

การศึกษาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_x$ ที่เจือด้วย Fe_2O_3 The study on critical temperature of $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_x$ superconductor dope Fe_2O_3

ธีรวัลย์ ปานกลาง และ รัตนสุตา สุกदनัยสร*

Theerathawan Panklang and Rattanasuda Supadanaison

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

Bangkok 1061

*E-mail:rattanasuda@yahoo.com

Received: 31 Jan 20

Revised: 11 Nov 20

Accepted: 16 Nov 20

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_x$ ที่เจือด้วย Fe_2O_3 สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ประกอบด้วย อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และไอรอนหรือออกไซด์ (Fe_2O_3) นำมาสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ซึ่งใช้ความร้อนในกระบวนการเผาผลาญและเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส นำมาทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ด้วยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัดสี่ขั้ว การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และหาองค์ประกอบธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วยเหล็กเท่ากับ 0.001 โดยมีมวลมีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดเท่ากับ 94.5 เคลวิน ใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่ง Y156 ปกติ ตัวนำยวดยิ่งที่เจือเหล็กมีขนาดของเกรนของพื้นผิวประมาณ 3 ถึง 6 ไมโครเมตร มีความไม่กระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบและรูพรุนเกิดขึ้น

คำสำคัญ : ตัวนำยวดยิ่ง Y156 ปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ไอรอนหรือออกไซด์ (Fe_2O_3)

Abstract

This research focused on critical temperature of $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_x$ superconductor doped with Fe_2O_3 . Y_2O_3 , BaCO_3 , CuO , and Fe_2O_3 . The starting materials were mixed in a mortar and prepared by solid state reaction. The calcination and sintering temperatures were set at 900°C and then lowered to a temperature at 550 oC for annealing temperature. Physical properties of the superconductor were analyzed by a four-point probe method for resistivity scanning electron microscope (SEM) for surface morphology, energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) to chemical composition. It was found that the highest critical temperature at 94.5 K on Y156 superconductor when doped by Fe = 0.001 Wt%. The Fe-doped samples had a grain size about 3 to 6 microns. In addition, the non-dispersion of elements and porous was occurred in the structure.

Keywords: Y156 superconductor, Solid state reaction, Fe_2O_3

1. บทนำ

ตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติด้านฟิสิกส์ของแข็ง (Solid State Physics) ที่โดดเด่นกว่าวัสดุชนิดอื่น เช่น สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็ก เป็นต้น ในระยะแรกตัวนำยวดยิ่งอยู่ในรูปแบบของโลหะบริสุทธิ์ ต่อมาพบว่าการค้นพบที่หลากหลายขึ้น ได้แก่ ตัวนำยวดยิ่งแบบโลหะ โลหะผสมหรือเซรามิก ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถนำทฤษฎีตัวนำยวดยิ่งมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้โดยอาศัยสมบัติโดดเด่นที่วัสดุนี้มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์และการลอยตัวเหนือแม่เหล็กได้ [1]

จากการศึกษาประวัติการค้นพบตัวนำยวดยิ่ง คาร์เมอริงส์ ออนเนส [2] นักฟิสิกส์ชาว เนเธอร์แลนด์ เป็นผู้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่ง ในปี ค.ศ. 1911 จากการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์ โดยใส่ปรอทลงในภาชนะรูปวงแหวนแคปไซม์เหลว เมื่ออุณหภูมิของปรอทลดลงพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 4.2 เคลวิน เรียกสภาพดังกล่าวนี้ว่า “สภาพนำยวดยิ่ง” (Superconductivity) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งนี้ว่า “อุณหภูมิวิกฤต” (Critical temperature, T_c) ต่อมาในปี ค.ศ. 1913 คาร์เมอริงส์ ออนเนส ทำการทดลองที่ยืนยันว่าสารตัวนำยวดยิ่งสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน โดยเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าต่ำกว่าค่าหนึ่ง ตัวนำยวดยิ่งจะยังคงสภาพนำยวดยิ่งได้ แต่ถ้าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าสูงกว่าค่านี้ วัสดุจะกลายสภาพเป็นตัวนำปกติทันที เรียกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้ว่า “ความหนาแน่นกระแสวิกฤต” (Critical current density ; J_c) ในปี ค.ศ. 1933 ไมสเนอร์ และโอเชนเฟลด์ [3] นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่ง คือ เมื่อตัวนำยวดยิ่งถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนสถานะอยู่ในสภาพนำยวดยิ่ง มีสมบัติเป็นแม่เหล็กไดอาที่สมบูรณ์ (Perfect diamagnetism) จากนั้นเมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไม่สามารถพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ แต่ถ้าตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะปกติ สนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ไมสเนอร์” (Meissner effect) โดยถ้าวางตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตไว้เหนือแท่งแม่เหล็ก ตัวนำยวดยิ่งจะลอยนิ่งเหนือแท่งแม่เหล็กได้ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำรถไฟความเร็วสูงในปัจจุบัน

