

อิทธิพลจากการเจอเงินที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156
ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง



ปริญญานิพนธ์
ของ
กัญชพร ตันติวิชิตเวช

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
กรกฎาคม 2561

อิทธิพลจากการเจอเงินที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156
ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง



ปริญญานิพนธ์
ของ
กัญชพร ตันติวิชิตเวช

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กรกฎาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

อิทธิพลจากการเจอเงินที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156
ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มิถุนายน 2561

กัญชพร ตันติวิชิตเวช. (2561). อิทธิพลจากการเจือเงินที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง. วิทยานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญา
นิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิริ สิรินิลกุล, รองศาสตราจารย์พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลจากการเจือเงินที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ($\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-z} + x\text{Ag}_2\text{O}$ โดยที่ $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้น คือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) จากนั้นนำสารตั้งต้นที่ผสมกันตามสัดส่วนเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อน ได้แก่ กระบวนการเผาผง และกระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ส่วนกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นำสารที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว (Four-point probe technique) ศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และศึกษาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอดิเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration) ผลการศึกษา พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีอุณหภูมิวิกฤตอุณหภูมิสูงสุด คือ 95 เคลวิน ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05 Ag_2O มีอุณหภูมิวิกฤตอุณหภูมิสูงสุดที่ 89 เคลวิน ผลจากการเจือเงินทำให้พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีความพรุนลดลง และช่องว่างระหว่างเกรนแคบลง การศึกษาอัตราส่วนของปริมาณธาตุพบว่าการกระจายตัวของธาตุไม่สม่ำเสมอและพบความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสาร การวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าสารตัวอย่างทั้งหมดมีโครงสร้างแบบออโรมิก การเจือเงินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c น้อยมาก แต่มีผลต่อค่าแอนไอโซทรอปิกและขนาดแกน c/a มาก จากการศึกษาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างพบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ มากที่สุด คือ 0.263 และมีอุณหภูมิวิกฤตอุณหภูมิสูงสุด คือ 95 เคลวิน ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05 Ag_2O มีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ น้อยที่สุด คือ 0.135 และยังมีอุณหภูมิวิกฤตอุณหภูมิสูงสุดที่ 89 เคลวิน แสดงว่า เมื่อตัวนำยวดยิ่งมีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ สูง จะมีอุณหภูมิวิกฤตอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย

คำสำคัญ: ตัวนำยวดยิ่ง Y156, ตัวนำยวดยิ่งเจือเงิน, ปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง

INFLUENCE OF Ag DOPING ON SOME PHYSICAL PROPERTIES OF
Y156 SUPERCONDUCTOR PREPARED BY SOLID STATE REACTION



AN ABSTRACT
BY
KANCHAPORN TANTIVICHITVECH

Presented in Partial Fulfillment of Requirements for the
Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University

July 2018

Kanchaporn Tantivichitvech. (2018). *Influence of Ag Doping on Some Properties of Y156 Superconductor Prepared by Solid State Reaction*. Master's thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Siri Sirininlakul, Assoc. Prof. Pongkaew Udomsamuthirun.

In this research, the influence of Ag doping on some properties of Y156 Superconductors ($\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-z} + x\text{Ag}_2\text{O}$ where $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) prepared by Solid State Reaction were studied. Yttrium(III)oxide (Y_2O_3), Barium Carbonate (BaCO_3), Copper Oxide (CuO) and Silver Oxide (Ag_2O) were used as the precursors. They were mixed at the appropriate ratio and proceeded by heat treatments; with a calcination temperature and a sintering temperature of 900°C , and an annealing temperature at 550°C . All of the samples obtained were characterized by resistivity measurement with standard four-point probe technique, a scanning electron microscope (SEM), an energy dispersive X-ray spectrometer (EDX), an X-ray diffraction (XRD), and the standard iodometric titration used to determine the amount of Cu^{2+} , Cu^{3+} and oxygen content. We found that the highest critical temperature was found in pure Y156 at 95 K. The lowest critical temperature was found in Y156 doped $0.05\text{Ag}_2\text{O}$ at 89K. The surface of Y156 doped Ag_2O were improved by adding Ag to the porous structure and had narrow grain boundaries. They studied the compositions of elements demonstrated uneven distribution of elements and non-homogeneous material. The analysis of the microstructure found that all of the samples had orthorhombic structures. The Ag doping had a slight effect on c-axis but had significant effect on anisotropic and c/a ratio. Also, the highest critical temperature in the pure Y156 sample with $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ equal to 0.26 and the lowest critical temperature was found in Y156 doped 0.05Ag with $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ equal to 0.14. The results revealed that the higher $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ ratio, the higher critical temperature was found.

Keywords: Superconductor doped Ag, Y156 Superconductor, Solid State Reaction

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
อิทธิพลจากการเจอเงินที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156
ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง
ของ
กัญชพร ตันตวิวิชิตเวช

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์จักรชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	คณะกรรมการสอบปากเปล่า
.....ที่ปรึกษาหลัก	ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริ สิรินิลกุล)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธรักษา)
.....ที่ปรึกษาร่วม	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริ สิรินิลกุล)
	กรรมการ
	(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย)
	กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม)



งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัย
จาก
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริ สิรินิลกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่คอยติดตาม ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธรักษา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณธัญนพ นิลกำจร คุณสมพร ดิยะศรี และคุณวิรัช วงศ์ภักดี ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองและช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์เพื่อการทำวิจัย ขอขอบคุณนายวรยุทธ บุญโยประการ เพื่อนนิสิตปริญญาโท ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวทุกคน ที่สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยตลอดมา

กัญชพร ตันติวิจิตรเวช

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	4
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
การเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง Y-Ba-Cu-O	6
การเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123)	6
การเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ (Y156)	9
การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O เจือด้วยเงิน	11
การหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน	15
การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง	19
การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว	19
การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	21
การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน	24
3 วิธีดำเนินการวิจัย	25
การเตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน	26
การคำนวณปริมาณสารตั้งต้น	26
การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง	27
ขั้นตอนการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว	30
ขั้นตอนการหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน	31

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย	35
การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำวดยิ่ง	35
อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำวดยิ่ง	35
ลักษณะสัณฐานของตัวนำวดยิ่ง	42
ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวนำวดยิ่ง	49
ปริมาณธาตุของตัวนำวดยิ่ง	53
ปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างของตัวนำวดยิ่ง	55
5 สรุป อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	59
สรุปผลการวิจัย	59
อภิปรายผลการวิจัย	60
ข้อเสนอแนะ	61
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก	67
ภาคผนวก ข	70
ประวัติย่อผู้วิจัย	83

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123	36
2 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156	37
3 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag ₂ O	38
4 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag ₂ O	39
5 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag ₂ O	40
6 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag ₂ O	41
7 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรที่กระแสไฟฟ้าคงตัว 100 mA.....	42
8 ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 6 ตัวอย่าง กลุ่มปริภูมิของสารนำยวดยิ่ง และสารปกติ	50
9 ปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง	54
10 อัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้เฉลี่ยเทียบกับอัตราเตรียม	55
11 จำนวนโมลของทองแดง ปริมาณออกซิเจน และสูตรเคมี.....	56
12 ปริมาณ Cu ³⁺ /Cu ²⁺ ปริมาณออกซิเจน เปอร์เซ็นต์ฟรอนต์ออกซิเจน และอุณหภูมิวิกฤต...	56
13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123	71
14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156	73
15 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag ₂ O	75
16 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag ₂ O	77
17 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag ₂ O	79
18 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag ₂ O	81

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์โรฟสไกต์ ABX_3	6
2 โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$ แบบออร์ทอโรมบิก	7
3 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O กลุ่มใหม่	10
4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตกับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y124 และ (YCa)124	12
5 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123 และ Y123 เจือด้วยเงิน	13
6 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y358 ที่เจือด้วยเงิน	15
7 การวัดความต้านไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว	19
8 การหาค่าอุณหภูมิจากกราฟ	20
9 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก	22
11 การทำงานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน	24
12 แผนภาพขั้นตอนดำเนินการวิจัย	25
13 สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง	27
14 ลักษณะสารหลังจากผสมเข้ากัน	28
15 กราฟแสดงอุณหภูมิในกระบวนการเผาผลาญ	28
16 ลักษณะสารหลังจากกระบวนการเผาผลาญ	29
17 ลักษณะสารหลังจากการอัดขึ้นรูป	29
18 กราฟแสดงอุณหภูมิในกระบวนการเผาขึ้นรูปและการอบอ่อน	30
19 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง	31
20 กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y123	35
21 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123	36
22 กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y156	36
23 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156	37
24 กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง $Y156 + 0.05Ag_2O$..	37
25 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง $Y156 + 0.05Ag_2O$	38
26 กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง $Y156 + 0.10Ag_2O$..	38
27 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง $Y156 + 0.10Ag_2O$	39
28 กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง $Y156 + 0.15Ag_2O$..	39
29 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง $Y156 + 0.15Ag_2O$	40

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
30 กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag ₂ O ..	40
31 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag ₂ O	41
32 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งทุกสูตร	41
33 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123 ที่กำลังขยาย	
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	43
34 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y156 ที่กำลังขยาย	
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	44
35 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y156 + 0.05Ag ₂ O ที่กำลังขยาย	
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	45
36 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y156 + 0.10Ag ₂ O ที่กำลังขยาย	
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	46
37 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y156 + 0.15Ag ₂ O ที่กำลังขยาย	
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	47
38 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y156 + 0.20Ag ₂ O ที่กำลังขยาย	
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	48
39 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่าง	49
40 กราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag ₂ O) กับค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c	51
41 กราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag ₂ O) กับแอนไอโซทรอปิก	51
42 กราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag ₂ O) กับขนาดแกน c/a	52
43 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของสารตัวอย่าง	53
44 กราฟระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับอัตราส่วน Cu ³⁺ /Cu ²⁺	57
45 กราฟระหว่างอุณหภูมิวิกฤตและเปอร์เซ็นต์ฟรอนท์ออกซิเจน	57
46 กราฟระหว่างอัตราส่วน Cu ³⁺ /Cu ²⁺ กับแอนไอโซทรอปิก	58
47 กราฟระหว่างอัตราส่วน Cu ³⁺ /Cu ²⁺ กับขนาดแกน c/a	58
48 ชุดการทดลองแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์	69
49 ภาพแสดงการหา T _c onset และ T _c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y123	
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA	72
50 ภาพแสดงการหา T _c onset และ T _c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156	
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA	74

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 51 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA 76
- 52 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA 78
- 53 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA 80
- 54 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag₂O
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA 82

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ ความน่าสนใจของตัวนำยวดยิ่งจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เนื่องจากจะไม่เกิดการสูญเสียพลังงาน โดยสามารถนำมาทำอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ เช่น ในด้านการขนส่งได้มีการใช้ตัวนำยวดยิ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการขับเคลื่อนรถไฟที่มีความเร็วสูง โดยอาศัยหลักการยกตัวลอยเหนือรางเนื่องจากสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ตัวนำยวดยิ่งยังได้ถูกนำมาใช้ในการทำแม่เหล็กความเข้มสูง ซึ่งให้ประโยชน์มากในวงการแพทย์ และยังเป็นส่วนประกอบในเครื่องเร่งอนุภาคที่ต้องการสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูง เนื่องจากตัวนำธรรมดาจะมีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน ทำให้ไม่สามารถทนกระแสไฟฟ้าสูง ๆ ได้ อย่างไรก็ตาม ตัวนำยวดยิ่งก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากจะต้องมีอุณหภูมิที่ต่ำ ทำให้ตัวนำยวดยิ่งยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไป

จากการศึกษาประวัติการค้นพบตัวนำยวดยิ่ง คาร์เมอร์ลิงก์ ออนเนส (Buckel. 1991: 3) นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ เป็นผู้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่ง ในปี ค.ศ. 1911 จากการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์ โดยใส่ปรอทลงในภาชนะรูปวงแหวนแล้วแช่ในฮีเลียมเหลว เมื่ออุณหภูมิของปรอทลดลงพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 4.2 เคลวิน เรียกสภาพดังกล่าวนี้ว่า “สภาพนำยวดยิ่ง” (Superconductivity) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งนี้ว่า “อุณหภูมิวิกฤต” (Critical temperature, T_c) ต่อมาในปี ค.ศ. 1913 คาร์เมอร์ลิงก์ ออนเนส ทำการทดลองที่ยืนยันได้ว่าสารตัวนำยวดยิ่งสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน โดยเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าต่ำกว่าค่าหนึ่ง ตัวนำยวดยิ่งจะยังคงสภาพนำยวดยิ่งได้ แต่ถ้าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าสูงกว่าค่านี้ วัสดุจะกลายเป็นตัวนำปกติทันที เรียกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้ว่า “ความหนาแน่นกระแสวิกฤต” (Critical current density, J_c) ในปี ค.ศ. 1933 ไมสเนอร์ และโอเชินเฟลด์ (Meissner; & Ochsenfeld. 1933: 787) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่ง คือ เมื่อตัวนำยวดยิ่งถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนสถานะอยู่ในสภาพนำยวดยิ่ง มีสมบัติเป็นแม่เหล็กไดอะที่สมบูรณ์ (Perfect diamagnetism) จากนั้นเมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไม่สามารถพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ แต่ถ้าตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะปกติ สนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ไมสเนอร์” (Meissner effect) โดยถ้าทำการทดลองโดยวางตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตไว้เหนือแท่งแม่เหล็ก ตัวนำยวดยิ่งจะลอยนิ่ง ๆ เนื่องจาก

แท่งแม่เหล็กได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์สำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำรถไฟฟ้ความเร็วสูงในปัจจุบัน

ถ้านับเวลาจนถึงปัจจุบันการค้นพบนี้มีอายุมากกว่า 100 ปี ซึ่งหลังจากการค้นพบในครั้งนั้น นักวิจัยหลายกลุ่มได้มีการค้นคว้าวิจัยหาตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่ ๆ ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น ในปี ค.ศ. 1986 เบทเนอร์ซและมุลเลอร์ (Bednorz; & Muller. 1986: 189) ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารกลุ่ม Ba-La-Cu-O โดยเตรียมสารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง (Solid state reaction) ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างแบบเพอร์โรฟสไกต์ และพบว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้มีอุณหภูมิวิกฤต 35 เคลวิน ในการค้นพบตัวนำยวดยิ่งในยุคแรก ๆ มีค่าอุณหภูมิวิกฤตค่อนข้างต่ำ จึงได้มีการแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งโดยพิจารณาจากอุณหภูมิวิกฤต โดยตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตไม่เกิน 35 เคลวิน เรียกว่า ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ (Low temperature superconductors) หรือตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional superconductors) และตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 35 เคลวิน เรียกว่า ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High temperature superconductors) ต่อมาในปี ค.ศ. 1987 วูและคณะ (Wu; et al. 1987: 908-910) ได้ทำการทดลอง พบว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Ba-La-Cu-O สามารถมีอุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นจาก 35 เคลวิน เป็น 50 เคลวิน ได้ เมื่อใส่ความดันเข้าไปในระบบ และยังพบอีกว่าอุณหภูมิวิกฤตสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 92 เคลวิน ได้ เมื่อแทนที่อะตอมแลนทานัม (La) ด้วยอิตเทรียม (Y) ซึ่งมีขนาดอะตอมเล็กกว่าแลนทานัม ได้สารสูตรใหม่เป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ หรือ Y123 ทำให้ได้ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวเป็นครั้งแรกและมีสารประกอบอีกหลายกลุ่มโดยมีระนาบของ CuO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้าง ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้มีทองแดง (Cu) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นในบางครั้งจึงถูกเรียกว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรท (Cuprate superconductors) เนื่องจากตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมีสมบัติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ง่ายกว่าตัวนำยวดยิ่งชนิดอื่น หลังจากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงในครั้งนี้นักวิจัยหลายกลุ่มจึงได้พยายามเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O สูตรอื่นอีกมากมาย

ในปี ค.ศ. 2010 อุดมสมุทรศิริชัยและคณะ (Udomsamuthirun; et al. 2010: 1377-1380) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O กลุ่มใหม่ คือ Y5-6-11 Y7-9-16 Y5-8-13 Y7-11-18 Y156 Y3-8-11 และ Y13-20-33 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ผลการวัดอุณหภูมิวิกฤต พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งที่เกิดจากความพร่องออกซิเจนของโครงสร้างของ Y123 หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2015 ไชยนอกและคณะ (Chainok; et al. 1998: 1-14) ได้ศึกษาสารกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ที่มี Y 1 อะตอม จำนวน 4 สูตร ได้แก่ $YBa_2Cu_3O_y$ (Y123) $YBa_3Cu_4O_y$ (Y134) $YBa_4Cu_5O_y$ (Y145) และ $YBa_5Cu_6O_y$ (Y156) โดยมีอุณหภูมิในกระบวนการเผาขึ้นรูปที่ 950 องศาเซลเซียส และ 980 องศาเซลเซียส พบว่ามีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ในช่วง 85-97 องศาเซลเซียส นอกจากจะมีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O

ขึ้นใหม่เพื่อเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตแล้ว นักวิจัยยังได้มีการทดลองเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O โดยการเจือสารอื่นเข้าไป เช่น เงิน เหล็ก ฟลูออรีน ไทเทเนียม เป็นต้น จากการศึกษาผลกระทบจากการเจือเงิน (Ag, Ag₂O, AgNO₃) ในตัวนำยวดยิ่ง Y123 (Shao; et al. 1989: 1369-1373) พบว่าการเจือเงินไม่ทำให้โครงสร้างจุลภาคของตัวนำยวดยิ่ง Y123 เปลี่ยนแปลงไป แต่เงินที่เจือเข้าไปจะแทรกตัวเข้าไปรูพรุนของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีความราบเรียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่ง Y134 และ Y145 ที่เจือด้วยเงิน (Ag₂O) พบว่าการเจือเงินในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงขึ้น และพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีรูพรุนน้อยลง อย่างไรก็ตาม การเลือกสารที่ใช้เจือในตัวนำยวดยิ่งนั้นมีความจำกัด เนื่องจากสารบางสารที่เจือเข้าไปไม่ได้ทำให้สมบัติของตัวนำยวดยิ่งดีขึ้นและยังทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงอีกด้วย จากการศึกษาผลกระทบจากการเจือไทเทเนียม (TiO₂) ที่มีต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของตัวนำยวดยิ่ง Y123 (Sahoo; & Behera. 2014: 83-93) โดยวิเคราะห์จากตัวนำยวดยิ่ง YBa₂(Cu_{1-x}Ti_x)₃O_{7-y} เมื่อ x = 0.01, 0.02, 0.04, 0.05 ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง พบว่า การเจือตัวนำยวดยิ่งด้วยไทเทเนียมทำให้ขนาดของเกรนเล็กลง 0.04% นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณออกซิเจนที่ลดลง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงด้วย แสดงว่าปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของตัวนำยวดยิ่ง Y123

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิวิกฤต โดยที่ปริมาณออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากปริมาณ Cu²⁺ และ Cu³⁺ ในตัวนำยวดยิ่ง จึงได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง จากการหาเปอร์เซ็นต์พร่องออกซิเจนในโครงสร้างจากปริมาณทองแดงของตัวนำยวดยิ่ง Y123 (YBa₂Cu_{2x}Cu_{3-2x}O_{6.5+x}) (Choy; et al. 2016: 57-60) พบว่าสารที่มีอุณหภูมิวิกฤต onset (T_c onset) สูง จะมีอัตราส่วน Cu³⁺/Cu²⁺ สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วน Cu³⁺/Cu²⁺ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการกระบวนการอบอ่อน ในทำนองเดียวกันเมื่อหาปริมาณของ Cu²⁺ และ Cu³⁺ ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 และ Y145 ที่เจือด้วยเงิน (Ag₂O) (Supadanaison; et al. 2017) พบว่าตัวนำยวดยิ่งที่มีปริมาณ Cu³⁺/Cu²⁺ สูง จะมีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นเดียวกัน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน Cu³⁺/Cu²⁺ ที่มีต่ออุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วยเงิน (Ag₂O) โดยใช้วิธีไอโอดิเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration) ในการหาปริมาณ Cu³⁺ และ Cu²⁺ จากนั้นคำนวณหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ดังนี้ อุณหภูมิวิกฤตด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว (Four-point probe) ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่งด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX)

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง (Solid state reaction)
2. เพื่อศึกษาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration)
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ดังนี้
 - 3.1 อุณหภูมิวิกฤตด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว (Four-point probe)
 - 3.2 ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
 - 3.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
 - 3.4 ปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX)

ความสำคัญของการวิจัย

ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาตัวนำยวดยิ่งสูตรอื่นที่มี Y-Ba-Cu-O เป็นองค์ประกอบได้ นอกจากนี้ถ้าพบเงื่อนไขที่ทำให้อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งสูงขึ้น จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงประยุกต์ได้

ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง (Solid state reaction)
2. ศึกษาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration)
3. วัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ดังนี้
 - 3.1 อุณหภูมิวิกฤตด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว (Four-point probe)
 - 3.2 ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
 - 3.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
 - 3.4 ปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX)

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. **ปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง (Solid state reaction)** หมายถึง วิธีการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิห้อง วิธีการทำต้องนำสารตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการทางความร้อนเพื่อให้สารทำปฏิกิริยากันจนเกิดโครงสร้างผลึก

2. **กระบวนการเผาผง (Calcination)** หมายถึง กระบวนการให้ความร้อนในบรรยากาศของอากาศปกติหรือออกซิเจน เพื่อให้สารเกิดการยึดเกาะกันของโครงสร้าง และเพื่อไล่องค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ไม่ต้องการออกไป

3. **กระบวนการเผาขึ้นรูป (Sintering)** หมายถึง กระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุ เพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้นโดยวัสดุไม่มีการหลอม

4. **กระบวนการอบอ่อน (Annealing)** หมายถึง กระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุ เพื่อกระตุ้นให้เกิดสมบัติทางฟิสิกส์หรือสมบัติทางเคมีพร้อมในการใช้งาน การให้ความร้อนมักจะทำให้ที่อุณหภูมิสูงไม่มาก แต่สูงกว่าจุดวิกฤตค่าหนึ่ง สารที่ได้จะมีสมบัติที่พร้อมใช้งานมากขึ้น เช่น มีผลึกที่ชัดเจน หรือมีความเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น

5. **ไอโอดิเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration)** หมายถึง การไทเทรตปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยจะไทเทรตสารละลายไอโอดีนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอื่นอีกทีหนึ่ง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโอดีน (I^-) กับไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) ในสารละลายที่เป็นกรด จะเกิดไอโอดีน แล้วจึงไทเทรตไอโอดีนที่เกิดขึ้นด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) วิธีนี้จะทำให้ทราบปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในสารละลาย แล้วคำนวณหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างของตัวนำเวดถึง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

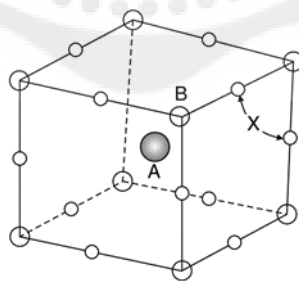
1. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง Y-Ba-Cu-O
2. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O เจือด้วยเงิน
3. การหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน
4. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง

1. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง Y-Ba-Cu-O

1.1 การเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123)

ตัวนำยวดยิ่ง Y123 หรือ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ เป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงที่ค้นพบในปี ค.ศ. 1987 โดย Wu และคณะ (Wu; et al. 1987: 908-910) ซึ่งเตรียมสารโดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง เป็นสารกลุ่มเซรามิกที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงที่สุดเท่ากับ 92 เคลวิน มีสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

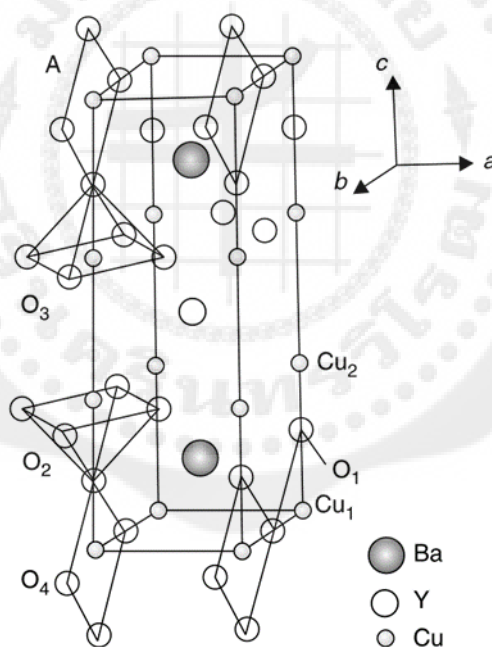
โครงสร้างพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่ง Y123 เป็นโครงสร้างแบบเพอร์โรฟสไกต์ (Perovskite) 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่มีสูตรโครงสร้างเป็น ABX_3 ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของโลหะ A อยู่ตรงกลางกล่อง อะตอมของโลหะ B ที่มีขนาดเล็กกว่าอยู่ที่มุมกล่อง และอะตอมของโลหะ x อยู่ตรงกลางเส้นกล่องทั้ง 12 ด้าน ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์โรฟสไกต์ ABX_3

ที่มา: Saxena, A. K. (1991). *High-Temperature Superconductors*. p. 42.

