวิน ทำการทดลองเช่นเดียวกับการวัดอุณหภูมิวิกฤตอีกครั้ง แต่ครั้งนี้ให้ตัวนำยวดยิ่งวางตัวในสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กได้จากขดลวดเฮลมโฮลทซ์ (Helmholtz) และใช้แผ่นโฟมปิดบริเวณขั้วเพื่อป้องกันการลัดวงจรที่ขั้วเนื่องจากไนโตรเจนเหลว จากนั้นจะให้กระแสไฟฟ้าที่ปรับค่าได้เข้าไปในตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิคงที่ 77 เคลวิน แล้วให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ แก่ตัวนำยวดยิ่ง ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวด

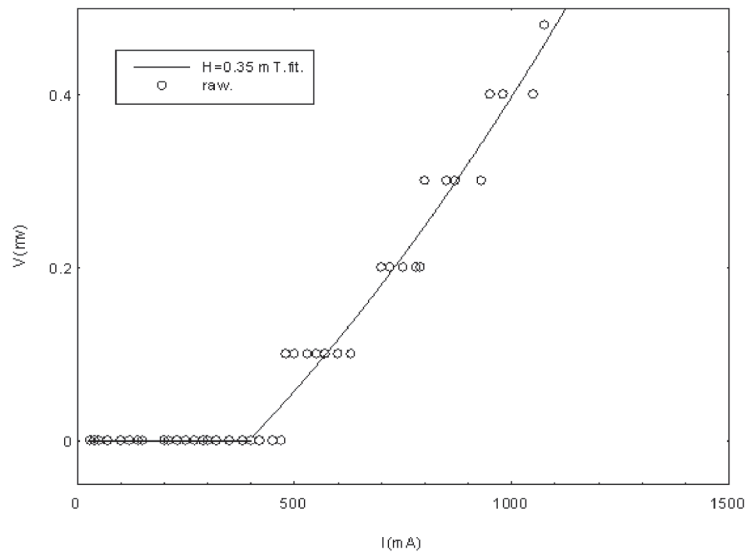
เฮลมิโฮลซ์ด้วย Tesla meter ซึ่งสามารถแสดงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ได้ โดยพบว่า กรณีที่สนามแม่เหล็กมีค่าเป็น 0.03 mT สามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้เท่ากับ 980 mA และหลังจากนั้น เพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กเป็น 0.07 mT และ 0.35 mT และ 0.40 mT สามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้ 900 mA และ 480 mA และ 420 mA ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า สนามแม่เหล็กขนาด 0.35 mT เป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสนามแม่เหล็กเป็น 0.40 mT ตัวอย่างแสดงสมบัติเป็นตัวนำปกติ และค่าที่มากที่สุดที่ตัวอย่างยังแสดงสมบัติเป็นตัวนำยวดยิ่งคือที่สนามแม่เหล็กมีค่า 0.35 mT เป็นดังรูปที่ 5 (จ) ดังนี้



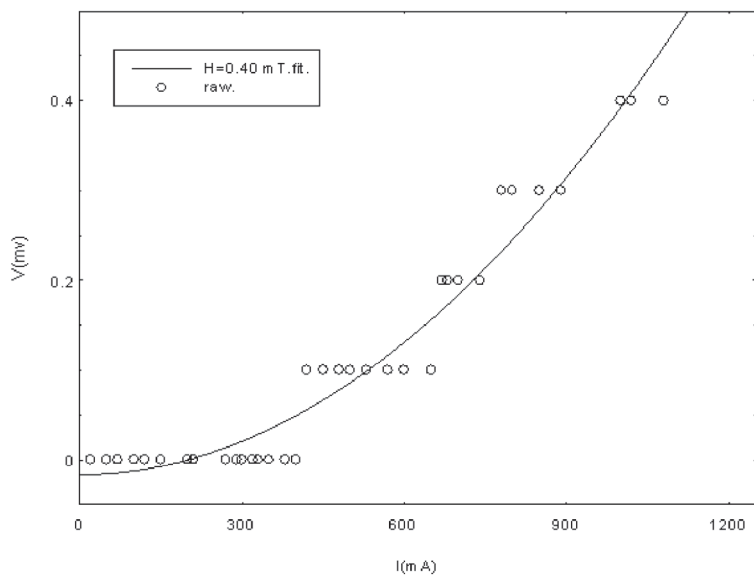
รูปที่ 5 (ก) แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ 0.03 mT