ในปี 2551 [4] มีการค้นพบสภาพตัวนำยวดยิ่งในสารตัวนำยวดยิ่งที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โดยสมบัติสำคัญที่ทำให้ตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่นี้มีความน่าสนใจมาก คือการที่ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตบนสูงมาก ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการประยุกต์ใช้งานจริงเพราะการใช้งาน

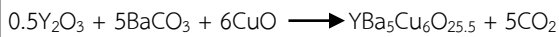
ส่วนใหญ่ของตัวนำยวดยิ่ง คือ การใช้งานสนามแม่เหล็กความเข้มสูงที่ตัวนำยวดยิ่งผลิตได้ไม่จำเป็นจะเป็นรถไฟพลังงานแม่เหล็ก (MegLev) การสร้างภาพด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (MRI) หรือเครื่องเร่งอนุภาค เป็นต้น ต่อมาหวังและคณะ [5] ได้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่เจือด้วยอนุภาคของ Fe_2O_3 ขนาดนาโนซึ่งประกอบด้วย ตัวนำยวดยิ่งตัวอย่างที่ 1 ถูกเจือด้วย Fe_2O_3 เฉพาะบางส่วน ตัวอย่างที่ 2 ถูกเจือด้วย Fe_2O_3 อย่างสม่ำเสมอ และตัวอย่างที่ 3 ไม่มีการเจือของอนุภาคใด ๆ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างกันคือ 5 เคลวิน 40 เคลวิน และ 60 เคลวิน ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 40 และ 60 เคลวิน ตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มที่เจือด้วยอนุภาคของ Fe_2O_3 ตัวอย่างที่ 1 ให้ผลการทดสอบดีที่สุด และที่อุณหภูมิ 5 เคลวิน ตัวอย่างที่ 2 ที่มีการเจืออนุภาคของ Fe_2O_3 อย่างสม่ำเสมอให้ผลการทดสอบดีที่สุด ซึ่งจากทั้ง 2 กรณีจะพบว่าตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วยอนุภาคของ Fe_2O_3 มีผลการทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กดีกว่าตัวอย่างที่ 3 ที่ไม่มีการเจือของอนุภาคใด ๆ