โครงสร้างพื้นฐานของสารตัวนำยวดยิ่ง Y123 เป็นโครงสร้างผลึกแบบออโทรมบิก เพอร์โรฟสไกต์ 3 ชั้น ประกอบด้วยแบเรียม อิตเทรียม และแบเรียมอยู่ตรงกลางกล่องตามลำดับ มีทองแดงอยู่ที่มุมกล่อง และออกซิเจนอยู่ตรงกลางสันกล่อง ดังภาพประกอบ 2 ใน 1 หน่วยเซลล์ ประกอบด้วยอะตอมของอิตเทรียม 1 อะตอม อะตอมของแบเรียม 2 อะตอม อะตอมของทองแดง และอะตอมออกซิเจน ซึ่งปริมาณออกซิเจนเป็นส่วนสำคัญต่อสภาพการนำยวดยิ่ง สูตรทั่วไปของ Y123 คือ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ โดยที่ $0 \leq x \leq 1$ สำหรับ $x = 0$ สารจะมีโครงสร้างผลึกแบบออโทรมบิก และอยู่ในสภาพนำยวดยิ่ง สำหรับ $x \geq 0.6$ สารจะเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบออโทรมบิกไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนอล และจะสูญเสียสภาพการนำยวดยิ่งไปเมื่อ $x = 1$ นอกจากนี้ยังพบว่าออกซิเจนที่เข้าไปอยู่ในโครงสร้างจะไปสร้างพันธะกับทองแดงในโครงสร้างจนเกิดสายโซ่ของ Cu-O 1 เส้น และมีชั้นของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO_2) 2 ชั้น ซึ่งระหว่างชั้นของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO_2) มีอะตอมของอิตเทรียมและแบเรียมอยู่สลับกัน ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้น การนำไฟฟ้าของสารกลุ่มนี้จะเกิดขึ้นได้ในชั้นคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO_2) การเพิ่มจำนวนชั้นของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO_2) จึงเป็นสมมติฐานที่สำคัญในการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ แบบออโทรมบิก

ที่มา: Saxena, A. K. (1991). *High-Temperature Superconductors*. p. 42.

เนื่องจากสาร Y123 เป็นเซรามิก ดังนั้น จึงมีรูปแบบการเตรียมสารเช่นเดียวกับสารเซรามิกทั่วไป แต่มีรายละเอียดบางส่วนที่แตกต่างออกไป เพื่อให้เกิดสมบัติเฉพาะของสารกลุ่มนี้ โดยจะมีกระบวนการให้ความร้อนที่สำคัญอยู่ 3 กระบวนการ (Bolat; & Kutuk. 2012: 731-738) คือ

- 1) การแคลซิเนชัน (Calcination) เป็นขั้นตอนการเผาผงเพื่อให้สารเกิดการยึดเกาะกันของโครงสร้างและเพื่อไล่องค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ไม่ต้องการออกไป ในกรณีสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O การให้ความร้อนในกระบวนการนี้จะทำให้สาร ตั้งต้นเกิดการรวมตัวและเกิดโครงสร้างเป็นสารประกอบ โดยอุณหภูมิในการเผายู่ระหว่าง 800-1,100 องศาเซลเซียส
- 2) การซินเตอร์ริง (Sintering) เป็นขั้นตอนการเผาขึ้นรูป โดยเริ่มจากการอัดเม็ดแล้วเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้สารเกิดการยึดเกาะกันเป็นโครงสร้างสารประกอบที่แข็งแรงสำหรับสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O จะใช้อุณหภูมิระหว่าง 800-1,100 องศาเซลเซียส และใช้เวลาตั้งแต่ 24 ชั่วโมง เป็นต้นไป
- 3) การอบอ่อน (Annealing) เป็นช่วงที่มีการคายและเติมออกซิเจนบางส่วนเข้าหรือออกจากโครงสร้างของสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 400-500 องศาเซลเซียส

เนื่องจากตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O เป็นตัวนำยวดยิ่งกลุ่มแรก ๆ ที่ถูกค้นพบขึ้น จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้เผยแพร่วิธีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกศึกษาการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มดังกล่าวของบางกลุ่มวิจัย ดังนี้

ในปี ค.ศ. 2007 จูติพงษ์ เครือพงษ์ (จูติพงษ์ เครือพงษ์. 2007: 32-36) ได้เตรียมและศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O โดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง มีสาร ตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ในการคำนวณสัดส่วนของสารตั้งต้นจากปฏิกิริยาทางเคมีของสาร Y_{123} มีสมการเคมี ดังนี้



ผสมสารตั้งต้นทั้งสามให้เข้ากันในครกอะลูมินา จะได้สารที่มีสีเทาและมีเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเผา 2 กระบวนการ ดังนี้

1) กระบวนการเผาผง (Calcination) นำสารตั้งต้นที่ผสมเข้ากันแล้วเข้าสู่เตาเผา เริ่มต้นกระบวนการเผาผงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเผาผงครั้งที่ 1 จะได้สารที่มีสีดำ จับตัวกันเป็นก้อนแข็ง หลังจากนั้นนำสารที่ได้ไปบดในครกอะลูมินาให้ละเอียด แล้วนำเข้าสู่วัฏฏะกระบวนการเผาผงอีกครั้ง

2) กระบวนการเผาขึ้นรูป (Sintering) นำสารที่ได้จากการเผาผงครั้งที่ 2 ไปบดให้ละเอียด แล้วนำสารที่ผ่านการบดไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก จะได้สารที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมสีดำ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร จากนั้นเริ่มต้นกระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

จนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้ 18 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 0.7 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 3.3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สารที่เตรียมได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมสีดำ จากนั้นศึกษาสมบัติสภาพนำยวดยิ่งของสารตัวอย่าง พบว่าสารที่ได้มีสูตรเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$ และมีอุณหภูมิวิกฤต 90 เคลวิน

ในปี ค.ศ. 2014 ปิยะมาศ ไชนนอก (ปิยะมาศ ไชนนอก. 2014: 31-38) ได้เตรียมสารกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ที่มี Y 1 อะตอม จำนวน 4 สูตร ได้แก่ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123) $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ (Y134) $\text{YBa}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$ (Y145) และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ (Y156) มีสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยมีสัดส่วนของอิตเทรียม แบเรียม และคอปเปอร์จากสมการทางเคมี ได้อัตราส่วน ดังนี้ 1:2:3 1:3:4 1:4:5 และ 1:5:6 จำนวน 2 ชุด แล้วทำการสังเคราะห์สารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง เริ่มจากคลุกเคล้าส่วนผสมเข้าด้วยกัน แล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อน คือ กระบวนการเผาผง 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่ได้จากการเผาผงครั้งที่สองไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำสารเข้าสู่กระบวนการเผาขึ้นรูป โดยชุดที่ 1 เผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (S950) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชุดที่ 2 เผาที่อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส (S980) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และให้สารทั้งสองชุดอยู่ในกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่ผ่านกระบวนการเผาขึ้นรูปมาทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ พบว่า สารตัวนำยวดยิ่ง Y123 S950 เป็นสารตัวนำยวดยิ่งที่มีสมบัติดีที่สุด คือ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) 97 เคลวิน จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารนำยวดยิ่งมีค่า 89.14 % และอุณหภูมิเพอร์ริเทคติก 947 องศาเซลเซียส

1.2 การเตรียมตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ (Y156)

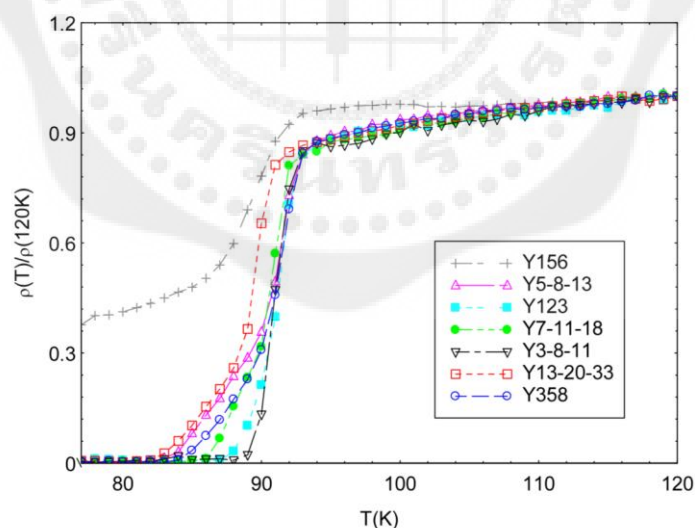
จากสมมติฐานที่ว่า การเพิ่มจำนวนชั้นหรือระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO_2) เป็นเงื่อนไขสำคัญในการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤต ดังนั้น จึงมีความพยายามในการเพิ่มจำนวนระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO_2) ให้มีค่ามากกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 ซึ่งก็หมายความว่า เป็นการเพิ่มความยาวของแกน c ในโครงสร้างผลึกของสารไปในตัวด้วย (พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย. 2016: 95)

ในปี ค.ศ. 2010 อุดมสมุทรศิริชัยและคณะ (Udomsamuthirun; et al. 2010: 1377-1380) ได้ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ที่มีการค้นพบแล้ว คือ Y123 Y124 Y247 และ Y358 พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y358 มีสมบัติและโครงสร้างผลึกที่สอดคล้องกันในหลายประเด็น กล่าวคือ Y358 มีค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c ยาวกว่าแกน c ของ Y123 เกือบ 3 เท่า ซึ่งใน 1 หน่วยเซลล์ของ Y123 ประกอบด้วยระนาบของคอปเปอร์อยู่ 2 ระนาบ และมีพันธะของ Cu-O อยู่ 1 พันธะ และ Y358 มีระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์อยู่ 5 ระนาบ และมีพันธะของ Cu-O อยู่ 3 พันธะ อีกทั้งในตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y358 ยังมีจำนวนอะตอมของอิตเทรียม (Y) รวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียม (Ba) เท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง (Cu)

จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวมาตั้งเป็นสมมติฐานในการทดลองและเตรียมตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่ในกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ดังนี้

- 1) จำนวนพันธะของ Cu-O มีความสัมพันธ์กับจำนวนอะตอมของอิตเทรียม
- 2) จำนวนระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์มีความสัมพันธ์กับจำนวนอะตอมของแบเรียม
- 3) จำนวนอะตอมของอิตเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียม จะมีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์

อุดมสมุทหิรัญและคณะ จึงได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O กลุ่มใหม่ คือ Y5-6-11 Y7-9-16 Y5-8-13 Y7-11-18 Y156 Y3-8-11 และ Y13-20-33 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เริ่มจากผสมสารตั้งต้นตามสัดส่วน จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเผาผงที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงเหลือ 100 องศาเซลเซียส นำสารออกมาบดให้ละเอียด แล้วนำเข้าสู่กระบวนการเผาผงอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นนำสารที่ได้จากการเผาผงไปอัดเป็นแผ่นกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ด้วยแรงอัด 2,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) แล้วนำสารเข้าสู่กระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบด้วยออกซิเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการวัดอุณหภูมิวิกฤต แสดงดังภาพประกอบ 3 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งที่เกิดจากความพร่องออกซิเจนของโครงสร้างของ Y123



ภาพประกอบ 3 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O กลุ่มใหม่

ที่มา: Udomsamuthirun, P.; et al. (2010). The New Superconductors of YBaCuO Materials. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2010(23): 1378.

ในปี ค.ศ. 2015 ไชยนอกและคณะ (Chainok; et al. 1998: 1-14) ได้เตรียมสารกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ที่มี Y 1 อะตอม จำนวน 4 สูตร ได้แก่ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123) $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ (Y134) $\text{YBa}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$ (Y145) และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ (Y156) ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จำนวน 2 ชุด โดยเผาผงที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำสารเข้าสู่วิธีการเผาขึ้นรูป โดยชุดที่ 1 เผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ชุดที่ 2 เผาที่อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากการศึกษาสมบัติของตัวนำยวดยิ่งเหล่านี้ พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 Y134 Y145 และ Y156 มีอุณหภูมิวิกฤต onset (T_c onset) 97 เคลวิน 93 เคลวิน 91 เคลวิน และ 85 เคลวิน ตามลำดับ ปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ กับปริมาณออกซิเจน คือ 0.28 กับ 6.83 0.19 กับ 8.81 0.13 กับ 10.79 และ 0.16 กับ 12.92 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิวิกฤตมีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์พร่องออกซิเจนในโครงสร้าง กล่าวคือ ค่าเปอร์เซ็นต์พร่องออกซิเจนมาก จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการเผาขึ้นรูป จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าลดลง

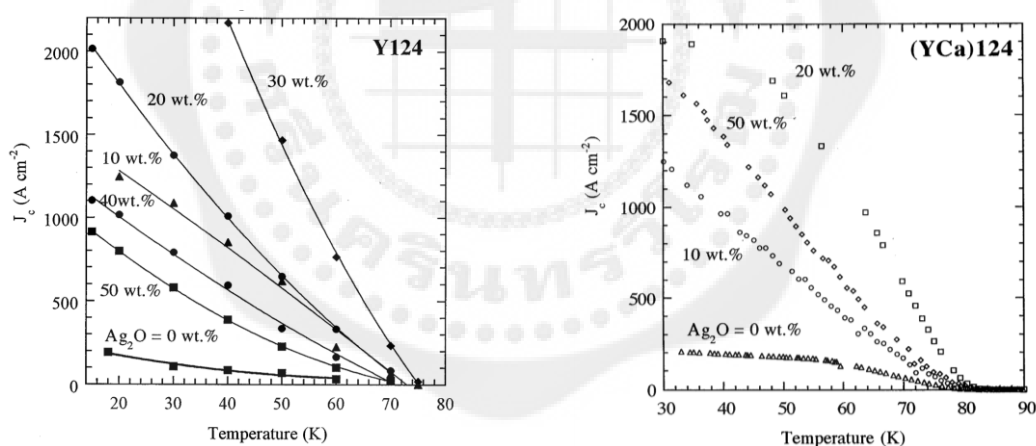
2. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O เจือด้วยเงิน

เพื่อให้ตัวนำยวดยิ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น นักวิจัยจึงมีความพยายามในการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤต และปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O นอกจากจะมีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ขึ้นใหม่แล้ว ยังมีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งโดยการเจือสารอื่นเข้าไป เช่น การเจือไทเทเนียม (TiO_2) เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของทองแดงในตัวนำยวดยิ่ง Y123 (Sahoo; & Behera. 2014: 83-93) พบว่าขนาดของเกรนเล็กลง และส่งผลให้อุณหภูมิวิกฤตลดลง การเจือแคลเซียม (CaCO_3) เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอิตเทรียมในตัวนำยวดยิ่ง Y123 (Stoyanova-Ivanova; et al. 2006: 25-28) พบว่าทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลง และการเจือพลวง (Sb_2O_3) เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอิตเทรียมและทองแดงในตัวนำยวดยิ่ง Y123 (Akyuz; et al. 2011: 2189-2201) ทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่าการเลือกสารที่ใส่เจือในตัวนำยวดยิ่งนั้นมีข้อจำกัด เนื่องจากสารบางสารที่เจือเข้าไปไม่ได้ทำให้สมบัติของตัวนำยวดยิ่งดีขึ้นและยังทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O เจือด้วยเงิน พบว่าการเจือเงินจะปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง ทำให้ตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตและความหนาแน่นกระแสวิกฤตสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นการเจือด้วยเงินจะเพิ่มขนาดของเกรน และทำให้สารเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วยเงินด้วยวิธีที่หลากหลาย เช่น วิธีทางเคมีไฟฟ้า การผสมผงโลหะซิลเวอร์ (Ag) หรือผงซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) ลงในตัวนำยวดยิ่ง Y123 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Azambuja; et al. 2009: 638-644) ผลจากการศึกษาพบว่าอะตอมของเงินจะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของทองแดงในระนาบ $\text{CuO}(1)$ ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 เนื่องจากอะตอมเงินและ

ทองแดงเป็นธาตุกลุ่มเดียวกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของตัวนำยวดยิ่ง Y123 แต่บางงานวิจัยรายงานผลการศึกษาค่าตำแหน่งของทองแดงไม่ได้ถูกแทนที่โดยอะตอมเงิน แต่อนุภาคเงินจะเข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวนำยวดยิ่ง

ในปี ค.ศ. 1998 แซงและคณะ (Zheng; et al. 1998: 1213-1219) ได้ศึกษาตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ และ $\text{Y}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แบเรียมไนเตรด ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) คอปเปอร์ไอโอไดต์ (CuI) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) โดยเผาผงที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำสารออกมาบดให้ละเอียดแล้วอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยม แล้วนำสารไปเผาขึ้นรูป ผลการวัดสมบัติทางฟิสิกส์พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y124 และ (YCa)124 มีอุณหภูมิวิกฤต onset (T_c onset) 82 และ 90 เคลวิน ตามลำดับ เมื่อตัวนำยวดยิ่งมีการเจือเงิน (Ag_2O) ปริมาณมากขึ้น จะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง และพบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y124 และ (YCa)124 บริสุทธิ์ มีรูพรุนที่ทำให้พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งไม่ราบเรียบ ซึ่งอาจส่งผลให้กระแสที่ไหลบริเวณผิวตัวนำยวดยิ่งนั้นไม่ต่อเนื่อง ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตที่ได้มีค่าต่ำ จากนั้นเมื่อทำการเจือตัวนำยวดยิ่ง Y124 และ (YCa)124 ด้วยเงิน (Ag_2O) พบว่า ปริมาณรูพรุนลดลงทำให้พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีความราบเรียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตมีค่ามากขึ้น

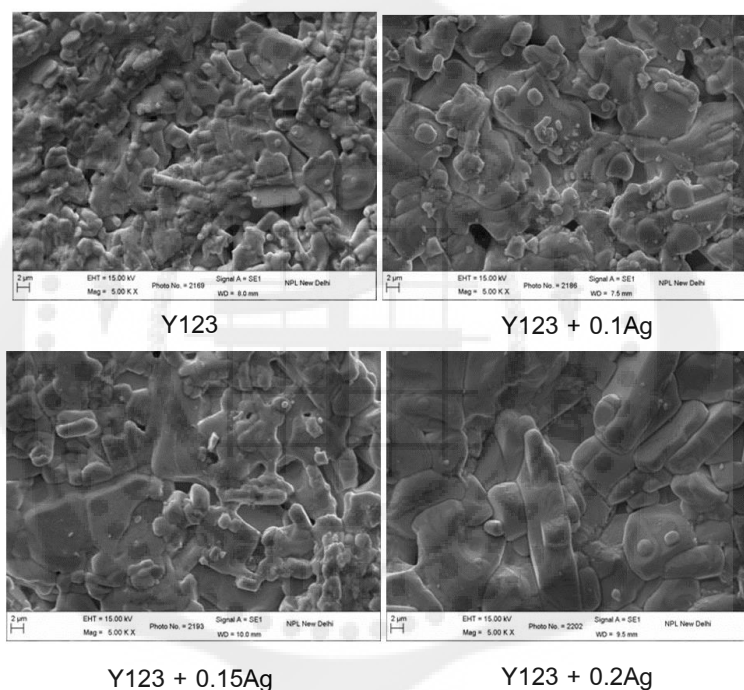


ภาพประกอบ 4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตกับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y124 และ (YCa)124

ที่มา: Zheng, X. G.; et al. (1998). Superconducting Properties of Silver-Doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ and $\text{Y}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$. *Materials Research Bulletin*. 33: 1216.