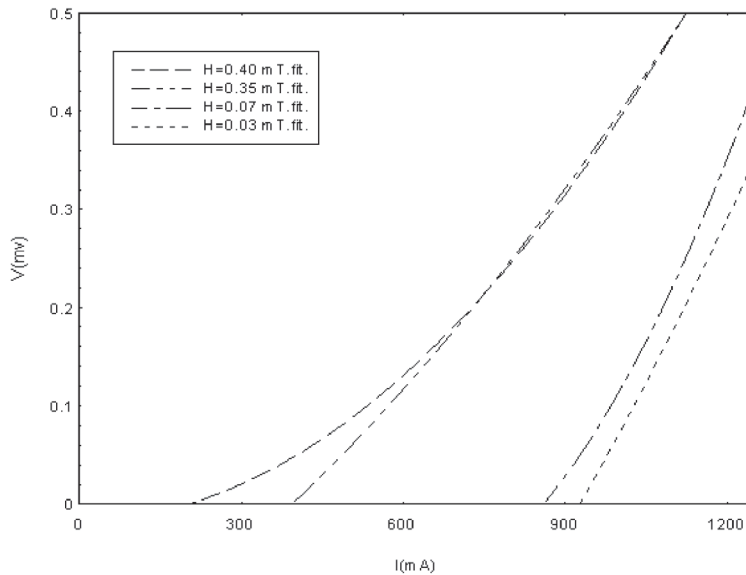
รูปที่ 5 (ข) แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ 0.07 mT



รูปที่ 5 (ค) แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ 0.35 mT



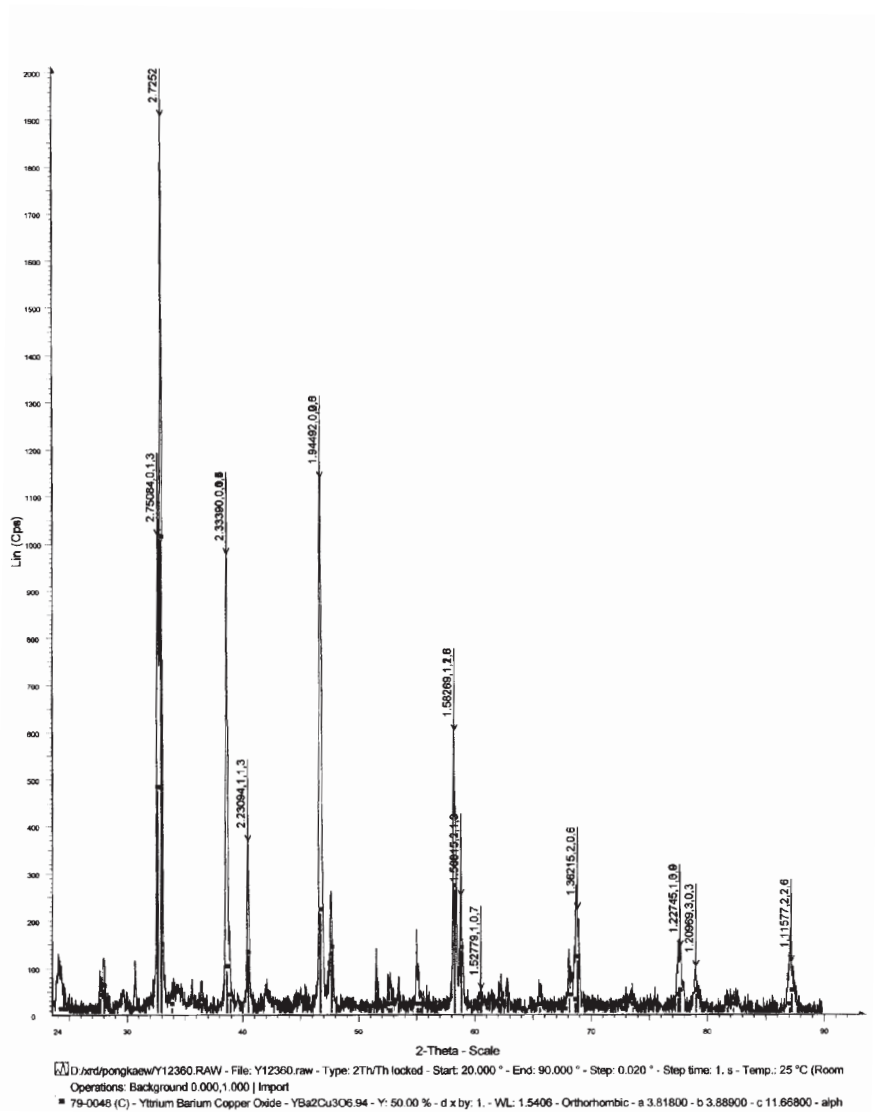
รูปที่ 5 (ง) แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ 0.40 mT