ในปี 2557 ขางและคณะ [6] ได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลของการเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O แบบฟิล์ม โดยทำการเตรียมในรูปแบบของสารละลายทางเคมีแล้วเคลือบลงบนสารประกอบของ $LaAlO_3$ และได้ทำการเจือจากไอออนออกไซด์ ลงไปผสมกับตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มแล้วทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O ที่เจือเหล็กลงไปมีค่าอุณหภูมิวิกฤตลดลงอย่างช้า ๆ ตามปริมาณของเหล็กที่เจือไปแต่อย่างไรก็ตามตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มที่เจือด้วยไอออนออกไซด์ในอัตราส่วนที่น้อยกว่า 0.005 จะมีค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มบริสุทธิ์ที่ไม่มีการเจือของสารอื่นและในปี 2560 กอนซัลเวสและคณะ [7] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลของการเจือเหล็กลงในตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์จาก Bi_2Ni ที่มีโครงสร้างขนาดไมโคร โดยการเจืออะตอมของเหล็กลงไปตามสูตร $Bi_2Ni_{1-x}Fe_x$ เมื่อที่ x เท่ากับ 0.00 0.05 และ 0.10 ตัวนำยวดยิ่งตัวอย่างถูกเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติที่เกิดขึ้นซึ่งพบว่า ตัวนำยวดยิ่งประเภท Bi_2Ni ที่เจือด้วยเหล็กทั้ง 3 สูตรมีโครงสร้างแบบออร์โทโรมบิกและไม่มีผลต่ออุณหภูมิวิกฤตโดยตัวอย่างทั้งหมดมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 4 เคลวิน จากสมบัติที่น่าสนใจของตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีเหล็กเป็นองค์ประกอบที่ค้นพบใหม่นี้ ทำให้มีงานวิจัยทั้งในเชิงการทดลองและเชิงทฤษฎีตีพิมพ์เป็นจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_x$ ที่เจือด้วย Fe_2O_3

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ผู้วิจัยได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156 และ Y156 เจือเหล็ก ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยมีสารตั้งต้น คือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ตามขั้นตอนดังนี้

2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y156



2.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y156 เจือเหล็กจะถูกเตรียมออกมาอยู่ในรูปของสารประกอบ $YBa_5(Cu_{1-x}Fe_x)_6O_{24-z}$ ซึ่งใช้สูตรในการเตรียมเช่นเดียวกับตัวนำยวดยิ่ง Y156 โดยมีไฮดรอกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นสารเจือ ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมขึ้นกับสัดส่วนของการเจือเหล็กที่ต้องการเตรียม

จากปฏิกิริยาทางเคมีข้อ 2.1 และ 2.2 สามารถคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นตามปริมาณสารสัมพันธ์และนำสารตั้งต้นมาผสมกันบดให้ละเอียดด้วยมือในครกอลูมินาแล้วนำมาผ่านตะแกรงเพื่อทำการคัดแยกอนุภาคให้มีขนาดตามต้องการแล้วนำไปสู่กระบวนการเผาแคลไซน์ (Calcination) และกระบวนการเผาซินเตอร์ (Sintering) ในเตาเผาอุณหภูมิสูงซึ่งมีกระบวนการเผาแบบต่าง ๆ ที่แตกต่างกันโดย กระบวนการแรกเป็นกระบวนการเผาแบบผงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 920 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

นำสารที่ได้จากกระบวนการเผาผงซึ่งจะมีลักษณะแข็งขึ้นและจับตัวเป็นก้อนมาบดให้ละเอียดแล้วนำไปผ่านตะแกรงขนาด 40 ไมโครเมตร เพื่อให้สารมีขนาดอนุภาคเล็กลง หลังจากนั้นอัดขึ้นรูปตามแบบพิมพ์โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรงอัด 15,000 นิวตันต่อตารางเมตร เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารที่อัดขึ้นรูปมีลักษณะเป็นก้อนกลมแบนแล้วนำสารนี้วางบนแผ่นอลูมินา จากนั้นเริ่มกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปโดยเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 920 องศาเซลเซียส คงที่อุณหภูมิไว้ 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส คงที่อุณหภูมิไว้ 24 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อผ่านกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปแล้วนำออกมาสังเกตลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 โดยถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ปริมาณธาตุจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานและศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว โดยการหาสภาพต้านทานไฟฟ้าหาได้จากการวัดรอบสารตัวอย่าง ด้วยการใส่ไนโตรเจนเหลวลงในภาชนะที่เตรียมไว้เพื่อรักษาอุณหภูมิ ขั้ววัดทำจากอลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร ขั้วทั้ง 4 จะถูกประสานด้วย

กาวเงินเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าและใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค เพื่อวัดอุณหภูมิ ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงตัวขนาด 100 มิลลิแอมป์ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สารตัวอย่างและใช้คอมพิวเตอร์เก็บค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 77 ถึง 120 เคลวิน ดังรูป 1