ในปี ค.ศ. 2013 รานี จา และอะวานา (Rani; Jha; & Awana. 2013: 2347-2352) ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเจือเงิน (Ag_2O) ในตัวนำยวดยิ่ง Y123 โดยวิเคราะห์จากตัวนำยวดยิ่ง

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + \text{Ag}_x$ เมื่อ $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ผสมสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) แล้วนำไปเผาผงที่อุณหภูมิ 870 890 และ 910 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำสารออกมาบดให้ละเอียดแล้วอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยม แล้วเผาขึ้นรูปในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง อบอ่อนด้วยออกซิเจนที่อุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส 600 องศาเซลเซียส และ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำสารมาทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ พบว่า เมื่อมีการเจือเงินในตัวนำยวดยิ่ง จะทำให้จำนวนเกรนในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดแคบลง และขนาดของเกรนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123 และ Y123 เจือด้วยเงิน

ที่มา: Rani, P.; Jha, R.; & Awana, V.P.S. (2013). AC Susceptibility Study of Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}\text{Ag}_x$ Bulk Composites ($x = 0.0-0.20$): The Role of Intra and Intergranular Coupling. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 26: 2347-2352.

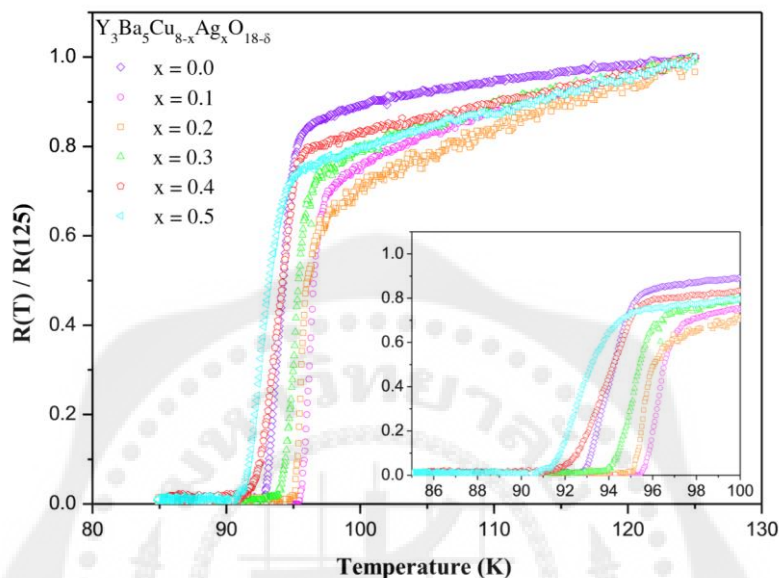
ในปี ค.ศ. 2016 ศรีพาวาทกุลและคณะ (Sripawatakul; et al. 2016: 46-50) ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิวิกฤตของ Y134 เมื่อเพิ่มปริมาณ Ag_2O โดยวิเคราะห์จากตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{Ag}_x\text{O}_{9.6}$

เมื่อ $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง มีสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) เริ่มจากผสมสารตั้งต้นโดยมีสัดส่วนของอิตเทรียม แบเรียม คอปเปอร์ และเงินจากสมการทางเคมี ได้อัตราส่วน ดังนี้ $1:3:4:0$ $1:3:4:0.05$ $1:3:4:0.10$ $1:3:4:0.15$ แล้วบดสารตั้งต้นให้ละเอียดในครกอะลูมินา จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเผาผงที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเผาผงให้นำสารออกมาบดอีกครั้งหนึ่งแล้วนำไปอัดเป็นแผ่นกลม นำสารที่ถูกอัดเป็นแผ่นกลมไปเผาขึ้นรูปในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารที่เสร็จสิ้นกระบวนการเผามาทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง $YBa_3Cu_4Ag_xO_{9.6}$ เมื่อ $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) 95 เคลวิน 92 เคลวิน 97 เคลวิน และ 92 เคลวิน ตามลำดับ โดยตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) สูงสุด คือ $Y134 + 0.1Ag$ จะเห็นได้ว่าการเจือเงินในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงขึ้น และจากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง $Y134$ บริสุทธิ์ มีรูพรุนจำนวนมาก แต่เมื่อมีการเจือด้วยเงิน จะทำให้พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีรูพรุนน้อยลง

ในปี ค.ศ. 2016 ปานกลางและคณะ (Panklang; et al. 2016: 57-60) ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่ง $Y145$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) โดยวิเคราะห์จากตัวนำยวดยิ่ง $YBa_4Cu_5Ag_xO_{11.6}$ เมื่อ $x = 0, 0.05, 0.10$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง มีสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) โดยใช้อุณหภูมิในการเผาผงและเผาขึ้นรูปในบรรยากาศ 920 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการอบอ่อน 550 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารที่เสร็จสิ้นกระบวนการเผามาทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง $YBa_4Cu_5Ag_xO_{9.6}$ เมื่อ $x = 0, 0.05, 0.10$ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) 95 เคลวิน 96 เคลวิน และ 96 เคลวิน ตามลำดับ โดยตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) สูงสุด คือ $Y145 + 0.1Ag$ และจากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง $Y145$ บริสุทธิ์ มีรูพรุนจำนวนมาก แต่เมื่อมีการเจือด้วยเงิน จะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีรูพรุนน้อยลง

ในปี ค.ศ. 2016 เมทิน และเทเป (Metin; & Tepe. 2016: 1083-1087) ได้ศึกษาโครงสร้างและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่ง $Y358$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) โดยวิเคราะห์จากตัวนำยวดยิ่ง $Y_3Ba_5Cu_{8-x}Ag_xO_{18.6}$ เมื่อ $x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง มีสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) เริ่มจากผสมสารตั้งต้นแล้วบดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเผาผงในบรรยากาศ 2 รอบ ที่อุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารที่ได้จากการเผาผงไปอัดเป็นแผ่นกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ด้วยแรงอัด 400 เมกะปาสคาล (MPa) ขั้นตอนสุดท้ายนำไปเผาขึ้นรูปในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 970 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 50 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการวัดอุณหภูมิวิกฤต พบว่า Y358 + 0.1Ag มีอุณหภูมิวิกฤต onset ($T_{c\text{ onset}}$) สูงสุด เท่ากับ 97.4 เคลวิน แต่เมื่อมีการเจือเงินปริมาณมากกว่า 0.3 จะทำให้อุณหภูมิวิกฤต onset ($T_{c\text{ onset}}$) ลดลงเหลือ 95.6 เคลวิน ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y358 ที่เจือด้วยเงิน

ที่มา: Metin, T.; & Tepe, M. (2016). The Effect of Ag Doping on the Superconducting Properties of $Y_3Ba_5Cu_{8-x}Ag_xO_{18.6}$ Ceramics. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 30: 1083-1087.

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O เจือด้วยเงิน พบว่าการเจือด้วยเงิน จะทำให้อนุภาคเงินแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนของโครงสร้าง เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีความราบเรียบมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเจือเงินในปริมาณที่เหมาะสม ในตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงขึ้น

3. การหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

ในกระบวนการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุ เพื่อกระตุ้นให้เกิดสมบัติทางฟิสิกส์หรือสมบัติทางเคมีพร้อมในการใช้งาน จะเป็นช่วงที่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในโครงสร้างของสารประกอบ Y-Ba-Cu-O จากการศึกษามาจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ของตัวนำ

ยวดยิ่ง Y123 (Dong Han Ha; et al. 2001: 1041-1045) พบว่าตัวนำยวดยิ่งเริ่มมีการสูญเสีย น้ำหนัก เนื่องจากการสูญเสียออกซิเจนจากพันธะ Cu-O ที่อุณหภูมิประมาณ 370 องศาเซลเซียส และมีการสูญเสียน้ำหนักจากการสูญเสียออกซิเจนมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 480 องศาเซลเซียส และน้ำหนักเหลือ 99% ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส แสดงว่า ออกซิเจนจากพันธะ Cu-O สามารถหลุดออกมาได้ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 370 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เกิดการพร่องออกซิเจนในโครงสร้าง (Oxygen-deficiency) ที่ทำให้เกิดคอปเปอร์ได้ 2 แบบ คือ Cu^{2+} และ Cu^{3+} โดยที่ Cu^{2+} สามารถเกิดแชนเทลเลอร์โพลาไรซันได้ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเกิดสภาพนำยวดยิ่งในตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ จึงได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งสามารถหาปริมาณออกซิเจนได้จากปริมาณ Cu^{2+} และ Cu^{3+} ในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง โดยใช้วิธีไอโอดิเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration) ในการหาปริมาณ Cu^{2+} และ Cu^{3+}

ในปี ค.ศ. 1988 ชอยและคณะ (Choy; et al. 2016: 57-60) หาเปอร์เซ็นต์พร่องออกซิเจนในโครงสร้างจากปริมาณทองแดง โดยใช้วิธีไอโอดิเมตริกไทเทรชัน พบว่าสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) สูง จะมีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการกระบวนการอบอ่อน และมีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนในตัวนำยวดยิ่ง Y123 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_{2x}\text{Cu}_{3-2x}\text{O}_{6.5+x}$) กับอุณหภูมิวิกฤตที่ $x = 0.23$ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) 60 เคลวิน ที่ $x = 0.35$ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต (T_c onset) 90 เคลวิน

ในปี ค.ศ. 2014 ปิยะมาศ ไชยนอก (ปิยะมาศ ไชยนอก. 2014: 85) ได้ศึกษาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง ด้วยวิธีไอโอดิเมตริกไทเทรชัน โดยใช้สารตัวอย่างกลุ่ม Y123 ประกอบด้วย $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y-x}\text{F}_x$ โดยที่ $x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.5$ และ 1.0 ในกลุ่มนี้ $y = 7 - z$ และสารตัวอย่างกลุ่ม Y134 ประกอบด้วย $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_{y-x}\text{F}_x$ โดยที่ $x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.5$ และ 1.0 ในกลุ่มนี้ $y = 9 - z$ จากการเตรียมสาร สารทุกตัวใช้อุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนเท่ากัน พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ ในตัวนำยวดยิ่ง Y123 (0.1F, 0.2F, 0.5F และ 1.0F) ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิวิกฤต แต่ในตัวนำยวดยิ่ง Y134 (0.1F, 0.2F และ 0.5F) ทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น ซึ่งในกลุ่มตัวนำยวดยิ่ง Y123 (0.1F, 0.2F, 0.5F และ 1.0F) ที่ไม่ทำให้อุณหภูมิวิกฤตเปลี่ยนแปลง อาจเป็นผลมาจากการเจือฟลูออรีนเข้าไปแทนที่ออกซิเจน และเมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนตามสูตรเคมีพบว่าการเจือฟลูออรีนทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง

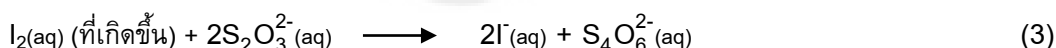
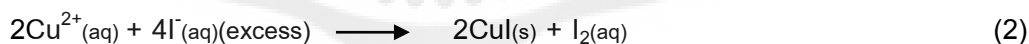
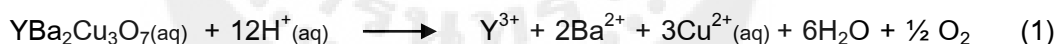
ในปี ค.ศ. 2017 สุภตนิยสรและคณะ (Supadanaison; et al. 2017: 51-55) หาปริมาณของ Cu^{2+} และ Cu^{3+} ด้วยวิธีไอโอดิเมตริกไทเทรชันของตัวนำยวดยิ่ง Y134 และ Y145 ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง โดยวิเคราะห์จากตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{Ag}_x\text{O}_{9.6}$ และ $\text{YBa}_4\text{Cu}_5\text{Ag}_x\text{O}_{11.6}$ ซึ่ง $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ พบว่า ในกลุ่มตัวนำยวดยิ่ง Y134 ตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y134} + 0.1\text{Ag}$ มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุด คือ 97 เคลวิน และ Y134 มีอุณหภูมิ

วิกฤตต่ำสุด คือ 91 เคลวิน ส่วนในกลุ่มตัวนำยวดยิ่ง Y145 ตัวนำยวดยิ่ง Y145 + 0.1Ag มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุด คือ 96 เคลวิน และ Y145 มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำสุด คือ 95 เคลวิน นอกจากนี้ยังพบว่า พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 และ Y145 มีรูพรุนน้อยลงเมื่อมีการเจือเงินเข้าไป สำหรับการศึกษาปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ ในโครงสร้าง ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่มีปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ สูง คือ Y134 + 0.15Ag และ Y134 + 0.10Ag มีค่า 0.15 และ 0.14 ตามลำดับ ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y145 ที่มีปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ สูง คือ Y145 + 0.10Ag มีค่า 0.10 จะเห็นได้ว่า ตัวนำยวดยิ่งที่มีปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ สูง จะมีอุณหภูมิวิกฤตสูงด้วย

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะใช้วิธีไอโอดิเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration) ในการหาปริมาณออกซิเจน วิธีนี้จะหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างจากการหาปริมาณทองแดงโดยการไทเทรต ซึ่งใช้เทคนิคไอโอดิเมทรี (Iodometry) หรือไอโอดิเมตริกไทเทรชัน (Iodometric titration) เทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณสารตัวอย่าง โดยนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีไอโอดัดไอออน (I^-) ที่มากเกินไป จะทำให้เกิดไอโอดีน (I_2) ซึ่งไอโอดีนที่เกิดขึ้นนี้สามารถหาปริมาณได้จากการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) และสังเกตจุดยุติจากสีน้ำเงินที่จางหายไป ยกตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ หรือ Y123 แบ่งการวิเคราะห์จากการไทเทรตเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) วิเคราะห์จากการไทเทรตครั้งที่ 1

การไทเทรตครั้งที่ 1 เป็นการหาปริมาณของ Cu^{2+} ต่อ Cu^{3+} โดยการแปลง Cu^{3+} ให้เปลี่ยนเป็น Cu^{2+} ทั้งหมดแล้ว ไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) จะทำปฏิกิริยากับไอโอดัด (I^-) ในสารละลายที่เป็นกรด จากนั้นจะเกิดไอโอดีน (I_2) แล้วจึงไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) โดยการไทเทรตครั้งที่ 1 มีการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



จากสมการ (2) ไอโอดัด (I^-) จากการเติมโพแทสเซียมไอโอดัด (KI) มากเกินไป จะรีดิวซ์สารที่เป็นตัวออกซิไดส์ในตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) ทำให้เกิดไอโอดีน (I_2) ขึ้นมา จากปริมาณของไอโอดีน (I_2) ที่เกิดขึ้น จะทำให้สามารถหาปริมาณของทองแดงในตัวอย่างได้ โดยไทเทรตไอโอดีน (I_2) กับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ดังสมการ (3) ซึ่งจำนวนโมลของโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ที่ใช้ในการไทเทรต มีค่าเท่ากับจำนวนโมลรวมของ Cu^{2+} และ Cu^{3+} จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของไอโอดีน (I_2) ที่ได้จากการไทเทรตและปริมาณของทองแดง ดังนี้

$$2n_{\text{A}}(\text{I}_2) = n_{\text{A}}(\text{Cu}_{\text{total}}) = n_{\text{A}}(\text{Cu}^{2+}) + n_{\text{A}}(\text{Cu}^{3+}) \quad (4)$$

เมื่อ $n_A(X)$ คือ จำนวนโมลของปริมาณ X ใด ๆ ในการไทเทรตครั้งที่ 1 จากนั้นนำมวลของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่ใช้ในการไทเทรตครั้งที่ 1 (m_A) มาหารสมการ (4)

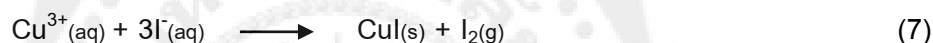
$$2n_A(I_2)/m_A = n_A(Cu_{total})/m_A = [n_A(Cu^{2+}) + n_A(Cu^{3+})]/m_A \quad (5)$$

$$2n_A(I_2)/m_A = n(Cu_{total}) = n(Cu^{2+}) + n(Cu^{3+}) \quad (6)$$

เมื่อ $n(X)$ คือ จำนวนโมลของปริมาณ X ใด ๆ ที่หารด้วยมวลของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่ใช้ในการไทเทรตครั้งที่ 1

2) วิเคราะห์จากการไทเทรตครั้งที่ 2

ทั้ง Cu^{2+} ต่อ Cu^{3+} จะทำปฏิกิริยากับไอโอดีนไดออด (I⁻) โดย Cu^{2+} จะทำให้เกิดไอโอดีน (I_2) ครึ่งหนึ่งของที่เกิดจาก Cu^{3+} นำผลการทดลองทั้งสองขั้นตอนมาคำนวณรวมกันก็จะสามารถหาปริมาณ Cu^{2+} ต่อ Cu^{3+} ได้ โดยการไทเทรตครั้งที่ 2 มีการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



เมื่อพิจารณาความแตกต่างของผลไอโอดีน (I_2) จากปฏิกิริยาของ Cu^{2+} ในสมการ (2) และปฏิกิริยาของ Cu^{3+} ในสมการ (7) จะเห็นว่าทั้งสองปฏิกิริยาแตกต่างกัน กล่าวคือ ไอออนของทองแดง (Cu^{2+} และ Cu^{3+}) จะทำปฏิกิริยากับไอโอดีนไดออด (I⁻) ซึ่ง 1 โมลของ Cu^{2+} จะทำให้เกิด 1/2 โมลของไอโอดีน (I_2) และ 1 โมลของ Cu^{3+} จะทำให้เกิด 1 โมลของไอโอดีน (I_2) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของไอโอดีน (I_2) ที่ได้จากการไทเทรต เป็นดังสมการ

$$n_B(I_2) = n_B(Cu_{total}) = 1/2n_B(Cu^{2+}) + n_B(Cu^{3+}) \quad (8)$$

เมื่อ $n_B(X)$ คือ จำนวนโมลของปริมาณ X ใด ๆ ในการไทเทรตครั้งที่ 2 จากนั้นนำมวลของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่ใช้ในการไทเทรตครั้งที่ 2 (m_B) มาหารสมการ (8)

$$n_B(I_2)/m_B = n_B(Cu_{total})/m_B = 1/2n_A(Cu^{2+})/m_B + n_B(Cu^{3+})/m_B \quad (9)$$

$$n_B(I_2)/m_B = n(Cu_{total}) = 1/2n(Cu^{2+}) + n(Cu^{3+}) \quad (10)$$

เมื่อ $n(X)$ คือ จำนวนโมลของปริมาณ X ใด ๆ ที่หารด้วยมวลของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่ใช้ในการไทเทรตครั้งที่ 2

นำสมการ (6) ลบด้วยสมการ (10) จะได้

$$n(Cu^{2+}) = 2[2n_A(I_2)/m_A - n_B(I_2)/m_B] \quad (11)$$

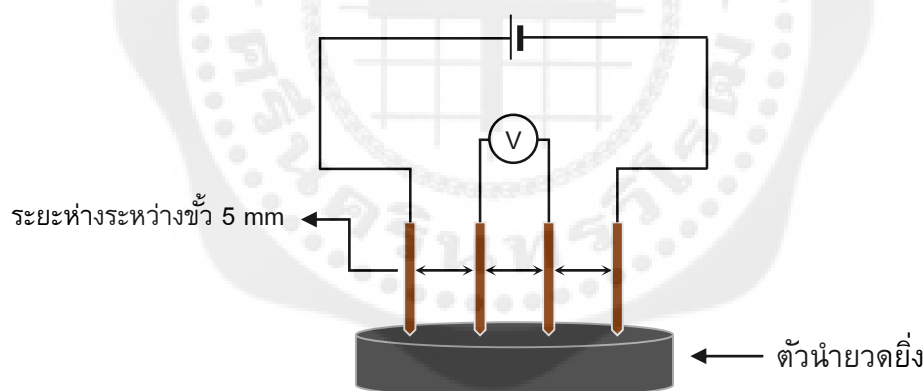
เมื่อได้ค่าของ $n(\text{Cu}^{2+})$ ก็สามารถนำมาหาค่าของ $n(\text{Cu}^{3+})$ ได้ แล้วนำค่าของ $n(\text{Cu}^{2+})$ และ $n(\text{Cu}^{3+})$ มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของ Cu^{2+} และ Cu^{3+}

จาก $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ พบว่า ถ้าพิจารณาปริมาณทองแดงโดยละเอียดแล้ว จะได้ว่า $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3(0.YY)}\text{Cu}_{3(0.ZZ)}\text{O}_{7-y}$ เมื่อ 0.YY และ 0.ZZ คือ เปอร์เซ็นต์ของ Cu^{2+} และ Cu^{3+} ตามลำดับ และใช้เลขออกซิเดชันของอิตเทรียม (Y^{3+}) แบเรียม (Ba^{2+}) และออกซิเจน (O^{2-}) เพื่อหาค่า x

4. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยิ่งยวด

4.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

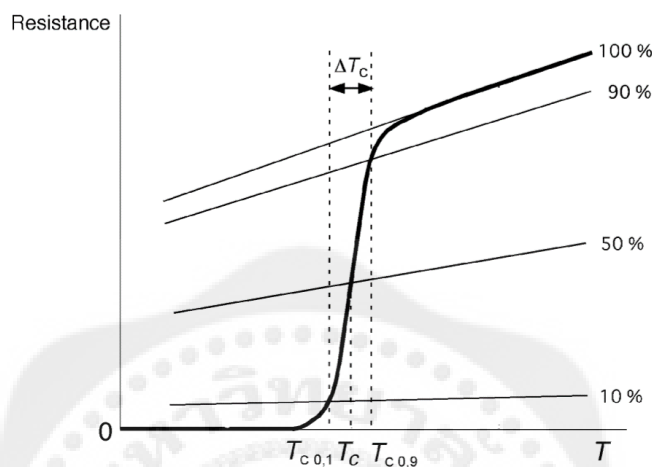
การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว เป็นการวัดความต้านทานเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวด โดยหลักการทำคือ นำตัวนำยิ่งยวดมาทำขั้ว 4 ขั้ว โดยใช้กาบเงินประสานระหว่างขั้วกับสารตัวนำยิ่งยวด ซึ่งแต่ละขั้วมีระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร โดยสองขั้วด้านนอกจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และสองขั้วด้านในเป็นขั้วที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ดังภาพประกอบ 7 ส่วนการวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิดเค วางที่ผิวเพื่อวัดอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวด โดยก่อนทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวด จะทำการวัดความต้านทานจากโอห์มมิเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม



ภาพประกอบ 7 การวัดความต้านไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

การอ่านค่าอุณหภูมิวิกฤตสามารถอ่านได้จากกราฟระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ โดยมูราเซและคณะ (Murase; et al. 2001: 1197-1200) ได้แบ่งผลของการวัดอุณหภูมิวิกฤตออกเป็นช่วง 4 ช่วง ในแกนนอน ดังนี้ ช่วงกราฟตรงสภาพปกติมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ถัดจากช่วงสภาพปกติมา 10 เปอร์เซ็นต์ ตัวนำยิ่งยวดจะมีสภาพของตัวนำปกติอยู่ 90 เปอร์เซ็นต์ ถัดลงมาจากกระทั่งกึ่งกลางของกราฟ ตัวนำยิ่งยวดจะมีสภาพของของตัวนำปกติ 50 เปอร์เซ็นต์ และก่อนจะถึงสภาพนำยิ่งยวดอยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ การอ่านค่าอุณหภูมิวิกฤตโดยใช้หลักการของมูราเซ

และคณะ จะพิจารณาจุดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 0 เปอร์เซ็นต์ เป็นหลัก โดยอุณหภูมิวิกฤต (T_c) จะอ่านค่าจากอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างช่วงเปลี่ยนสภาพนำวดยิ่งและความสูงของเส้นแกนนอน (ความต้านทาน 50 %) ซึ่งอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างช่วงเปลี่ยนสภาพนำวดยิ่งคือ จุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ ($T_{c0.1}$ และ $T_{c0.9}$) ดังภาพประกอบ 8



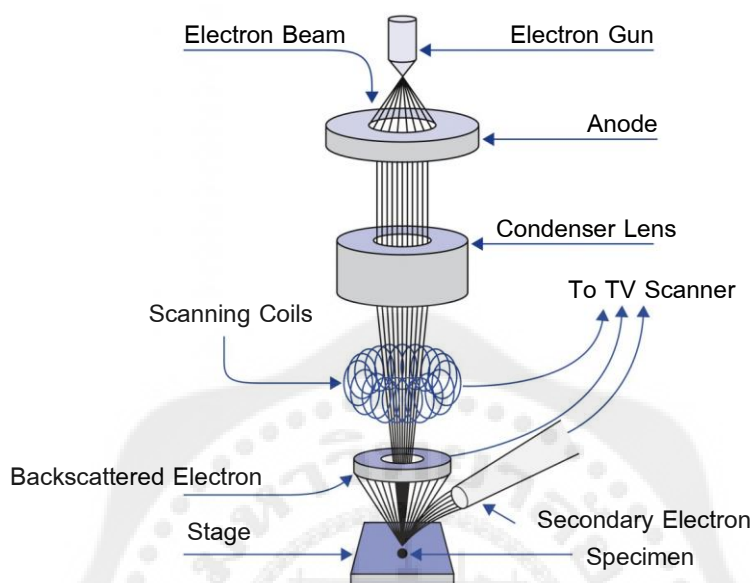
ภาพประกอบ 8 การหาอุณหภูมิวิกฤตจากกราฟ

ที่มา: Murase, S.; et al. (2001). Critical temperature measurement method of composite superconductors. *Physica C*. 2001(357-360): 1198.

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่าง โดยมีขดลวดสแกน (Scanning coils) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนสารตัวอย่าง ซึ่งลำอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ตกกระทบบนบริเวณพื้นผิวของสารตัวอย่าง จะทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหลุดออกจากวงโคจร เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดวงโคจรนี้ว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) โดยสามารถศึกษา

ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่างได้จากหัวรับสัญญาณ (Detector) ที่รับอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้ และนำไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพ



ภาพประกอบ 9 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: Monospektra. (2017). *Drives and Positioning Systems for Electron Microscopes*. (Online)

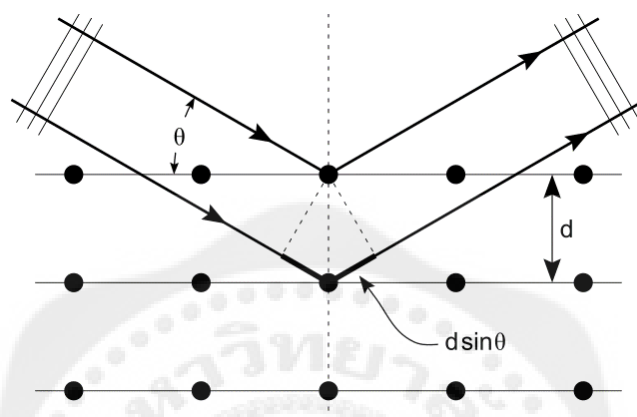
4.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

4.3.1 หลักการทำงานของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ โดยการยิงรังสีเอกซ์ซึ่งทราบความยาวคลื่นไปกระทบกับวัสดุที่ต้องการศึกษา จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยค่าองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะมีค่าเฉพาะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในวัสดุที่ต้องการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดของวัสดุที่ต้องการศึกษาได้จากค่ามุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้จากกระบวนการดังกล่าว ค่ามุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ทำการวัดได้นั้นถูกวัดโดยเครื่องตรวจจับ (Detector) รับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่าง ๆ ของการทดสอบ ซึ่งการเลี้ยวเบนดังกล่าวจะไปเป็นตามสมการของแบรกก์ (Bragg's equation)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (12)$$

เมื่อ	d	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก
	θ	คือ มุมที่ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบ
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
	n	คือ อันดับของการสะท้อน (เป็นจำนวนเต็ม)



ภาพประกอบ 10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก

ที่มา: Wikipedia. (2017). *X-ray crystallography*. (Online)

4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ

กระบวนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ (Fullprof) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ กับแบบจำลองโครงสร้างที่ถูกกำหนดขึ้น ทำให้สามารถระบุโครงสร้างของสาร หาค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ และตำแหน่งอะตอม โดยในการจำลองรูปแบบของโครงสร้างจะต้องมีการใส่ค่าของตัวแปรเริ่มต้น ดังนี้

- 1) การปรับค่าเป็นศูนย์ (Zero shift)
- 2) สัญญาณพื้นหลัง (Background)
- 3) พารามิเตอร์หน่วยเซลล์ (Unit cell parameter)
- 4) ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความเข้มของรังสีเอ็กซ์สูงสุด (FWHM parameter)
- 5) ลักษณะของกราฟแบบเกาส์เซียนกับลอเรนเซียน (Pseudo-Voigt factor)
- 6) ความอสมมาตรของโครงสร้าง (Asymmetry)

หลักการทำงานของโปรแกรม เป็นการวิเคราะห์ปริมาณ 2 ปริมาณ โดยจะต้องทำให้เส้นกราฟที่เกิดจากการคำนวณไปซ้อนทับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้มากที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ในการคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองดังนี้ (Rodríguez-Carvajal. 2000: 43-45)

- 1) ข้อมูลแสดงลักษณะเฉพาะ (Profile factor)

$$R_p = \frac{\sum_i |y_{oi} - y_{ci}|}{\sum_i y_{oi}} \quad (13)$$

- 2) แฟกเตอร์ของข้อมูลโดยน้ำหนัก (Profile factor)

$$R_{wp} = 100 \left[\frac{\sum_i w_i |y_{oi} - y_{ci}|^2}{\sum_i w_i y_{oi}^2} \right]^{1/2} \quad (14)$$

- 3) แฟกเตอร์ค่าคาดหวัง (Expected factor)

$$R_{exp} = 100 \left[\frac{n - p}{\sum_i w_i y_{oi}} \right]^{1/2} \quad (15)$$

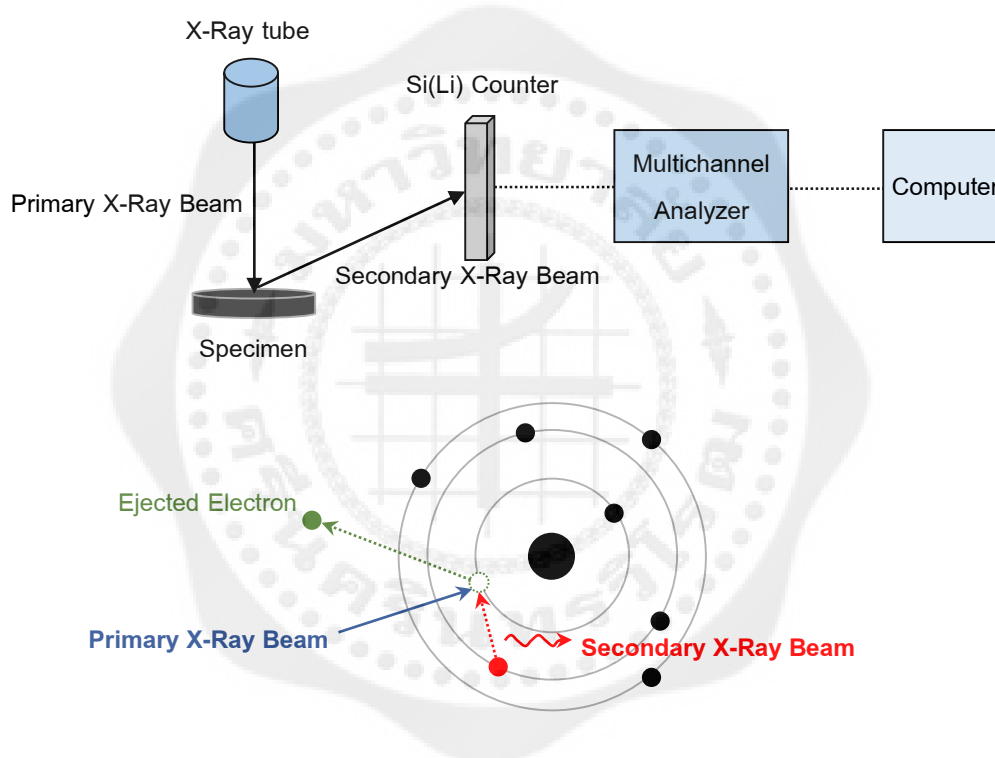
- 4) ค่าความถูกต้อง (Goodness)

$$\chi^2 = \left[\frac{R_{wp}}{R_{exp}} \right]^2 \quad (16)$$

เมื่อ	R_p	คือ ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการกำลังสองน้อยสุด (Least-square)
	R_{wp}	คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของความสูงพีคที่อยู่เหนือสัญญาณพื้นหลัง
	R_{exp}	คือ ค่าประมาณที่ดีที่สุดสำหรับชุดข้อมูล
	n	คือ จำนวนของข้อมูลทั้งหมด
	p	คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ปรับแต่ง
	χ^2	คือ ค่าความถูกต้อง
	y_{oi}	คือ รูปแบบของกราฟจากการทดลอง
	y_{ci}	คือ รูปแบบของกราฟจากการจำลองโครงสร้างจากการทดลอง
	w_i	คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง

4.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectrometer: EDX) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาปริมาณและชนิดของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยการยิงรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray beam) ให้ทะลุผ่านเข้าไปในอะตอม รังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะทำให้อิเล็กตรอนวงในของอะตอมของธาตุหลุดออกไป จากนั้นอิเล็กตรอนวงนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่าจะเข้าไปแทนที่ และคายพลังงานส่วนเกินออกมา เรียกว่า รังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray beam) รังสีเอกซ์ทุติยภูมิจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุนั้น ซึ่งจะถูกใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่าง

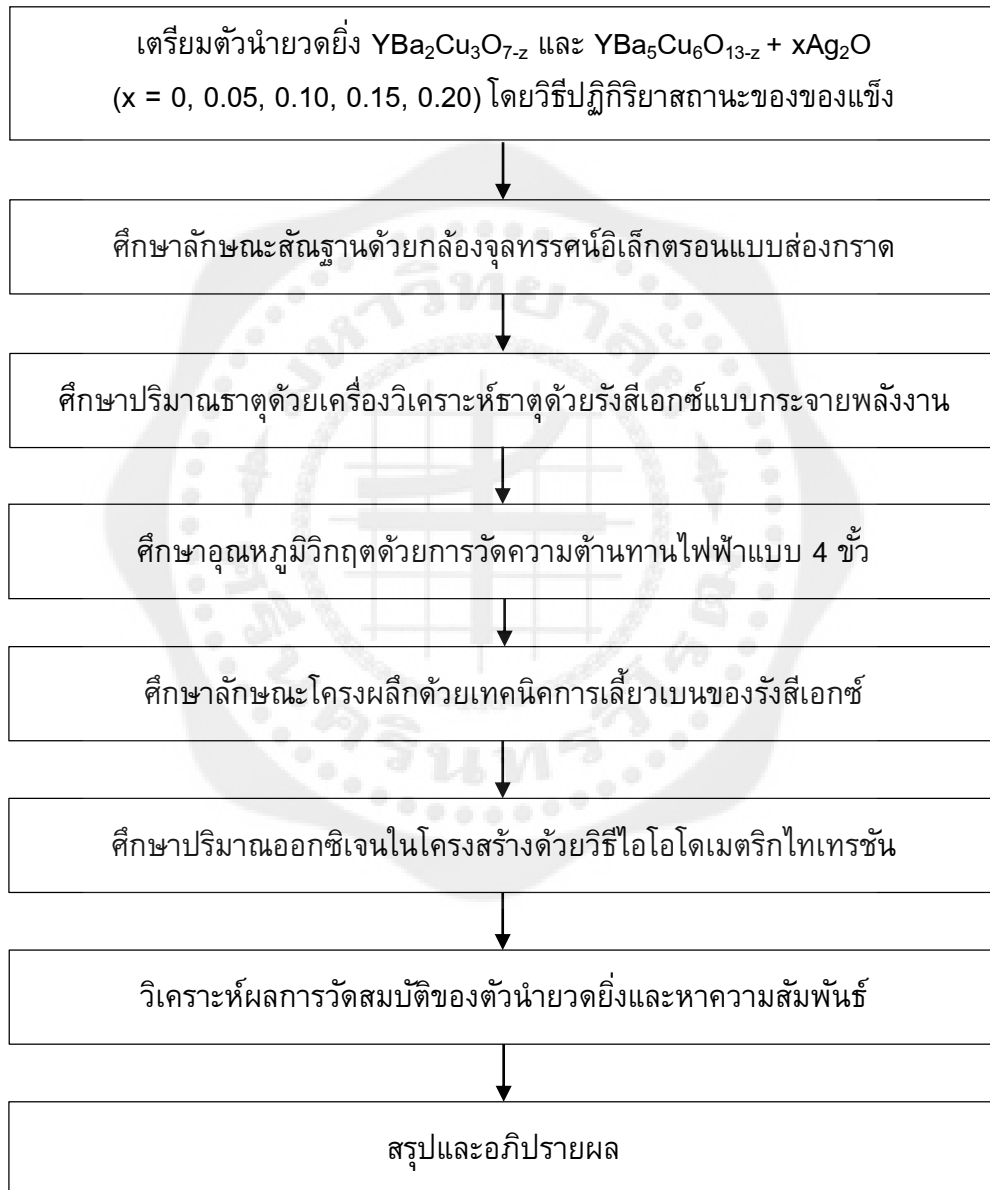


ภาพประกอบ 11 การทำงานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) โดยมีขั้นตอนการดำเนินการศึกษาดังแผนภาพต่อไปนี้



ภาพประกอบ 12 แผนภาพขั้นตอนดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยจะนำเสนอรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ตามหัวข้อต่อไปนี้

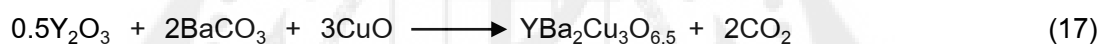
1. การเตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน
 - 1.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้น
 - 1.2 การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง
2. ขั้นตอนการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว
3. ขั้นตอนการหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

1. การเตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน

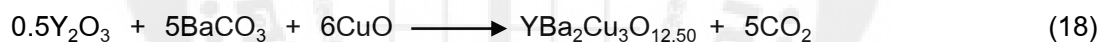
1.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้น

ตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) ประกอบด้วยสารตั้งต้นคือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) การคำนวณสัดส่วนของสารตั้งต้นจะคำนวณจากปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งสมการเคมีของแต่ละสูตรแสดงได้ดังนี้

สูตร 1:2:3 (Y123)



สูตร 1:5:6 (Y156)



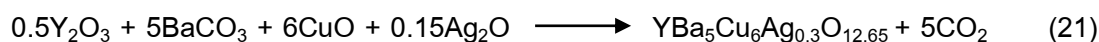
สูตร 1:5:6:0.05 (Y156 + 0.05 Ag_2O)



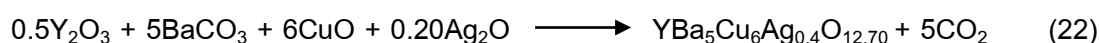
สูตร 1:5:6:0.10 (Y156 + 0.10 Ag_2O)



สูตร 1:5:6:0.15 (Y156 + 0.15 Ag_2O)



สูตร 1:5:6:0.20 (Y156 + 0.20 Ag_2O)



จากสมการ (13) สมการที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 สามารถคำนวณหาสัดส่วนของสารตั้งต้นในหน่วยกรัมได้ดังนี้

- 1) ปริมาณอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)

อิตเทรียม 2 อะตอม เท่ากับ $2 \times 88.906 = 177.812$ กรัม

ออกซิเจน 3 อะตอม เท่ากับ $3 \times 15.999 = 47.997$ กรัม

จะได้มวลโมเลกุลของอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) เท่ากับ $177.812 + 47.997 = 225.809$ จากสมการเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 ใช้อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) 0.5 โมล ดังนั้น สัดส่วนของอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) เท่ากับ $0.5 \times 225.809 = 112.905$ กรัม

2) ปริมาณแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$)

แบเรียม 1 อะตอม เท่ากับ $1 \times 137.327 = 137.327$ กรัม

คาร์บอน 1 อะตอม เท่ากับ $1 \times 12.011 = 12.011$ กรัม

ออกซิเจน 3 อะตอม เท่ากับ $3 \times 15.999 = 47.997$ กรัม

จะได้มวลโมเลกุลของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) เท่ากับ $137.327 + 12.011 + 47.997 = 197.335$ จากสมการเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 ใช้แบเรียมคาร์บอเนต 2 โมล ดังนั้น สัดส่วนของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) เท่ากับ $2 \times 197.335 = 394.67$ กรัม

3) ปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

คอปเปอร์ 1 อะตอม เท่ากับ $1 \times 63.546 = 63.546$ กรัม

ออกซิเจน 1 อะตอม เท่ากับ $1 \times 15.999 = 15.999$ กรัม

จะได้มวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เท่ากับ $63.546 + 15.999 = 79.545$ จากสมการเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) 3 โมล ดังนั้น สัดส่วนของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เท่ากับ $3 \times 79.545 = 238.635$ กรัม

จะได้อัตราส่วนของมวลเป็นกรัมจากปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

ปริมาณอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) 112.925 กรัม

ปริมาณแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) 394.670 กรัม

ปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) 238.635 กรัม

ในตัวนำยวดยิ่งสูตรอื่น ๆ ใช้วิธีการคำนวณปริมาณสารตั้งต้นจากสมการเคมี เช่นเดียวกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 ดังที่ได้แสดงไปแล้วข้างต้น

1.2 การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง

1) หลังจากคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร ซึ่งปริมาณสารตั้งต้นแล้ว นำมาผสมให้เข้ากันในครกอะลูมินาจนเป็นสารเนื้อเดียวกัน ดังภาพประกอบ 14



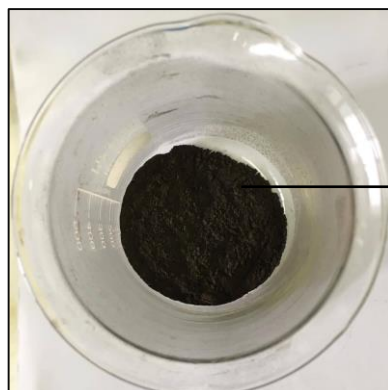
Y_2O_3

$BaCO_3$

CuO

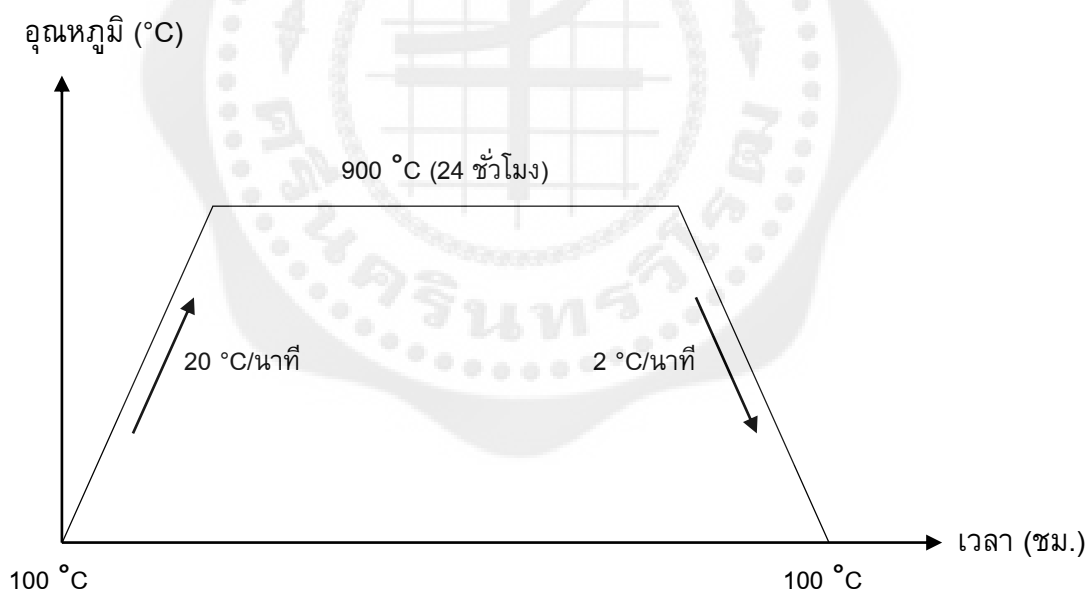
Ag_2O

ภาพประกอบ 13 สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง



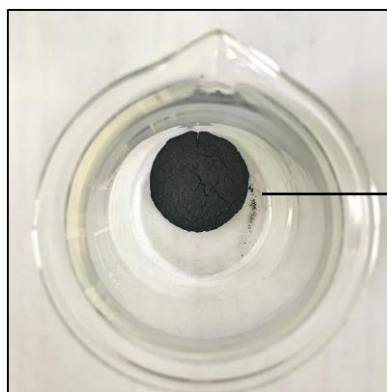
ภาพประกอบ 14 ลักษณะสารหลังจากผสมเข้ากัน

2) เริ่มต้นกระบวนการเผาฟองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 900 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิลดลงมาถึง 100 องศาเซลเซียส กระบวนการเผาเป็นดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงอุณหภูมิในกระบวนการเผาฟอง