รูปที่ 5 (จ) กราฟสรุปอิทธิพลของสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ กัน

การวัดหาโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD

การวัดตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction, D8 ADVANCE) เป็นการศึกษาโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งโดยการยิงรังสีเอ็กซ์ไปยังสารที่ใช้ตรวจสอบ รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนเมื่อผ่านเข้าไปในผลึกของสาร ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนผ่านระนาบของผลึก จะถูกวัดด้วย Detector ที่มุมต่างๆ ซึ่งสำหรับตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้เมื่อนำไปทำการทดลองวัดด้วยเครื่อง XRD D8 ADVANCE มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

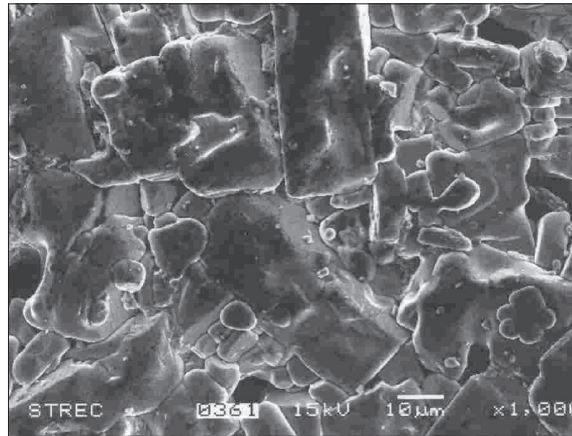


รูปที่ 6 แสดงผลการวัดด้วยเครื่อง XRD

พบว่าตัวนำยวดยิ่งมีโครงสร้างแบบ Orthorombic และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.96}$

การศึกษาผิวของตัวอย่าง

SEM (Scanning Electron Microscopy, JSM-5410LV) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเพื่อให้มองเห็นถึงพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งสามารถให้ดูขนาดของอนุภาค รูปร่างและความเป็นเนื้อเดียวกันของสารตัวอย่างได้ ภาพที่ได้จากการถ่ายด้วย SEM รุ่น JSM-5410LV กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงได้ดังนี้

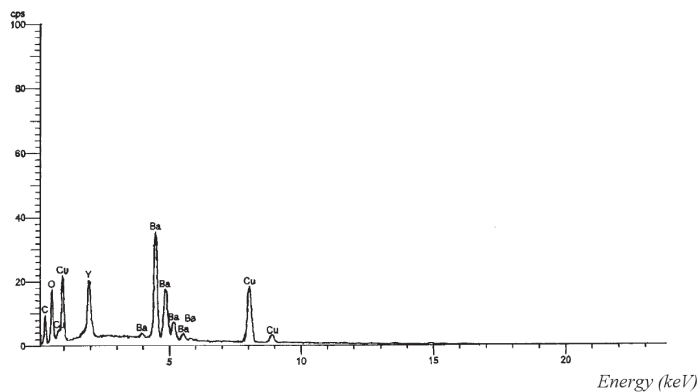


รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากภาพถ่ายของ SEM จะเห็นได้ว่าสารที่เตรียมได้ มีขนาดของเกรนส์ ประมาณ 10 ไมโครเมตร เนื้อสารยังไม่เป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควร

การศึกษาส่วนประกอบด้วยเครื่อง EDS

การวัดด้วยเครื่อง EDS (Energy Dispersive Spectroscopy, JEM-200CX) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาชนิดและปริมาณของส่วนประกอบของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง จากการวัดด้วยเครื่อง EDS รุ่น JEM-200CX สามารถแสดงได้ดังภาพ