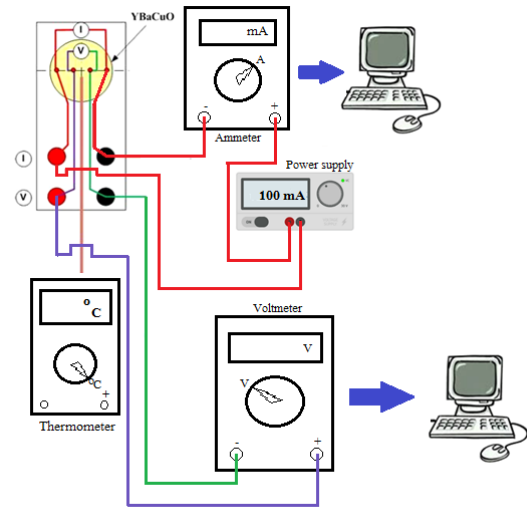


Figure 1 Measurement of Electrical Resistivity by four-point probe technique

นำค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ คำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสูตร

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I}$$

เมื่อ

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

I คือ ค่าของกระแสไฟฟ้าคงตัว (A)

s คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (m)

3. ผลการวิจัย

ตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์ขึ้นในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างที่กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงได้ดังรูป 2

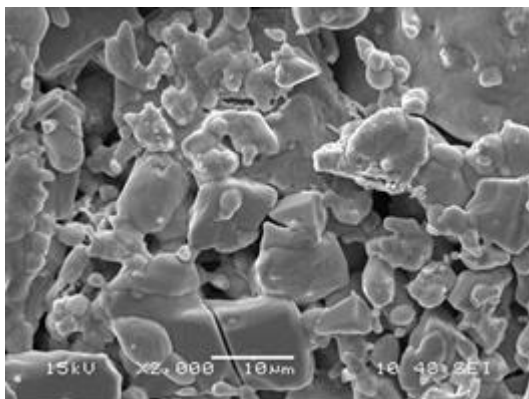


Figure 2 Pure Y156 superconductor

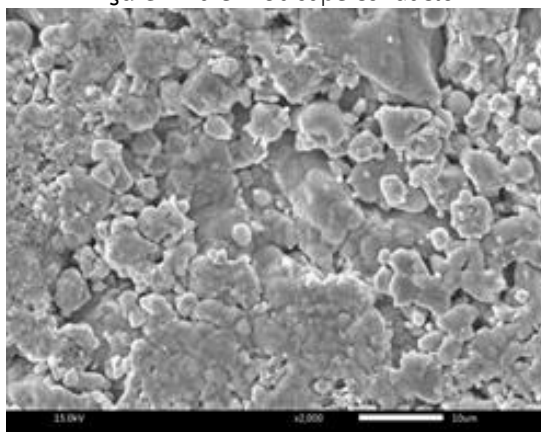


Figure 3 Y156 dope 0.001 Fe superconductor

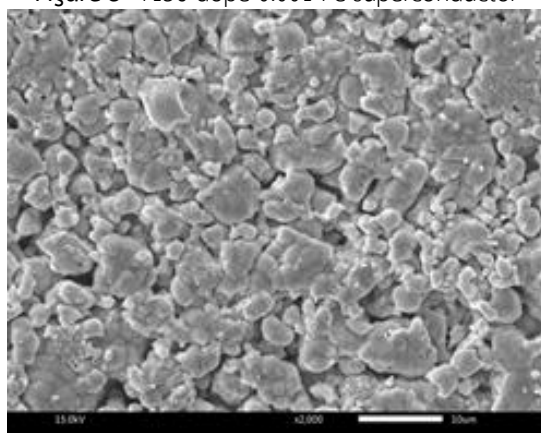


Figure 4 Y156 dope 0.003 Fe superconductor

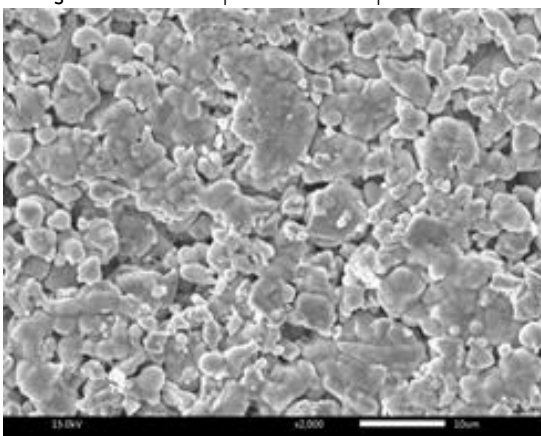


Figure 5 Y156 dope 0.005 Fe superconductor

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเกรนจากภาพถ่ายที่ กำลังขยาย 2000 เท่าพบว่า ขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีขนาดใหญ่ บางบริเวณมีการกระจายตัวของเกรนไม่สม่ำเสมอ จึงเกิดช่องว่างระหว่างเกรนขึ้น ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 เจือเหล็ก พบว่าตัวนำยวดยิ่งมีขนาดเกรนเล็กกว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่ไม่เจือ มีรูพรุนน้อยลง ซึ่งขนาดของเกรนที่พบ จากตัวอย่างของตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วย Fe_2O_3 แต่ละสัดส่วน นั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิวิกฤตของ ตัวนำยวดยิ่ง Y156 และ Y156 เจือเหล็ก พบว่าอุณหภูมิ วิกฤตของตัวนำยวดยิ่งมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มของเหล็ก ที่เจือ แสดงได้ดังตารางที่ 1