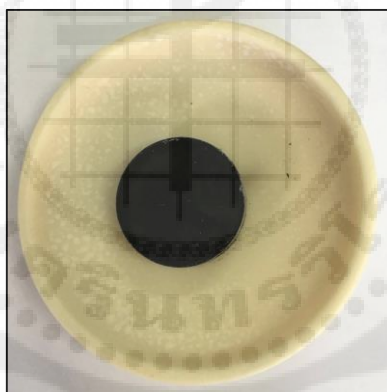
3) เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเผาฟองครั้งที่ 1 สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นสารสีดำจับตัวกัน เป็นก้อนแข็ง ดังภาพประกอบ 16 นำสารที่ผ่านกระบวนการเผาฟองมาบดในครกอะลูมินาจนเป็น สารเนื้อเดียวกันที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ จากนั้นนำสารไปใส่ในถ้วยอะลูมินา แล้วทำการเผาฟองอีกครั้ง



สารสีดำจับตัวกัน
เป็นก้อนแข็ง มีรูพรุน

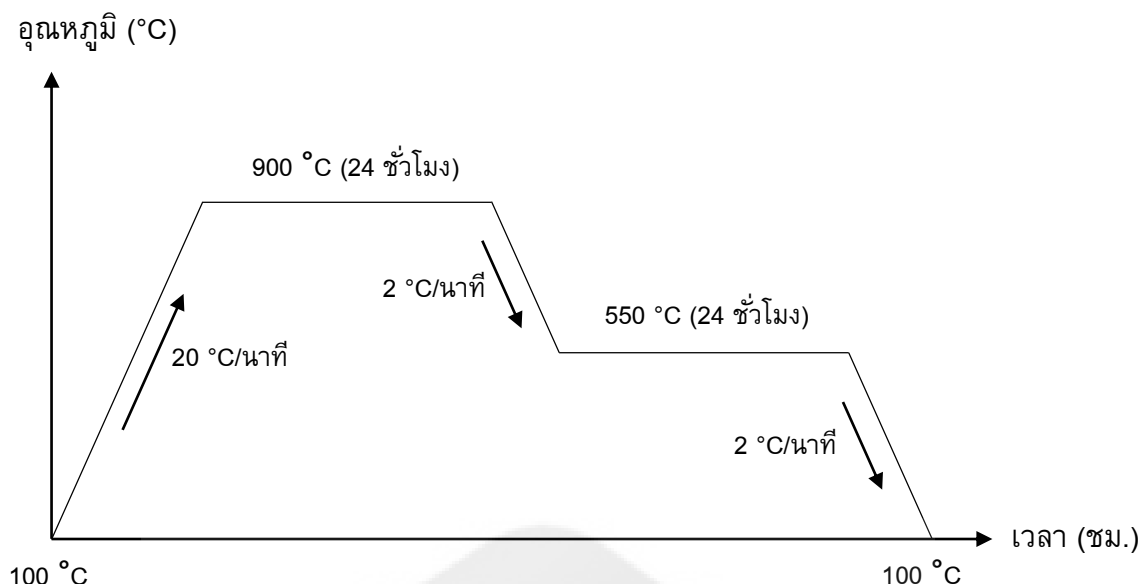
ภาพประกอบ 16 ลักษณะสารหลังจากกระบวนการเผาผลาญ

4) นำสารที่ผ่านกระบวนการเผาผลาญครั้งที่ 2 มาบดในครกอะลูมินาจนได้สารเป็นผงละเอียด แล้วนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิคจนได้สารที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมสีดำ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และมีความหนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการเผาขึ้นรูป



ภาพประกอบ 17 ลักษณะสารหลังจากการอัดขึ้นรูป

5) เริ่มต้นกระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 900 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แล้วจะเปิดฝาเตาไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการเติมออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศให้กับสารตัวอย่าง จากนั้นปิดฝาเตาแล้วลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กระบวนการเผาเป็นดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงอุณหภูมิในกระบวนการเผาขึ้นรูปและการอบอ่อน

6) เมื่อสังเคราะห์สารตัวอย่างทั้งหมดแล้ว นำสารตัวอย่างไปทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์พบว่าสารตัวอย่างทุกชิ้นเป็นตัวนำยวดยิ่ง จากนั้นนำตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้ไปทำการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป

2. ขั้นตอนการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

ในงานวิจัยนี้จะวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว เพื่อหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง โดยจะต้องนำตัวนำยวดยิ่งที่ต้องการวัดไปทำขั้วการวัดแบบ 4 ขั้ว ซึ่งมีอุปกรณ์และวิธีการทำ ดังนี้

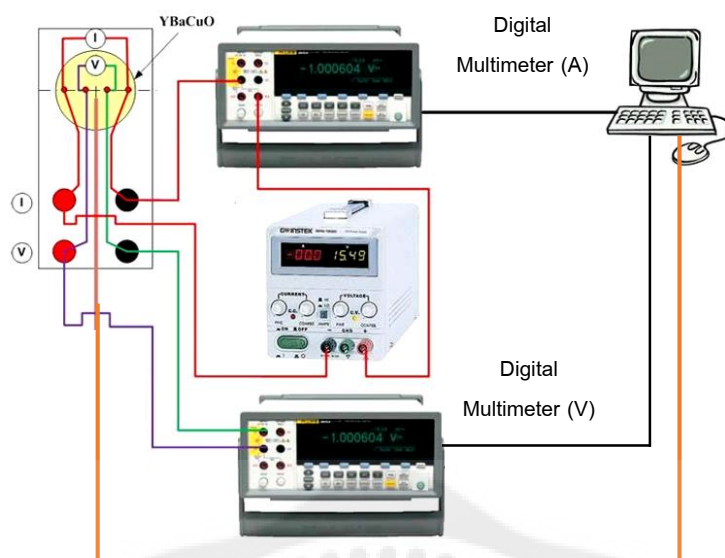
2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความต้านทานไฟฟ้า

- 1) สายโคแอกเซียล (Coaxial Cable) เบอร์ TSLE 156277
- 2) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิดเค
- 3) เทอร์มิเตอร์ ยี่ห้อฟลัก (Fluke) รุ่น 51II
- 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น HY3005
- 5) มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อฟลัก (Fluke) รุ่น 8845A

2.2 วิธีการทำขั้วและวัดความต้านทานไฟฟ้า

1) ติดขั้วที่ใช้ในการวัดลงบนตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งขั้วที่ใช้ในการวัดทำจากน็อดอะลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร โดยใช้กาวยีนเป็นตัวประสานเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า โดยที่สองขั้วด้านนอกเป็นขั้วที่ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้า และสองขั้วด้านในเป็นสองขั้วสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด

- 2) ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง

เนื่องจากสารกลุ่มนี้จะเกิดสภาพนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ จึงต้องใช้ไนโตรเจนเหลวมาหล่อเย็นเพื่อใช้ลดอุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่ง เมื่ออุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่งมีค่าเท่ากับ 77 เคลวิน เริ่มให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดคงตัว 1 ค่า คือ 100 มิลลิแอมแปร์ จนกระทั่งอุณหภูมิของสารถึง 120 เคลวิน บันทึกข้อมูลในคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ดังสมการ

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (23)$$

เมื่อ	ρ	คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า
	V	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่มีค่าคงตัว
	s	คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว

3. ขั้นตอนการหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

ในงานวิจัยนี้จะนำสารที่มีลักษณะเป็นผงมาทำการไทเทรต โดยใช้เทคนิคไอโอโดเมตริกไทเทรชัน การไทเทรตนี้เป็นเทคนิคการหาปริมาณทองแดงในสารตัวอย่าง แล้วนำปริมาณทองแดงมาวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนในสารตัวนำยวดยิ่ง การวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงในตัวนำยวดยิ่ง มีวิธีการทดลองดังนี้

3.1 การไทเทรตครั้งที่ 1

- 1) ชั่งสารตัวนำวัดยี่ห้อที่มีลักษณะเป็นผง ประมาณ 100-150 มิลลิกรัม แล้วบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำใส่ปิกรเกอร์
- 2) เติมสารละลายกรดเปอร์คลอริก (HClO_4) เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (ทำในตู้ดูดควัน)
- 3) นำสารละลายไปต้ม เป็นเวลา 10 นาที แล้วตั้งสารละลายไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 4) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้น 15% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสาร โดยจะใช้เครื่องกวนสารจนกระทั่งสิ้นสุดการไทเทรต
- 5) ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อน ๆ จากนั้นเติมน้ำแบ่ง 3 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม
- 6) ไทเทรตซ้ำ ๆ จนสีน้ำเงินจางหายไปทันที แล้วบันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
- 7) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.2 การไทเทรตครั้งที่ 2

- 1) ชั่งสารตัวนำวัดยี่ห้อที่มีลักษณะเป็นผง ประมาณ 100-150 มิลลิกรัม แล้วบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำใส่ขวดปริมาตรทรงกรวย
- 2) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้น 10% ปริมาตร 15 มิลลิลิตร (ทำในตู้ดูดควัน)
- 3) นำแก๊สไนโตรเจนผ่านพาสเจอร์บีเปต จุ่มลงในสารละลายให้เกิดเป็นฟองอากาศ เพื่อเป็นตัวนำออกซิเจนออกจากสารละลาย เป็นเวลา 10 นาที
- 4) กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสาร พร้อมทั้งเริ่มหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 3.5 โมลาร์ ปริมาตร 6 มิลลิลิตร โดยเวลาที่ใช้ในการหยดต้องไม่ต่ำกว่า 5 นาที
- 5) กวนสารละลายต่ออีก 10 นาที จนเกิดตะกอนสีขาว จึงหยุดกวนสาร
- 6) ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อน ๆ จากนั้นเติมน้ำแบ่ง 3 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม
- 7) ไทเทรตซ้ำ ๆ จนสีน้ำเงินจางหายไปทันที แล้วบันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
- 8) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

นำผลที่บันทึกได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ปริมาณทองแดง โดยคำนวณจากสมการ (11) และสมการ (10) คือ

$$n(\text{Cu}^{2+}) = 2[2n_{\text{A}}(\text{I}_2)/m_{\text{A}} - n_{\text{B}}(\text{I}_2)/m_{\text{B}}]$$

$$n_{\text{B}}(\text{I}_2)/m_{\text{B}} = 1/2n(\text{Cu}^{2+}) + n(\text{Cu}^{3+})$$

โดยที่

$n(\text{Cu}^{2+})$ คือ จำนวนโมลของ Cu^{2+}

$n(\text{Cu}^{3+})$ คือ จำนวนโมลของ Cu^{3+}

$n_A(\text{I}_2)$ คือ จำนวนโมลของ I_2 ที่ได้จากการไทเทรตกับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ในการไทเทรตครั้งที่ 1

$n_B(\text{I}_2)$ คือ จำนวนโมลของ I_2 ที่ได้จากการไทเทรตกับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ในการไทเทรตครั้งที่ 2

m_A คือ มวลของสารตัวนำยวดยิ่งในการไทเทรตครั้งที่ 1

m_B คือ มวลของสารตัวนำยวดยิ่งในการไทเทรตครั้งที่ 2

วิธีการคำนวณหาปริมาณ Cu^{2+} และ Cu^{3+} สามารถทำได้ดังนี้
บันทึกผลจากการไทเทรตตัวนำยวดยิ่ง Y123

ปริมาณสาร	การไทเทรตครั้งที่ 1				การไทเทรตครั้งที่ 2			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
Y123 (mg)	158.00	162.00	151.00	157.00	149.00	151.00	156.00	152.00
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (cm^3)	23.30	23.90	22.30	23.17	27.00	27.80	27.70	27.83

จำนวนโมลของ I_2 แทนค่าด้วยจำนวนโมลของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

ความเข้มข้นของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 0.0379 โมลาร์

จำนวนโมลของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ในการไทเทรตครั้งที่ 1 = $(0.0379 \times 23.17) \div 1000 = 0.000878$

จำนวนโมลของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ในการไทเทรตครั้งที่ 2 = $(0.0379 \times 27.83) \div 1000 = 0.001054$

- คำนวณหาปริมาณ Cu^{2+}

จากสมการ (11) แทนค่า จะได้

$$\begin{aligned}
 n(\text{Cu}^{2+}) &= 2[2n_A(\text{I}_2)/m_A - n_B(\text{I}_2)/m_B] \\
 &= 2[(2 \times 0.000878)/157 - (0.001054)/157] \\
 &= 8.494 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

- คำนวณหาปริมาณ Cu^{3+}

จากสมการ (10) แทนค่า จะได้

$$\begin{aligned}
 n_B(\text{I}_2)/m_B &= 1/2n(\text{Cu}^{2+}) + n(\text{Cu}^{3+}) \\
 n(\text{Cu}^{3+}) &= n_B(\text{I}_2)/m_B - 1/2n(\text{Cu}^{2+}) \\
 &= (0.001054)/152 - 1/2(8.494 \times 10^{-6}) \\
 &= 2.692 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้อัตราส่วน $\text{Cu}^{2+} : \text{Cu}^{3+}$ เท่ากับ 1 : 0.317

งานวิจัยนี้สูตรเคมีของสารตัวอย่างเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$ โดยจะใช้เลขออกซิเดชันของธาตุในการคำนวณ ดังนี้ อิตเทรียม (+3) แบเรียม (+2) คอปเปอร์พิจารณาด้วยเปอร์เซ็นต์ของ Cu^{2+} คือ (+2) และ Cu^{3+} คือ (+3) ออกซิเจน (-2) ในการหาค่า z จะหาได้จากผลรวมเลขออกซิเดชันของทุกอะตอมของธาตุในสารประกอบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$[1 \times (+3)] + [2 \times (+2)] + 3 \left[\left(\frac{1}{1+0.317} \right) (+2) + \left(\frac{0.317}{1+0.317} \right) (+3) \right] + (7-z)(-2) = 0$$

$$z = 0.139$$

ดังนั้น ตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$ จะมีสูตรเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.862}$



บทที่ 4

ผลการวิจัย

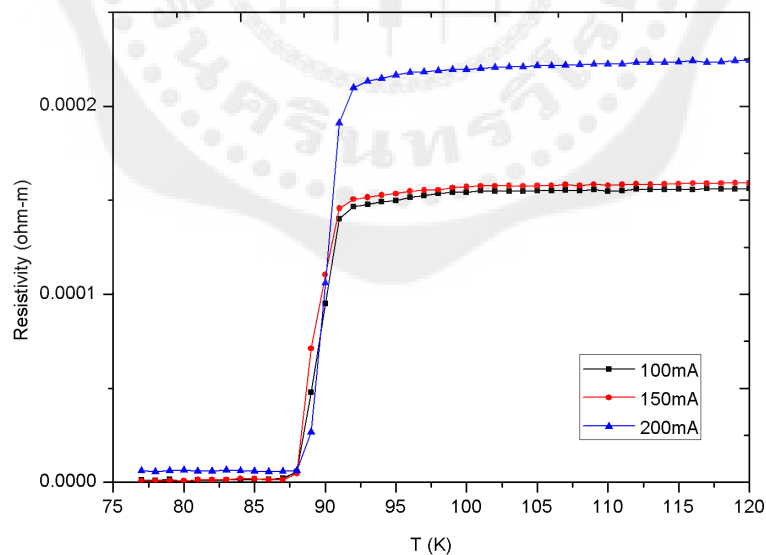
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ตัวนำยิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-z} + x\text{Ag}_2\text{O}$ ($x = 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง โดยได้นำเสนอผลการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยิ่งยวดตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยิ่งยวด

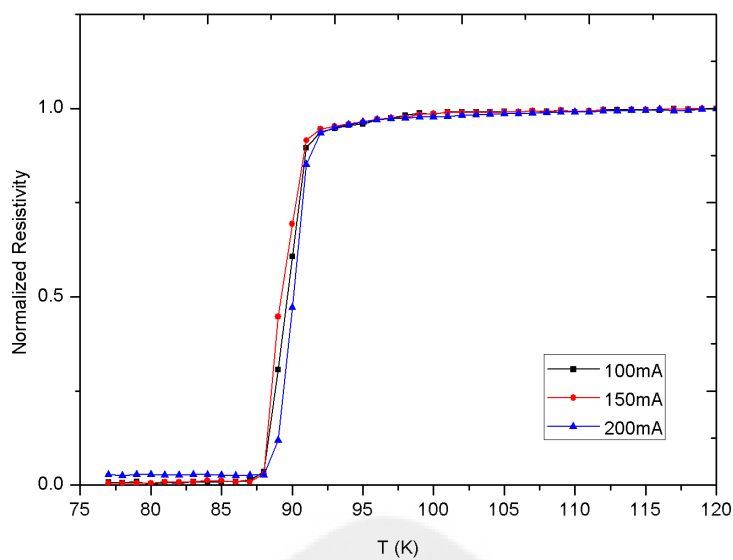
1.1 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวด

ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยิ่งยวด จะใช้การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร โดยใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดอยู่ที่ 77 เคลวิน ผู้วิจัยจะให้กระแสไฟฟ้าคงตัว 3 ค่า คือ 100 mA 100 mA และ 200 mA แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ในช่วงอุณหภูมิ 77 เคลวิน ไปจนถึง 120 เคลวิน จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ จากนั้นหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดด้วยวิธีของมูราเซ ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1.1.1 ตัวนำยิ่งยวด Y123



ภาพประกอบ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวด Y123

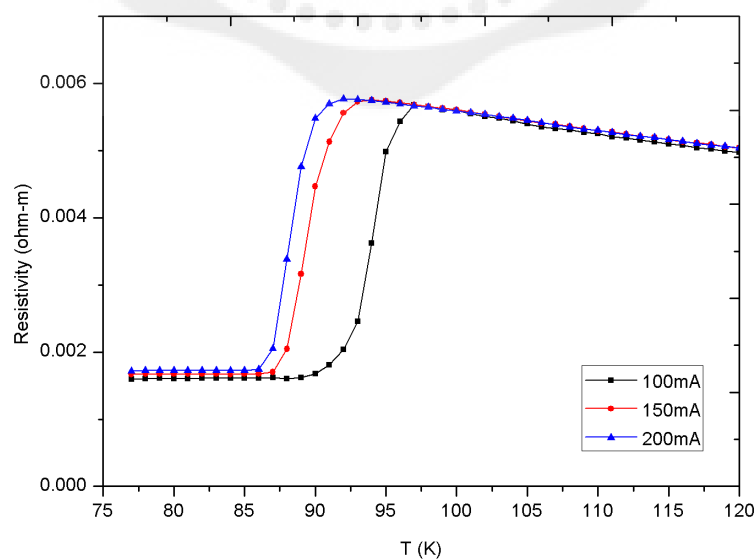


ภาพประกอบ 21 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123

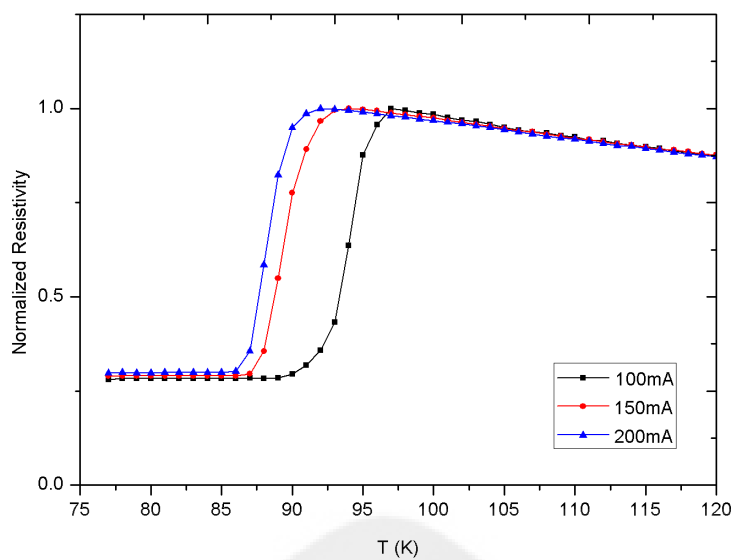
ตาราง 1 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
100 mA	88	91	3
150 mA	87	91	4
200 mA	88	91	3