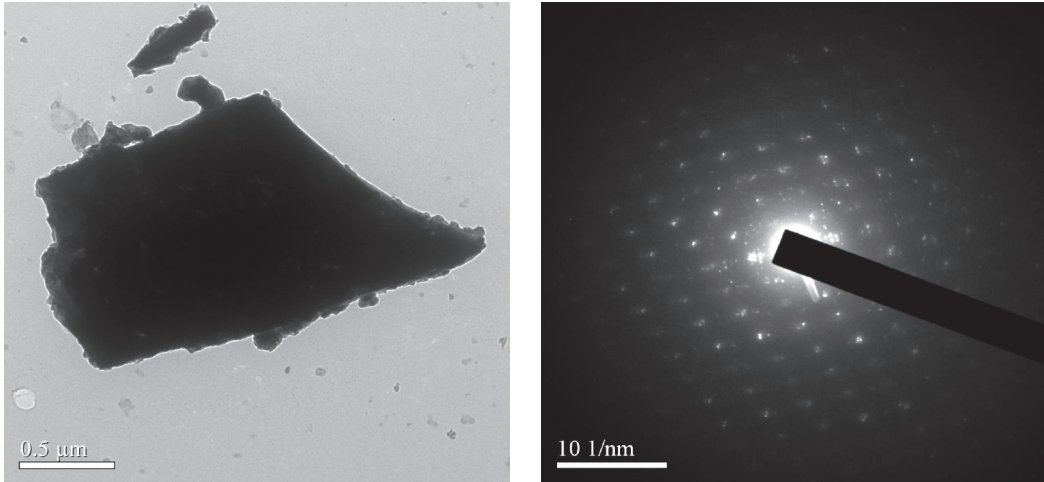


รูปที่ 8 ธาตุที่มีอยู่ในตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO ที่เตรียมได้

ผลการทดลองจากเครื่อง EDS พบว่าตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้นี้มีปริมาณธาตุยทเตรียม (Y) แบเรียม (Ba) คอปเปอร์ (Cu) และออกซิเจน (O) ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างไม่มีสารอื่นเจือปนเลย ทั้งนี้ตัว C ในรูปที่ 8 คือธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นสารประกอบของตัวจับสารตัวอย่าง

การศึกษาผลึกด้วยเครื่อง TEM

เครื่อง TEM (Transmission Electron Microscope, JSM-5410LV) เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ศึกษาลักษณะของผลึกของสาร จากการวัดตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO ด้วย TEM รุ่น JSM-5410LV สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ภาพ TEM ของตัวนำยวดยิ่ง

พบว่าตัวนำยวดยิ่งมีลักษณะของผลึกเป็นแบบผลึกเดี่ยวขนาดเล็ก โดยมีขนาดของผลึกประมาณ 0.5 ไมโครเมตร

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

คณะผู้วิจัยสามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่งในกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นได้ โดยใช้วิธี solid state reaction โดยมีสารตั้งต้นคือ ยิบเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) สารที่เตรียมได้ลักษณะแผ่นกลมสีดำ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตรมีอุณหภูมิวิกฤตที่ 92 เคลวิน สนามแม่เหล็กวิกฤต 0.35 mT มีโครงสร้างแบบ Orthorombic และสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{6.96}$ ลักษณะของผลึกเป็นแบบผลึกเดี่ยวขนาดเล็กและพบว่าสารยังไม่เป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควร

อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สร้างขึ้นเองโดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการพื้นฐาน สามารถใช้วัดหาอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งได้ ถ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจะสามารถใช้เป็นชุดทดลองขั้นสูงในระดับปริญญาตรีได้

ส่วนปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลองพบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-CuO เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วซึ่งอาจเกิดมาจากความชื้น ดังนั้นเมื่อทดลองเสร็จแล้วควรทำให้สารตัวอย่างแห้งอย่างรวดเร็วก่อนจะเก็บเข้าสู่โถดูดความชื้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Onnes, K. H. 1911. The Disappearance of the Resistivity of Mercury. *Communication – Laboratory of Leiden*: 120b, 122b, 124c.
2. Testardi, L. R., Wernick, J. H. and Royer, C. K. 1974. Superconductivity with Onset Above 23 °K in Nb--Ge Sputtered Films. *Solid State Communications* 15(1): 1-4.
3. Bednorz, J. G. and Muller, K. A. 1986. Possible High Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. *Z. Physik B* 64: 189-193.
4. Chu, C. W., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J. and Wang, Y. Q. 1987. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Yb-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letters* 58: 908-910.
5. Fox, N. J., Rustad, F. A. and Smith, W. R. 1988. Measurement of the Transition Temperature of a High Tc Superconductor. *American Journal of Physics* 56(11): 980-982.
6. Inorganic Chemistry Laboratory. 2003. Preparation and Characterization of a Perovskite-Based Complex Metal Oxide Superconductor, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$. Available from <http://www.uiowa.edu/~coo4153a/ybco-f04.pdf>. 15 January 2006.
7. Materials Chemistry-Superconductors. 2006. Preparation, Structure and Properties of High-Temperature Superconductor. Available from stanwhit@binghamton.edu PHYWE. 14 February 2006.
8. Rossano, L. M. 1997. An Inexpensive and Easy Experiment to Measure the Electrical Resistance of High-Tc Superconductors as a Function of Temperature. *American Journal of Physics* 65(10): 1024-1026.
9. Van dervoort, K. G., Willingham, J. M. and Morris, C. H. 1995. Simple, Inexpensive Probe for Resistivity Measurements Above 77 K on Metals and Superconductors. *American Journal of Physics* 63(8): 759-760.

ได้รับบทความวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2550
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 20 มีนาคม 2550