Table 1 The critical temperature of Y156 and Y156 doped Fe superconductor.

sample	T_c offset (K)	T_c onset (K)	ΔT_c (K)
Y156	89.4	94.8	5.4
Y156 + 0.001Fe	87.1	94.5	7.4
Y156 + 0.003Fe	86.4	92.5	6.1
Y156 + 0.005Fe	81.7	89.9	8.2

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ วิกฤตและปริมาณของเหล็กที่ทำการเจือลงไปในตัวนำยวดยิ่ง เพื่อพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นได้ดังรูป 6

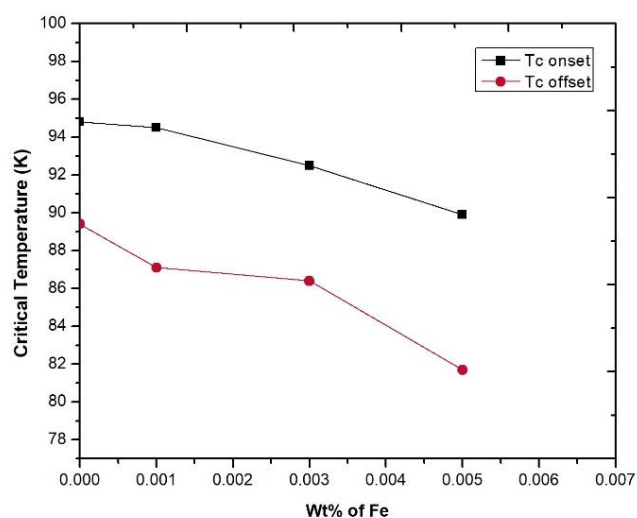


Figure 6 The relationship between Critical Temperature and Y156 superconductor was doped by doped Fe which $x=0, 0.001, 0.003, 0.005$ Wt%.

4. อภิปรายผลการทดลอง

เมื่อนำตัวนำยวดยิ่ง Y156 และ Y156 เจือเหล็กที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์โดยการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เกรนของพื้นผิวตัวนำยวดยิ่ง Y156 เจือเหล็กมีขนาดประมาณ 3 ถึง 6 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่ไม่ได้เจือสารใด ๆ บริเวณขอบของเกรนจะมีรูพรุนเกิดขึ้น ลักษณะของเกรนจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่ แบบแท่งและแบบแผ่น เกิดจากการเกิดเฟสใหม่ภายในโครงสร้างจากการทำปฏิกิริยากันของโลหะ Cu และ Fe ซึ่งลักษณะของเกรนที่สังเกตได้นี้ สอดคล้องกับผลการวิจัยของโจเซฟและคณะ [8] ซึ่งอธิบายไว้ว่า การทำปฏิกิริยากันของโครงสร้าง Cu-Fe-O ทำให้เกิดเฟสใหม่ซึ่งเป็นเฟสของ CuO ที่มีลักษณะเป็นแบบแท่ง และเฟสของ CuFe_2O_4 ที่มีลักษณะแบบแผ่น

จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัดสี่ขั้วพบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วยเหล็กเท่ากับ 0.001 โดยมีมูลค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุด ซึ่งใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่ไม่ได้เจือสารใด ๆ โดยมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) เท่ากับ 94.5 เคลวิน และอุณหภูมิวิกฤตออฟเซต (T_c offset) เท่ากับ 87.1 เคลวิน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของ Fe_2O_3 ที่เจือลงไปในตัวนำยวดยิ่งมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตที่วัดได้เปลี่ยนไป โดยตัวนำยวดยิ่งที่มีการเจือด้วย Fe_2O_3 มากขึ้นจะมีอุณหภูมิวิกฤตลดลง การลดลงของอุณหภูมิวิกฤตที่เกิดขึ้น เนื่องจาก Fe_2O_3 ที่เจือลงไปในการสร้างส่งผลต่อสภาพนำยวดยิ่ง (Superconductivity) ของสารสัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากตัวนำปกติเป็นตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของซางและคณะ [6] ที่พบว่า ตัวนำยวดยิ่งประเภทอิตเทรียมที่เจือเหล็กลงไปในการสร้างจะมีค่าอุณหภูมิวิกฤตลดลง

5. สรุปผลการวิจัย

การเจือ Fe_2O_3 มีผลทำให้อุณหภูมิวิกฤต ของตัวนำยวดยิ่งประเภท YBaCuO ที่สังเคราะห์ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่ปัจจัยสำคัญในการเกิดเหตุการณ์นี้คือปริมาณของเหล็กที่เจือซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างของสาร มีผลทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงตามปริมาณการเพิ่มของเหล็กที่เจือนอกจากนี้ปริมาณของการเจือเหล็กยังส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งซึ่งทำให้เกิดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างไปจากเดิม

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยนี้จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรี

นครินทรวิโรฒ ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองในครั้งนี้

6. Reference

- [1] Kruaehong, T. 2013. A Century of Superconductors. *The Journal of KMUTNB*. 23(2):525-542. (in thai)
- [2] Buckel, W. 1991. **Superconductivity: Fundamental and Application**. New York: VCH Publisher, Inc.
- [3] Meissner, W. and Ochsenfeld, R. 1933. Ein neuer Effekt bei Eintritt der supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*. (21): 787-788.
- [4] Changjan, A. 2012. Fe-Based Superconductors. *Srinakharinwirot Science Journal*. 28(1): 219-231. (in thai)
- [5] Wang, J., et al. 2009. **Microstructural and Pinning Properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films Doped with magnetic Nanoparticles**. Texas: Department of Electrical and Computer, Texas A&M University.
- [6] Zhang, H., Zhao, Y., Wang, W., Pan, M., & Lei, M. 2014. Fe-doped epitaxial YBCO films prepared by chemical solution deposition. *Journal of Modern Transportation*. 22(1): 45-49. doi:10.1007/s40534-014-0034-2.
- [7] Gonsalves, S. H., Monteiro, J. F. H. L., Da Silva Leal, A. C., De Andrade, A. V. C., De Souza, G. B., Siqueira, E. C., Jurelo, A. R. 2017. Fe-doping effect on the Bi_2Ni superconductor microstructure. *Materials Research*. 20(3): 601-606.
- [8] Paul Joseph, D., Venkateswaran, C., & Selva Vennila, R. 2010. Critical Analysis on the Structural and Magnetic Properties of Bulk and Nanocrystalline Cu-Fe-O. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2010:1-14.