1.1.2 ตัวนำยวดยิ่ง Y156



ภาพประกอบ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y156

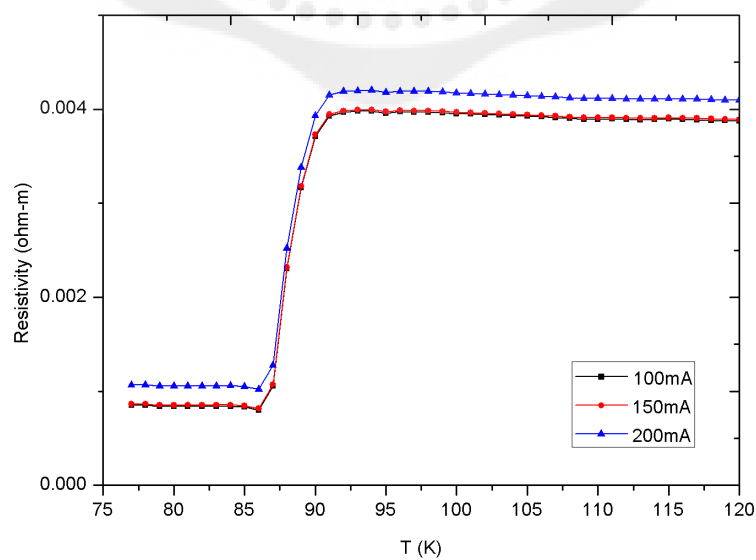


ภาพประกอบ 23 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156

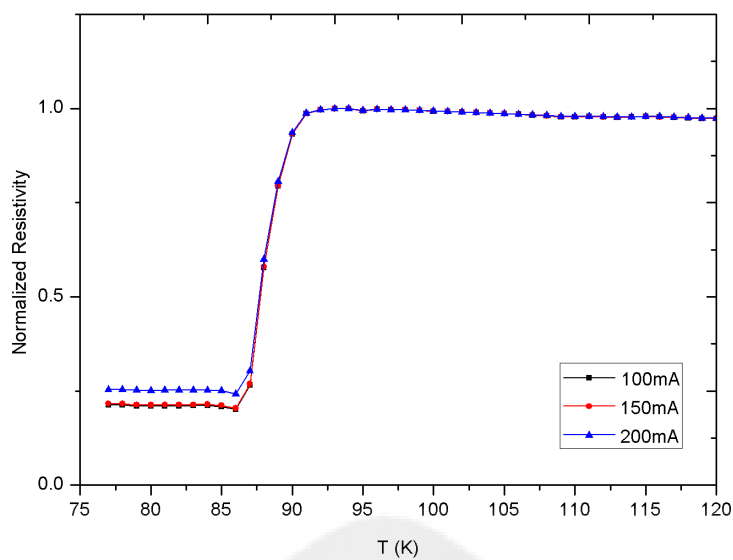
ตาราง 2 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
100 mA	92	95	3
150 mA	87	91	4
200 mA	86	89	3

1.1.3 ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O



ภาพประกอบ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ
ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O

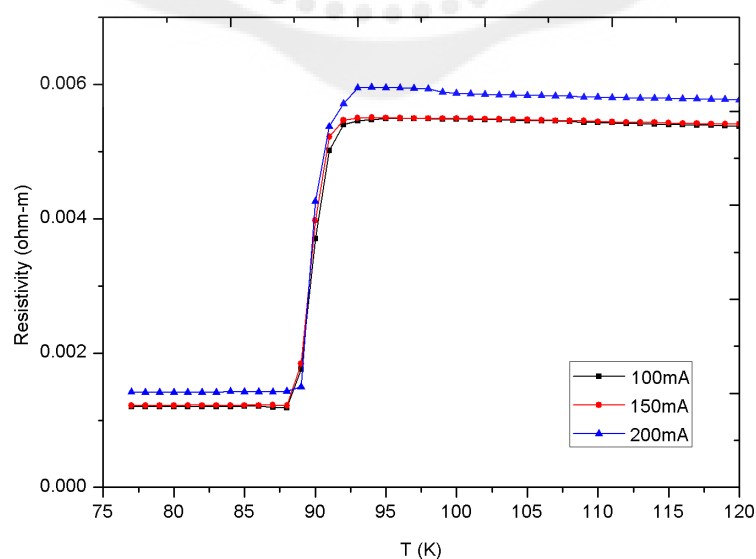


ภาพประกอบ 25 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O

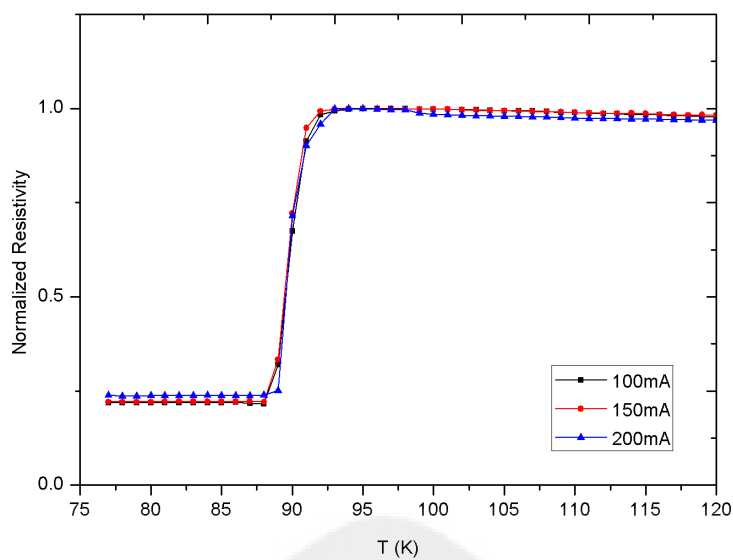
ตาราง 3 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O

กระแสตัวที่ใช้วัด	T _c offset (เคลวิน)	T _c onset (เคลวิน)	ΔT _c (เคลวิน)
100 mA	86	89	3
150 mA	86	89	3
200 mA	86	89	3

1.1.4 ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O



ภาพประกอบ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O

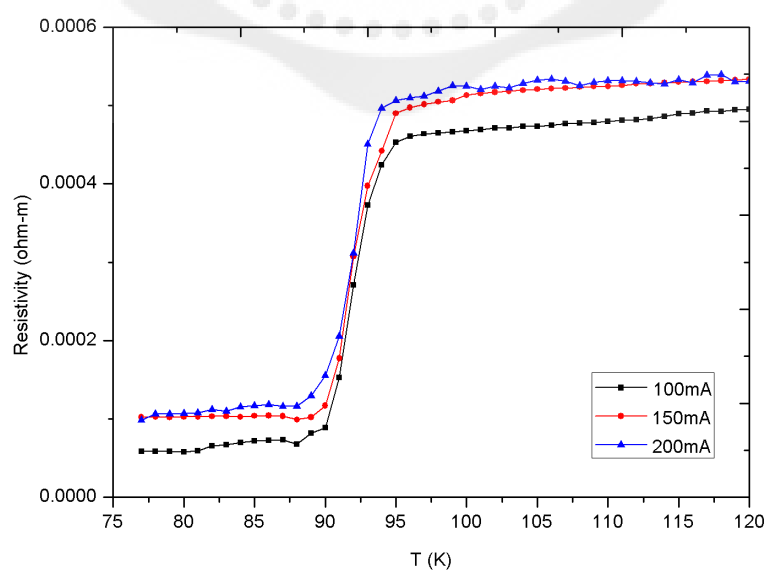


ภาพประกอบ 27 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O

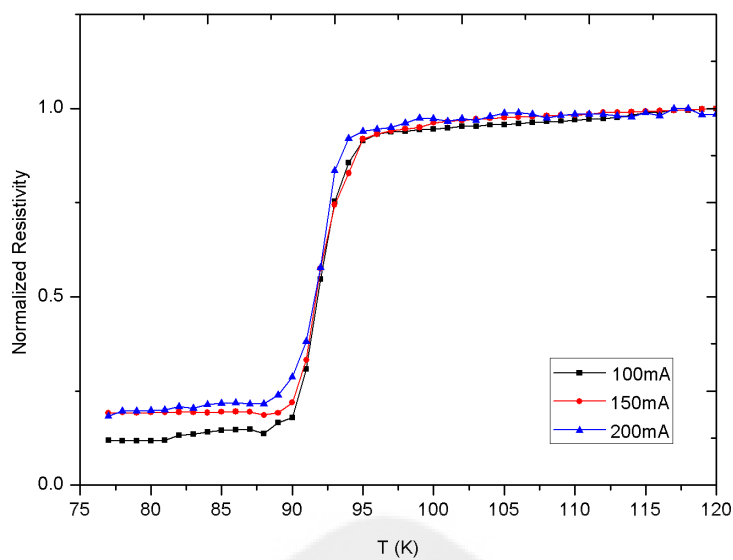
ตาราง 4 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
100 mA	88	91	3
150 mA	88	91	3
200 mA	88	91	3

1.1.5 ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O



ภาพประกอบ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O

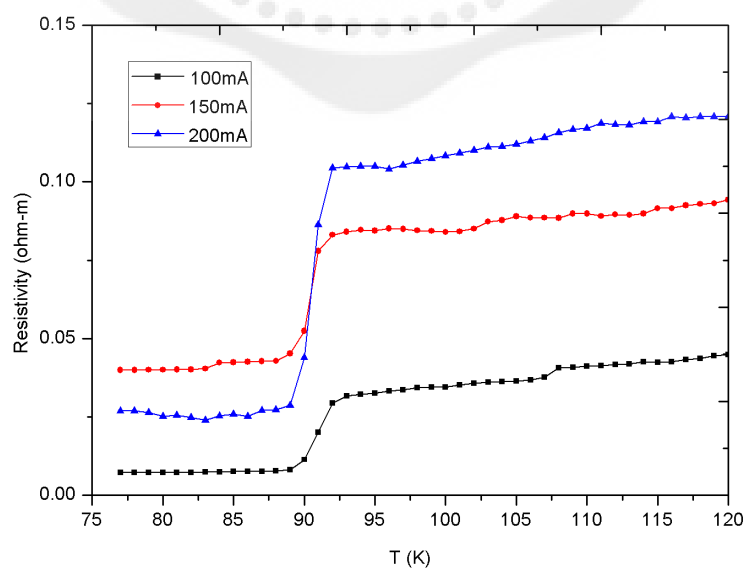


ภาพประกอบ 29 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O

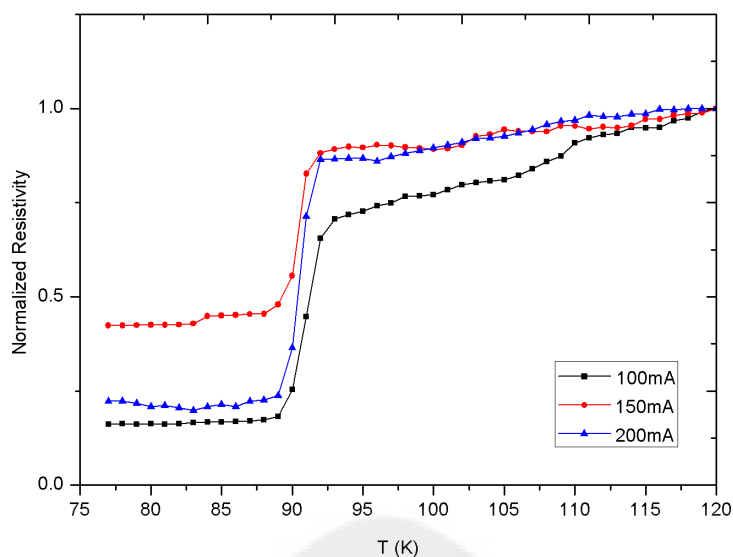
ตาราง 5 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
100 mA	90	93	3
150 mA	90	94	4
200 mA	90	93	3

1.1.6 ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag₂O



ภาพประกอบ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag₂O

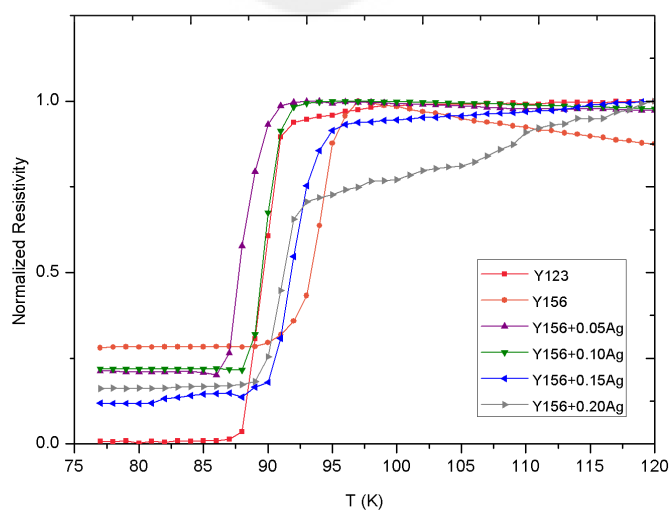


ภาพประกอบ 31 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag₂O

ตาราง 6 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag₂O

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
100 mA	89	92	3
150 mA	89	91	2
200 mA	89	91	2

หากนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าคงตัว 100 mA ของตัวนำยวดยิ่งทุกสูตรมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ จะได้กราฟดังภาพประกอบ 32 และสามารถสรุปค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรได้ดังตาราง 7



ภาพประกอบ 32 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งทุกสูตร

ตาราง 7 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรที่กระแสไฟฟ้าคงตัว 100 mA

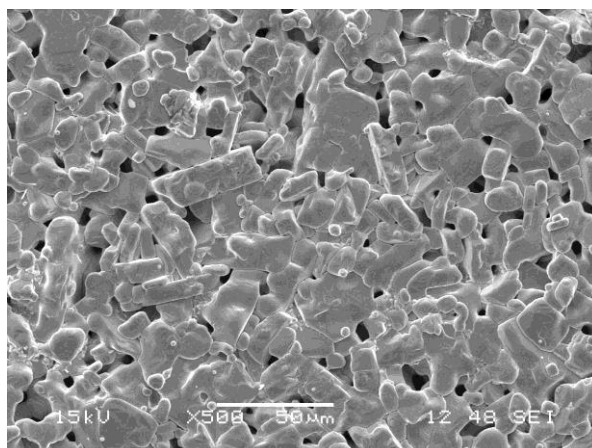
ตัวนำยวดยิ่ง	T _c offset (เคลวิน)	T _c onset (เคลวิน)	ΔT _c (เคลวิน)
Y123	88	91	3
Y156	92	95	3
Y156 + 0.05Ag ₂ O	86	89	3
Y156 + 0.10Ag ₂ O	88	91	3
Y156 + 0.15Ag ₂ O	90	93	3
Y156 + 0.20Ag ₂ O	89	92	3

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต 92 เคลวิน (Wu; & et al. 1987: 908-910) และตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ที่เจือเงินในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงขึ้น (Metin; & Tepe. 2016: 1083-1087) จากตาราง 7 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต 91 เคลวิน ตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต 95 เคลวิน และในกลุ่มตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่มีการเจือด้วยเงิน พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงสุดที่ 93 เคลวิน และตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตต่ำสุดที่ 89 เคลวิน แสดงว่า การเจือเงิน (Ag₂O) ในตัวนำยวดยิ่ง Y156 ไม่ได้ทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงขึ้น

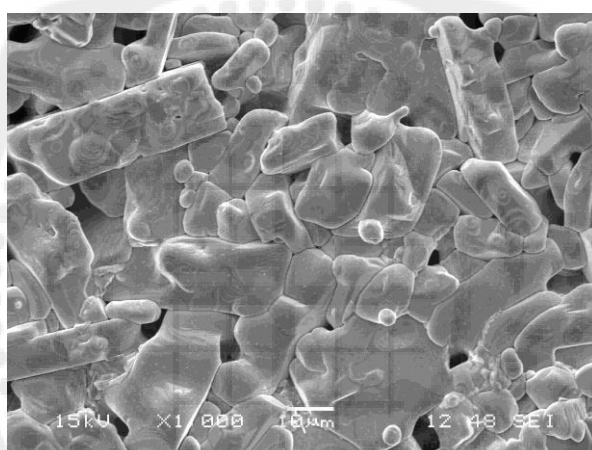
1.2 ลักษณะสัณฐานของตัวนำยวดยิ่ง

ในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานจะวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) โดยในการวิเคราะห์ทั้งสองปริมาณนี้จะใช้เครื่องมือยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6380LV ซึ่งจะทำให้การถ่ายภาพลักษณะสัณฐานและวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร

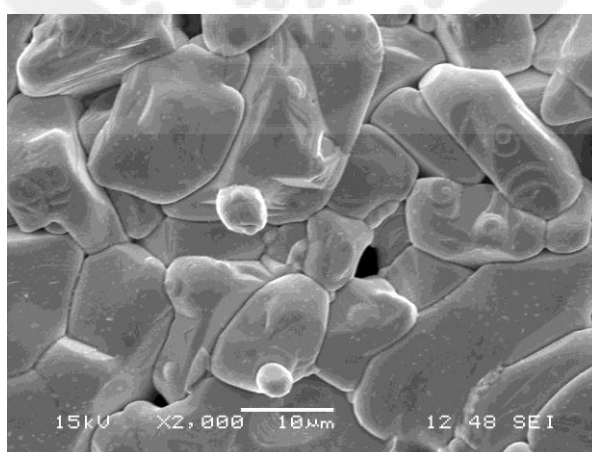
การทดลองนี้ใช้กำลังขยาย 500 1000 และ 2000 เท่า เพื่อศึกษาพื้นผิว ดังภาพประกอบ 33 ถึงภาพประกอบ 38 พบว่า ขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีขนาดใหญ่ และมีรูพรุนเล็กน้อย ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 บางบริเวณมีการกระจายตัวของเกรนไม่สม่ำเสมอ จึงเกิดช่องว่างระหว่างเกรนขึ้น แต่เมื่อมีการเจือเงิน (Ag₂O) ในตัวนำยวดยิ่ง Y156 พบว่ามีรูพรุนน้อยลง ช่องว่างระหว่างเกรนแคบลง ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเจือเงินในตัวนำยวดยิ่ง Y123 (Azambuja; et al. 2009: 638-644) ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วยเงินจะมีช่องว่างระหว่างเกรนขนาดเล็กลง เนื่องจากอนุภาคเงินจะเข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวนำยวดยิ่ง



ก)

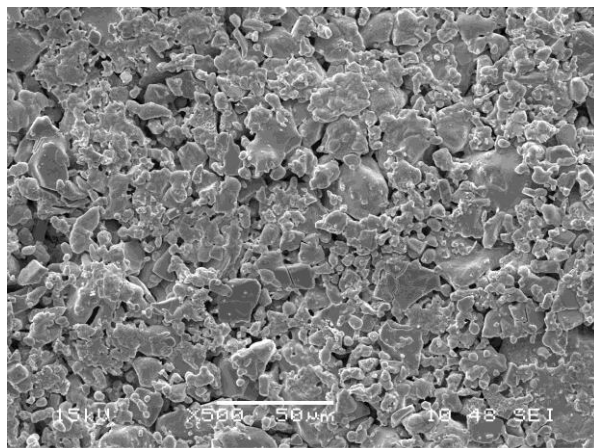


ข)

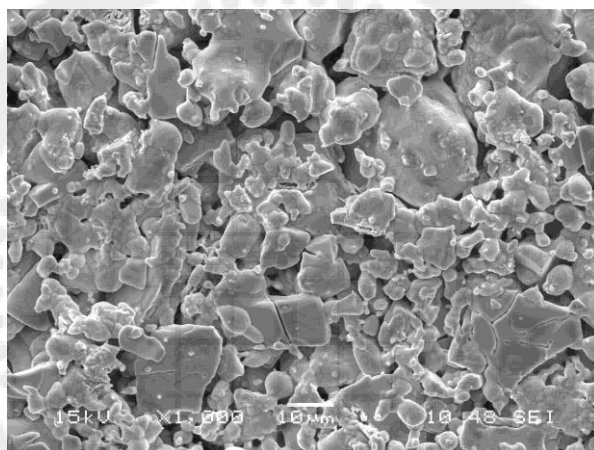


ค)

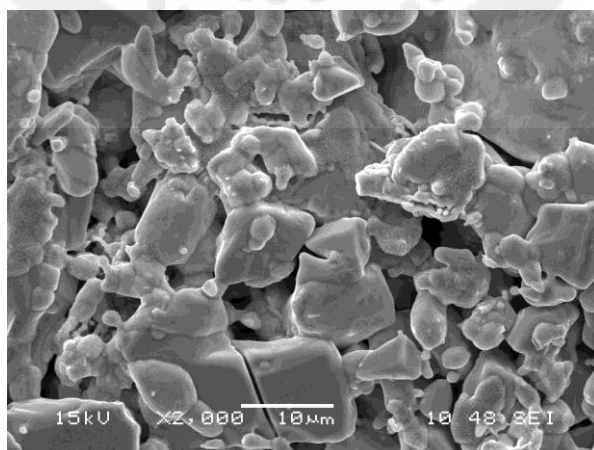
ภาพประกอบ 33 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า
ค) 2000 เท่า



ก)

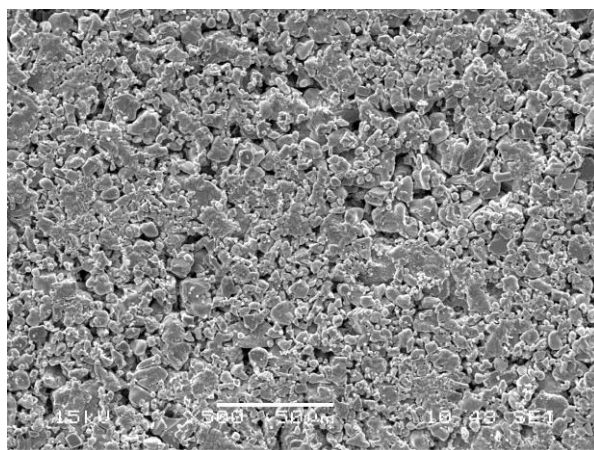


ข)

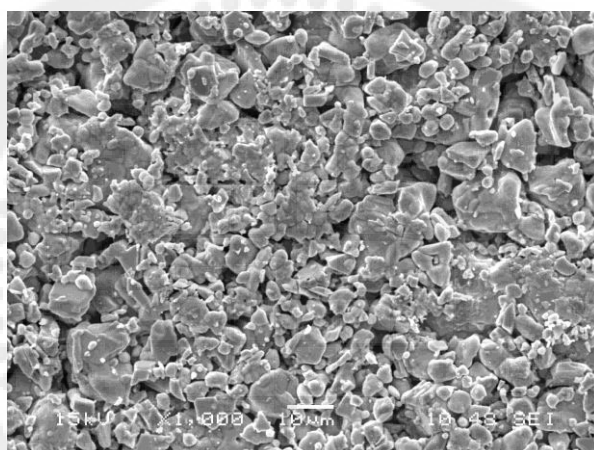


ค)

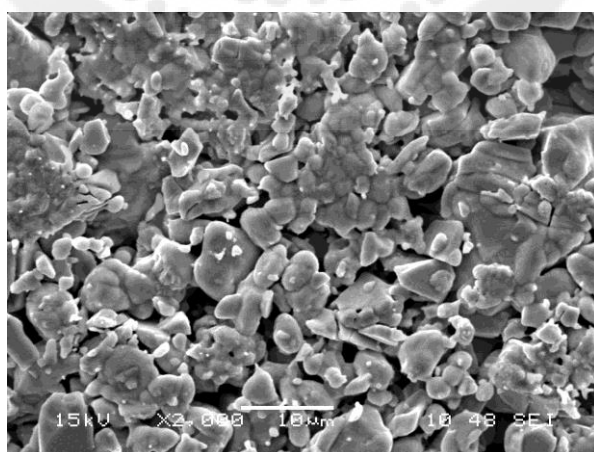
ภาพประกอบ 34 ภาพถ่ายลักษณะพื้นฐานของ Y156 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า
ค) 2000 เท่า



ก)

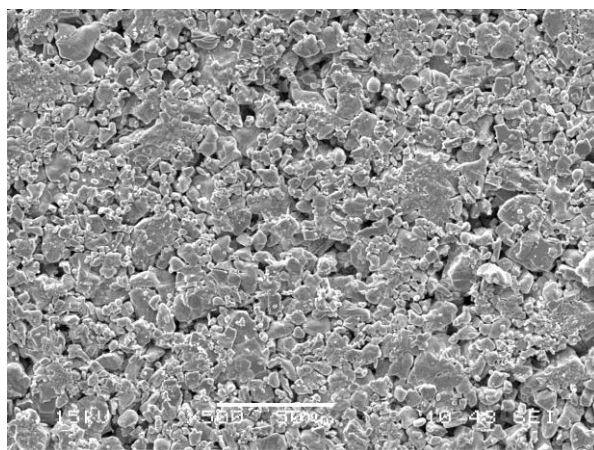


ข)

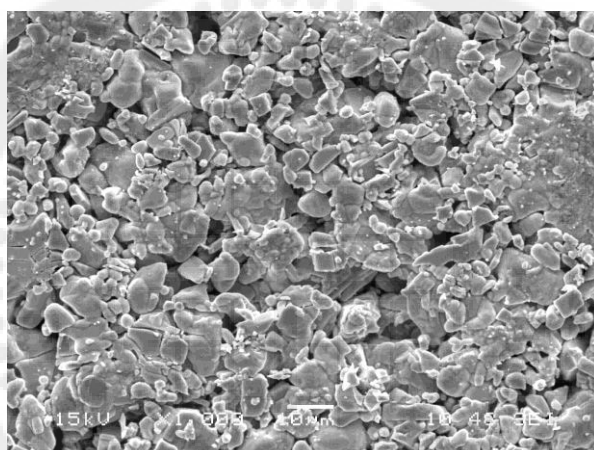


ค)

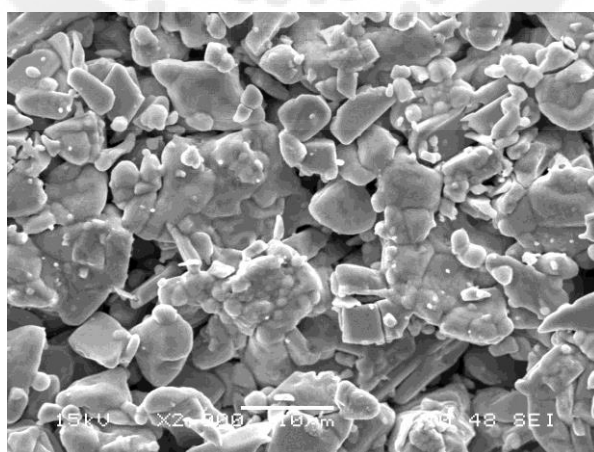
ภาพประกอบ 35 ภาพถ่ายลักษณะพื้นฐานของ Y156 + 0.05Ag₂O ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า
ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)

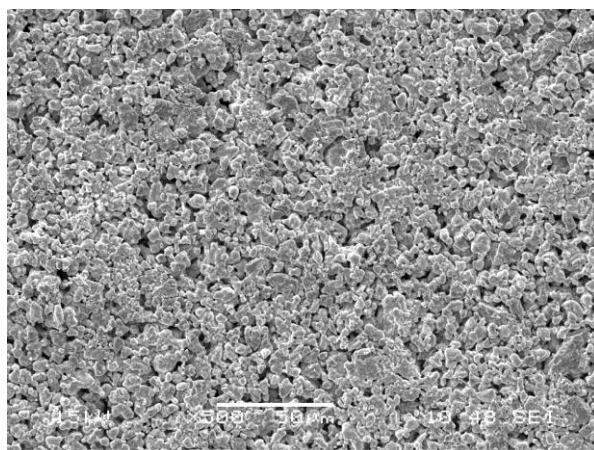


ข)

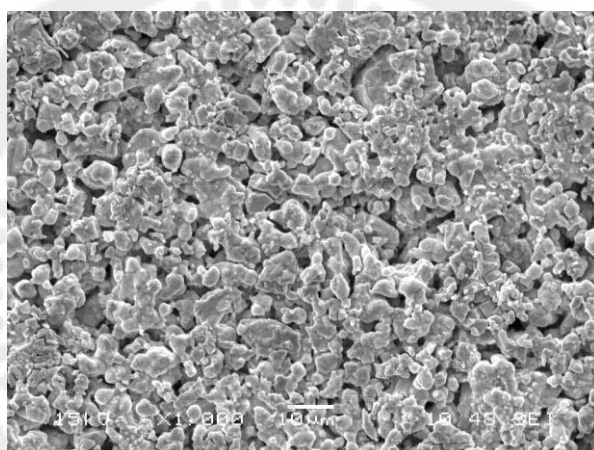


ค)

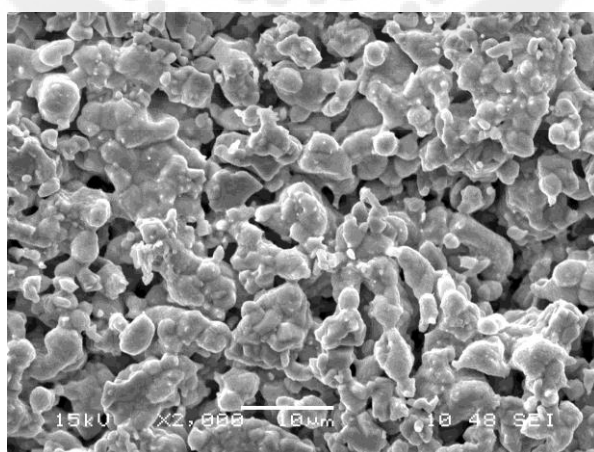
ภาพประกอบ 36 ภาพถ่ายลักษณะพื้นฐานของ Y156 + 0.10Ag₂O ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า
ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)

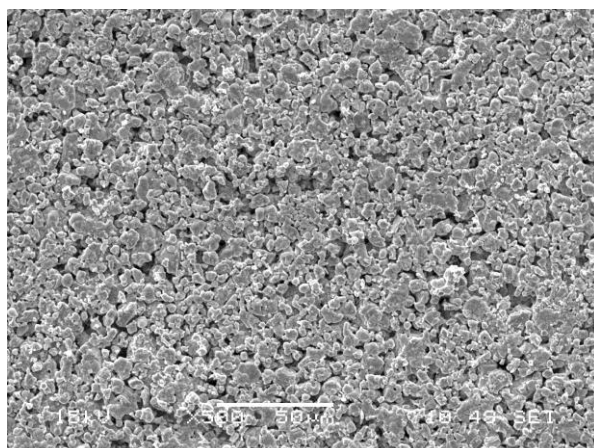


ข)

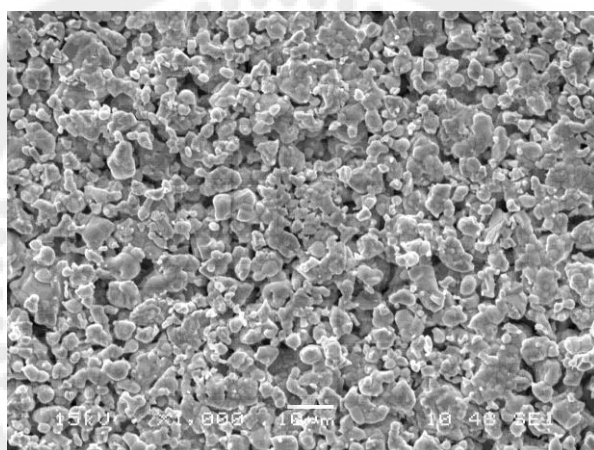


ค)

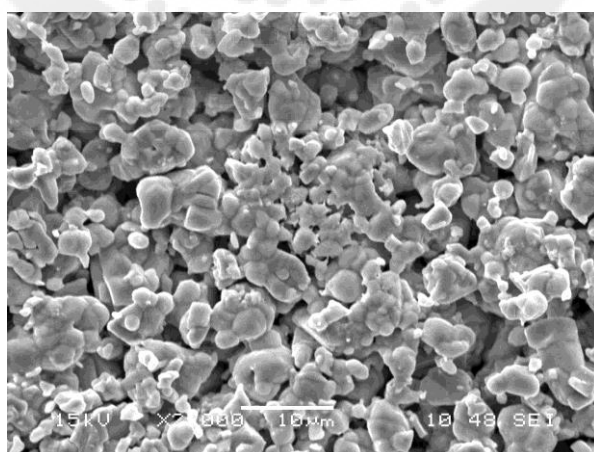
ภาพประกอบ 37 ภาพถ่ายลักษณะพื้นฐานของ Y156 + 0.15Ag₂O ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า
ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)



ข)

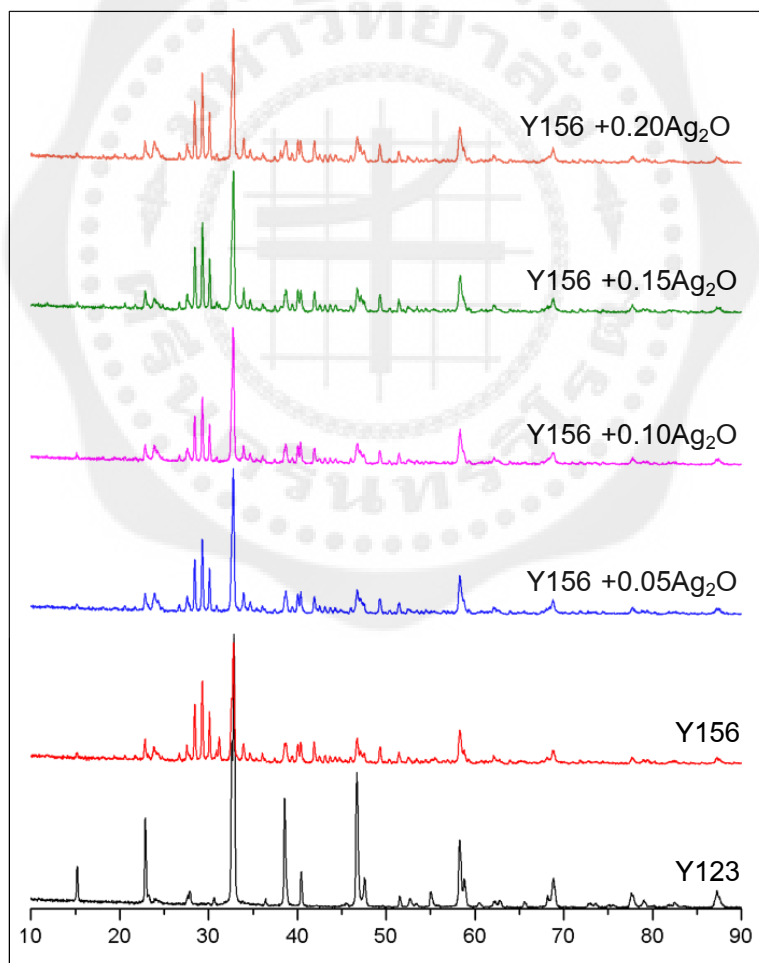


ค)

ภาพประกอบ 38 ภาพถ่ายลักษณะพื้นฐานของ Y156 + 0.20Ag₂O ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า
ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า

1.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่ง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะใช้เครื่องมือรุ่น D8 Discovery diffractometer โดยจะเริ่มวัดมุม 2θ จาก 10 องศา ถึง 90 องศา ด้วยอัตรา 0.02 องศาต่อวินาที โดยจะได้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 6 ตัวอย่าง ดังภาพประกอบ 39 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพروف ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถบ่งชี้รูปแบบของโครงสร้างผลึกที่เป็นส่วนผสม กลุ่มปริภูมิ และค่าคงตัวหน่วยเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบของสารได้ โดยพบว่าสารตัวอย่างทั้งหมดมีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก มีสารองค์ประกอบสองชนิด คือ สารนำยวดยิ่งและสารปกติ โดยสารนำยวดยิ่งมีกลุ่มปริภูมิแบบ Pmmm ส่วนสารปกติมีหลายกลุ่มปริภูมิ ได้แก่ $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ มีกลุ่มปริภูมิแบบ Pccm มีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก และ BaCuO_2 มีกลุ่มปริภูมิแบบ Im-3m มีรูปแบบโครงสร้างแบบคิวบิก ซึ่งสามารถแสดงค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่งและสารปกติได้ ดังตาราง 8

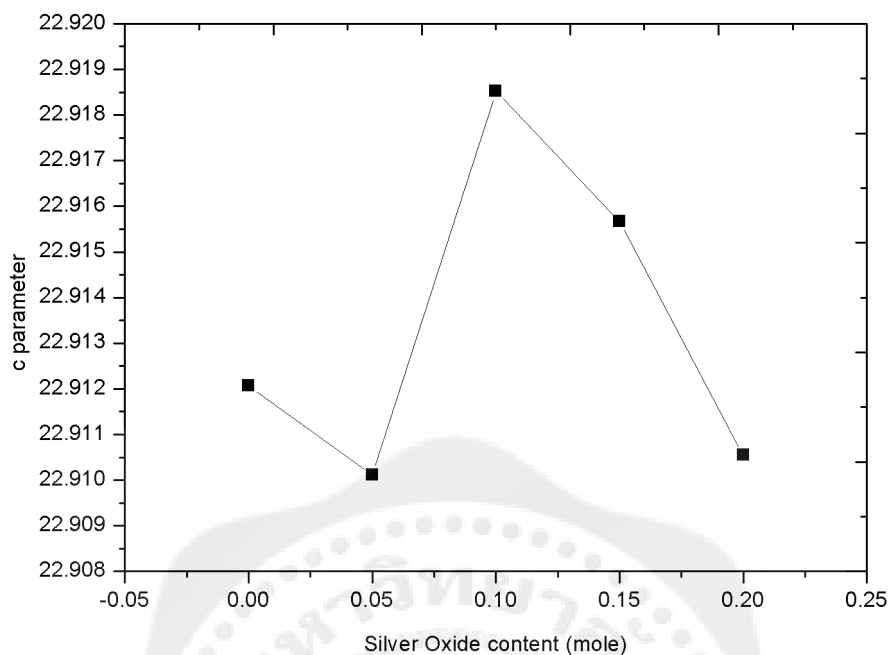


ภาพประกอบ 39 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่าง

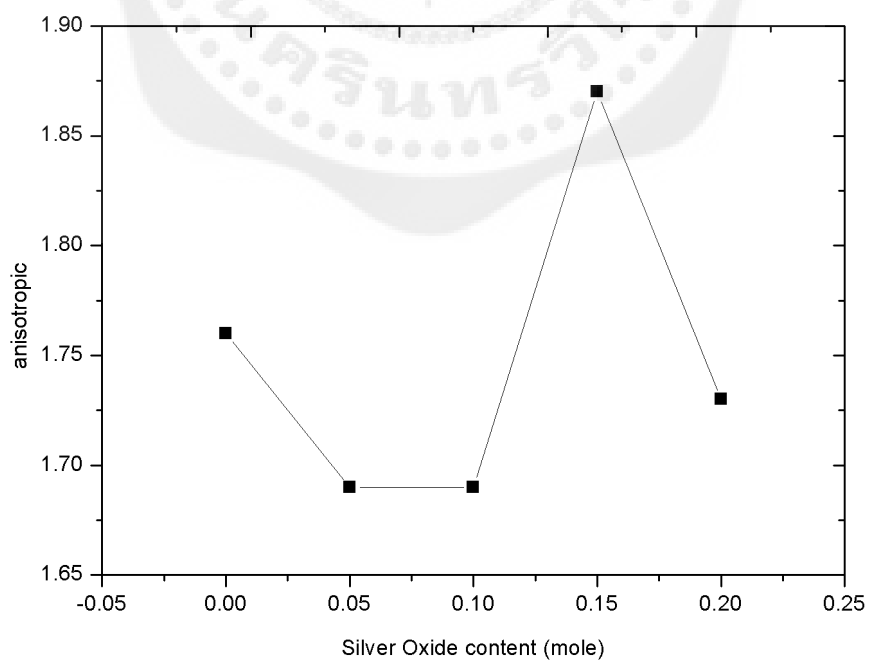
ตาราง 8 ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 6 ตัวอย่าง กลุ่มปริภูมิของสารนำยวดยิ่งและสารปกติ

ตัวนำยวดยิ่ง	หน่วยเซลล์ของ สารนำยวดยิ่ง			c/a	แอนไอโซ ทรอปิก	χ^2	หน่วยเซลล์ของสารปกติและกลุ่มปริภูมิ					
	Y123 Pmmm						Ba ₂ Cu ₃ O ₆			BaCuO ₂		
							Pccm			Im-3m		
	a (Å)	b (Å)	c (Å)				a (Å)	b (Å)	c (Å)	a (Å)	b (Å)	c (Å)
Y123	3.82643	3.89063	11.67231	3.0504	1.66	1.77	-	-	-	-	-	-
	0.00012	0.00012	0.00038									
Y156	3.81905	3.88694	22.91207	5.9994	1.76	1.13	13.03835	20.65148	11.42448	18.28995	18.28995	18.28995
	0.00013	0.00013	0.00071				0.00026	0.00039	0.00026	0.00034	0.00034	0.00034
Y156+0.05Ag ₂ O	3.82144	3.88676	22.91011	5.9952	1.69	1.19	13.04400	20.65989	11.43141	18.29771	18.29771	18.29771
	0.00015	0.00015	0.00095				0.00028	0.00041	0.00026	0.00037	0.00037	0.00037
Y156+0.10Ag ₂ O	3.82172	3.88675	22.91852	5.9969	1.69	1.11	13.04645	20.66220	11.43185	18.29970	18.29970	18.29970
	0.00015	0.00016	0.00133				0.00029	0.00041	0.00028	0.00039	0.00039	0.00039
Y156+0.15Ag ₂ O	3.81031	3.88212	22.91567	6.0141	1.87	1.15	13.02592	20.64625	11.41428	18.30313	18.30313	18.30313
	0.00016	0.00015	0.00085				0.00023	0.00042	0.00023	0.00035	0.00035	0.00035
Y156+0.20Ag ₂ O	3.82087	3.88759	22.91055	5.9962	1.73	1.18	13.04539	20.66019	11.43045	18.29746	18.29746	18.29746
	0.00014	0.00014	0.00111				0.00028	0.00042	0.00028	0.00037	0.00037	0.00037

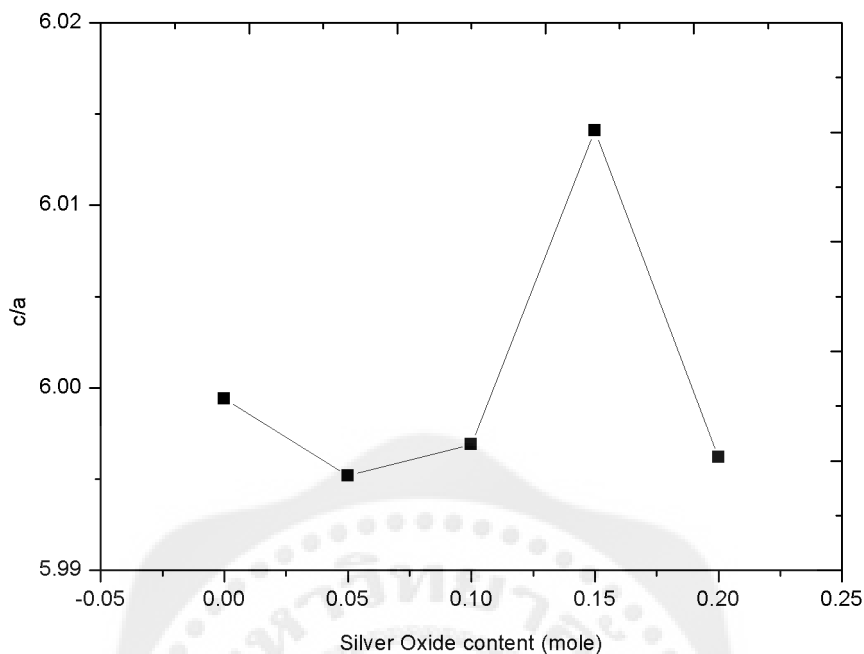
หมายเหตุ: แอนไอโซทรอปิก = $\frac{100(b-a)}{0.5(b+a)}$ เมื่อ a คือ ขนาดแกน a ของสารนำยวดยิ่ง และ b คือ ขนาดแกน b ของสารนำยวดยิ่ง



ภาพประกอบ 40 กราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) กับค่าของหน่วยเซลล์ของ แกน c ของสาร



ภาพประกอบ 41 กราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) กับแอนไอโซทรอปิก

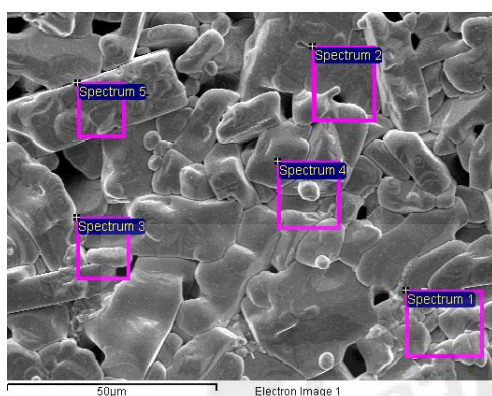


ภาพประกอบ 42 กราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) กับขนาดแกน c/a

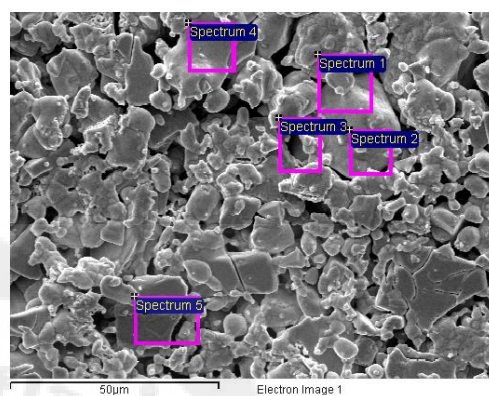
จากตาราง 8 เมื่อพิจารณาค่าของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่ง พบว่าค่าของหน่วยเซลล์ของแกน a และ b ของสารตัวอย่างทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 และ Y156 ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) มีค่ามากกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 หากพิจารณาในกลุ่มตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วยเงินในปริมาณต่าง ๆ พบว่าค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการเจือเงินจะทำให้ค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c เปลี่ยนน้อยมาก สามารถเขียนกราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) กับค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c ของสารได้ ดังภาพประกอบ 40 จากค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่งสามารถคำนวณหาค่าแอนไอโซทรอปิกหรือตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทาง จะเห็นได้ว่าการเจือเงินมีผลต่อค่าแอนไอโซทรอปิกโดยตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y156} + 0.15\text{Ag}_2\text{O}$ มีค่าแอนไอโซทรอปิกมากที่สุด รวมถึงขนาดแกน c/a ด้วย ซึ่งสามารถเขียนกราฟระหว่างปริมาณซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) กับแอนไอโซทรอปิก และขนาดแกน c/a ดังภาพประกอบ 41 และ 42 ตามลำดับ

1.4 ปริมาณธาตุของตัวนำวดยิ่ง

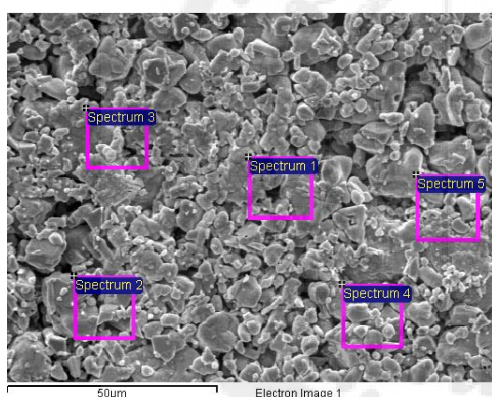
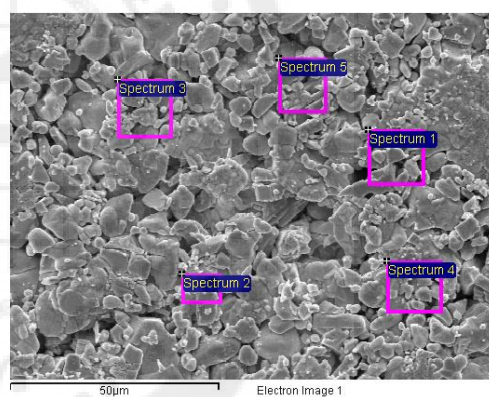
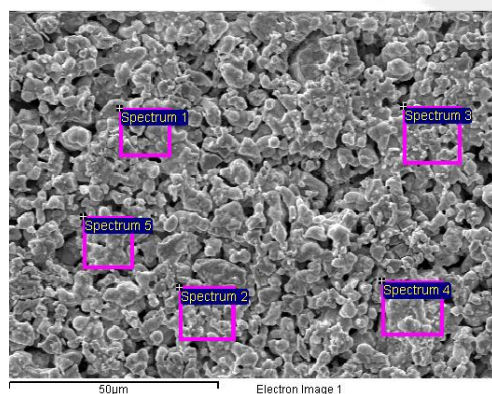
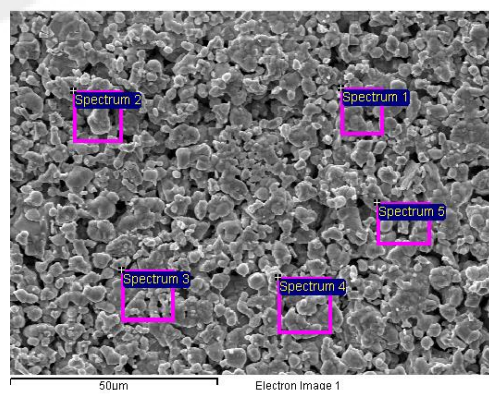
ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานแบบกระจายพลังงาน จะวิเคราะห์ห้องประกอบธาตุที่อยู่ภายในตัวนำวดยิ่งที่กำลังขยาย 1000 เท่า ซึ่งจะวิเคราะห์แบบสุ่ม 5 ตำแหน่ง ได้ผลการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณธาตุ ดังนี้



Y123



Y156

Y156 + 0.05Ag₂OY156 + 0.10Ag₂OY156 + 0.15Ag₂OY156 + 0.20Ag₂O

ภาพประกอบ 43 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของสารตัวอย่าง

ตาราง 9 ปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง

ตัวนำยวดยิ่ง	ตำแหน่ง	อิตเทรียม	แบเรียม	คอปเปอร์	ออกซิเจน	ซิลเวอร์
Y123	1	7.69	14.06	24.66	53.58	-
	2	7.57	13.53	24.61	54.29	-
	3	7.14	14.13	23.82	54.91	-
	4	7.32	16.66	23.51	52.51	-
	5	7.62	14.38	24.11	53.89	-
Y156	1	2.45	16.58	20.50	60.47	-
	2	1.54	19.29	20.33	58.84	-
	3	5.49	18.49	22.08	53.94	-
	4	0.00	16.45	22.47	61.08	-
	5	8.52	16.01	23.44	52.03	-
Y156 + 0.05Ag ₂ O	1	4.26	12.38	22.09	60.82	0.45
	2	4.86	13.50	21.44	60.19	0.00
	3	0.00	14.76	18.54	66.70	0.00
	4	1.94	15.69	20.34	61.47	0.56
	5	3.04	13.50	19.67	63.79	0.00
Y156 + 0.10Ag ₂ O	1	5.59	17.70	20.62	56.09	0.00
	2	5.67	16.51	21.34	55.39	1.09
	3	1.55	17.91	20.72	59.81	0.00
	4	2.02	18.07	19.56	60.34	0.00
	5	2.94	17.14	21.51	57.83	0.57
Y156 + 0.15Ag ₂ O	1	2.44	16.09	21.00	60.47	0.00
	2	3.75	15.50	20.88	59.15	0.72
	3	3.67	15.40	20.89	60.04	0.00
	4	0.77	16.27	19.98	62.98	0.00
	5	2.45	16.03	20.42	60.29	0.81
Y156 + 0.20Ag ₂ O	1	2.11	15.96	19.88	61.24	0.81
	2	2.74	16.67	19.11	60.89	0.58
	3	2.85	15.32	19.04	62.80	0.00
	4	1.12	14.20	17.42	67.27	0.00
	5	3.43	13.60	20.50	62.47	0.00

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ พบว่าสารแต่ละสูตรมีอัตราส่วนของอิตเทรียม แบเรียม คอปเปอร์ ออกซิเจน และซิลเวอร์ที่แตกต่างกัน โดยไม่พบสารอื่นเจือปน เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณอัตราส่วนของแต่ละสูตร โดยกำหนดให้อิตเทรียมเป็น 1 ส่วน แล้วคำนวณอัตราส่วนของแบเรียม คอปเปอร์ ออกซิเจน และซิลเวอร์ จะได้อัตราส่วนปริมาณธาตุต่าง ๆ ดังตาราง 10

ตาราง 10 อัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้เฉลี่ยเทียบกับอิตเทรียม

ตัวนำยวดยิ่ง	อิตเทรียม	แบเรียม	คอปเปอร์	ออกซิเจน	ซิลเวอร์
Y123	1	1.95	3.23	7.21	-
Y156	1	4.82	6.05	15.91	-
Y156 + 0.05Ag ₂ O	1	4.99	7.24	22.20	0.07
Y156 + 0.10Ag ₂ O	1	4.92	5.85	16.31	0.09
Y156 + 0.15Ag ₂ O	1	6.05	7.87	23.13	0.12
Y156 + 0.20Ag ₂ O	1	6.18	7.83	25.69	0.11

จากตาราง 10 พบว่าอัตราส่วนของแบเรียม คอปเปอร์ ออกซิเจน และซิลเวอร์ มีค่าไม่ตรงกับปริมาณของสารตั้งต้นที่ใส่เข้าไป บางบริเวณไม่พบซิลเวอร์ แสดงว่าสารที่เตรียมขึ้นมีการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ไม่สม่ำเสมอ

2. ปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง

การหาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน วิธีนี้ทำให้ได้ปริมาณของ Cu²⁺ และ Cu³⁺ จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณพร่องออกซิเจน (z) โดยคำนวณจากผลรวมของเลขออกซิเดชันของทุกอะตอมของธาตุในสารประกอบมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยใช้เลขออกซิเดชันดังนี้ อิตเทรียม (+3) แบเรียม (+2) คอปเปอร์พิจารณาด้วยเปอร์เซ็นต์ของ Cu²⁺ คือ (+2) และ Cu³⁺ คือ (+3) ออกซิเจน (-2) และซิลเวอร์ (-1)

สารตัวอย่าง Y123 มีสูตรเคมี YBa₂Cu₃O_{7-z} สารตัวอย่าง Y156 มีสูตรเคมี YBa₅Cu₆O_{13-z} ส่วนสารตัวอย่าง Y156 ที่เจือด้วยเงิน มีสูตรเคมี YBa₅Cu₆O_{13-z}Ag_x โดยที่ x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณออกซิเจน และแสดงสูตรเคมีของสารได้ ดังตาราง 11 และแสดงปริมาณ Cu³⁺/Cu²⁺ และเปอร์เซ็นต์พร่องออกซิเจน ดังตาราง 12

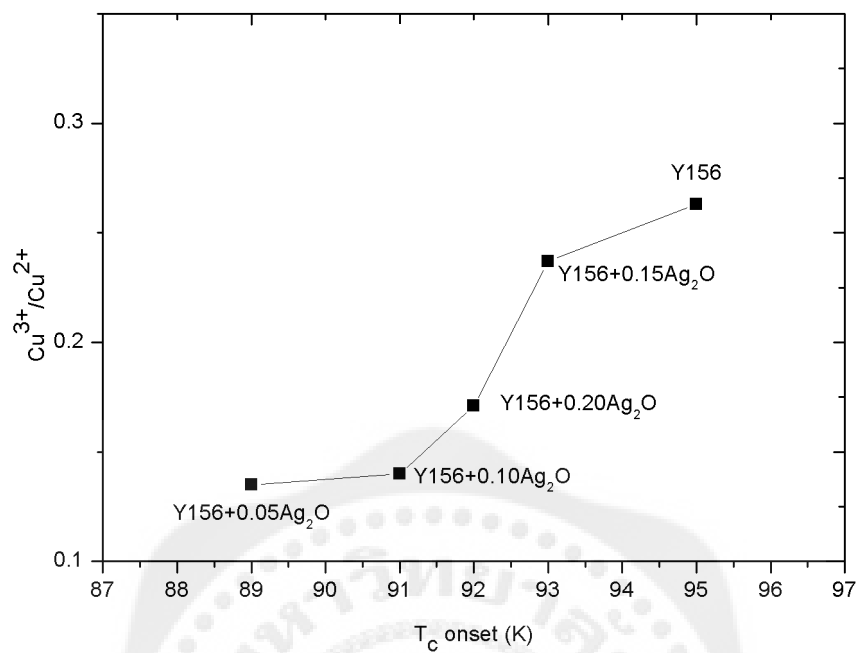
ตาราง 11 จำนวนโมลของทองแดง ปริมาณออกซิเจน และสูตรเคมี

ตัวนำยวดยิ่ง	จำนวนโมลของทองแดง ($\times 10^{-6}$)			Z	ปริมาณออกซิเจน (O_y)	สูตรเคมี
	Cu^{2+}	Cu^{3+}	$Cu^{2+} + Cu^{3+}$			
Y123	8.494	2.692	11.186	0.139	6.861	$YBa_2Cu_3O_{6.861}$
Y156	8.460	2.223	10.683	0.127	12.873	$YBa_5Cu_6O_{12.873}$
Y156 + 0.05Ag ₂ O	8.015	1.082	9.097	0.093	12.907	$YBa_5Cu_6O_{12.907}Ag_{0.1}$
Y156 + 0.10Ag ₂ O	8.550	1.914	10.464	0.149	12.851	$YBa_5Cu_6O_{12.851}Ag_{0.2}$
Y156 + 0.15Ag ₂ O	8.297	1.964	10.261	0.226	12.774	$YBa_5Cu_6O_{12.774}Ag_{0.3}$
Y156 + 0.20Ag ₂ O	8.705	1.487	10.192	0.138	12.862	$YBa_5Cu_6O_{12.862}Ag_{0.4}$

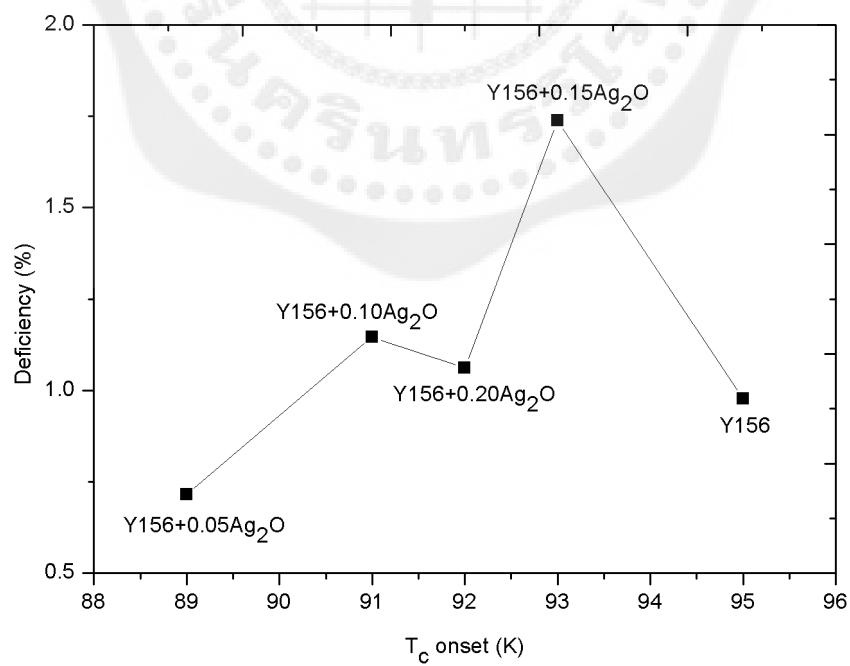
ตาราง 12 ปริมาณ Cu^{3+}/Cu^{2+} ปริมาณออกซิเจน เปอร์เซ็นต์ฟร้งออกซิเจน และอุณหภูมิวิกฤต

ตัวนำยวดยิ่ง	ปริมาณ Cu^{3+}/Cu^{2+}	ปริมาณออกซิเจน (O_y)	เปอร์เซ็นต์ฟร้งออกซิเจน (%)	อุณหภูมิวิกฤต ออนเซต (เคลวิน)
Y123	0.317	6.861	1.986	91
Y156	0.263	12.873	0.977	95
Y156 + 0.05Ag ₂ O	0.135	12.907	0.715	89
Y156 + 0.10Ag ₂ O	0.140	12.851	1.146	91
Y156 + 0.15Ag ₂ O	0.237	12.774	1.738	93
Y156 + 0.20Ag ₂ O	0.171	12.862	1.062	92

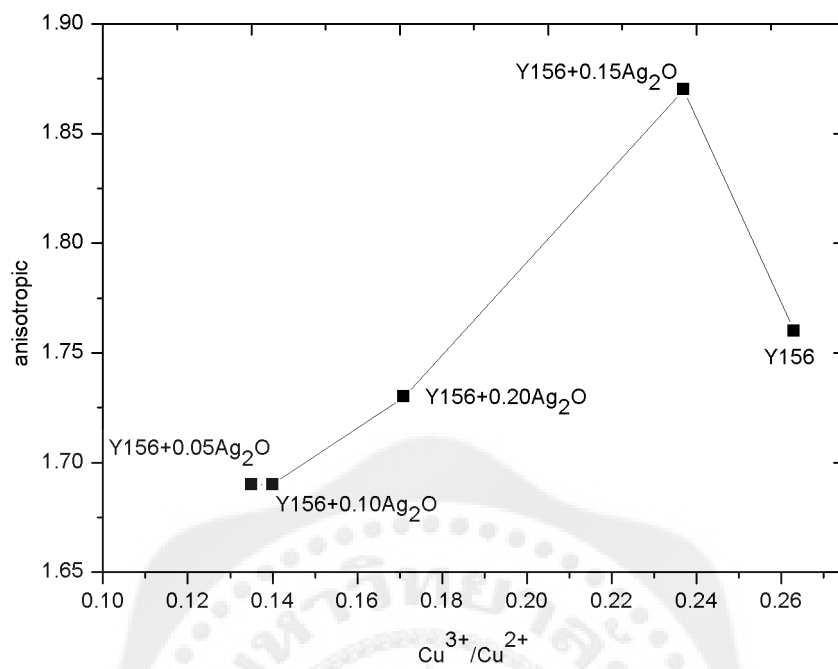
จากตาราง 11 และตาราง 12 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} มากที่สุด คือ 0.317 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต 91 เคลวิน มีเปอร์เซ็นต์ฟร้งออกซิเจน คือ 1.986% หากพิจารณาในกลุ่มตัวอย่าง Y156 และ Y156 ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} มากที่สุด คือ 0.263 และมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงสุด คือ 95 เคลวิน ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O มีอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} น้อยที่สุด คือ 0.135 และยังมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตต่ำสุด คือ 89 เคลวิน แสดงว่า อุณหภูมิวิกฤตออนเซตของกลุ่มตัวอย่าง Y156 ที่เจือด้วยเงิน มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} กล่าวคือ เมื่อตัวนำยวดยิ่งมีอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} สูง จะมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงขึ้นด้วย สามารถเขียนกราฟระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} ดังภาพประกอบ 44 นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} ในตัวนำยวดยิ่งมีผลต่อค่าแอนไอโซทรอปิกและขนาดแกน c/a ซึ่งสามารถเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วน Cu^{3+}/Cu^{2+} กับแอนไอโซทรอปิก และขนาดแกน c/a ดังภาพประกอบ 46 และ 47



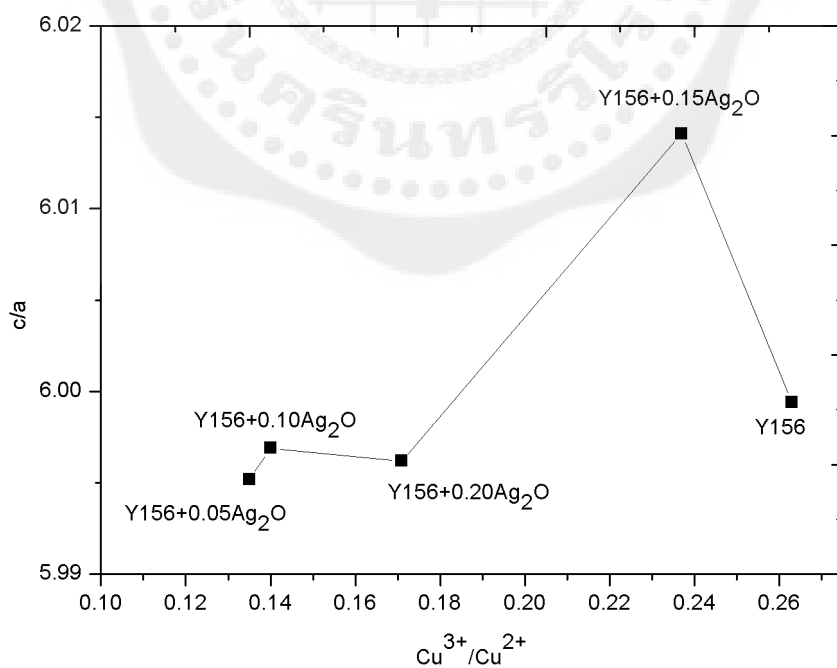
ภาพประกอบ 44 กราฟระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$



ภาพประกอบ 45 กราฟระหว่างอุณหภูมิวิกฤตและเปอร์เซ็นต์พร่องออกซิเจน



ภาพประกอบ 46 กราฟระหว่างอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ กับแอนไอโซทรอปิก



ภาพประกอบ 47 กราฟระหว่างอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ กับขนาดแกน c/a

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากบทที่ 4 ผลการวิจัย เป็นผลการทดลองจากการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_y$ ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) และทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง ได้แก่ ศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ลักษณะสัญญาณ ปริมาณธาตุ ลักษณะโครงสร้าง และปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาอิทธิพลจากการเจือเงิน (Ag_2O) ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง โดยผู้วิจัยได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-z} + x\text{Ag}_2\text{O}$ ($x = 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) ใช้สารตั้งต้น คือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) จากนั้นนำสารตั้งต้นที่ผสมกันตามสัดส่วนเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อน ได้แก่ กระบวนการเผาผง และกระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ส่วนกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งด้วยการวัดแบบ 4 ขั้ว พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีอุณหภูมิวิกฤตอ่อนสุดสูงที่สุด คือ 95 เคลวิน ซึ่งสูงกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่มีอุณหภูมิวิกฤตอ่อนสุด 91 เคลวิน ส่วนในกลุ่มตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่มีการเจือด้วยเงิน พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y156} + 0.15\text{Ag}_2\text{O}$ มีอุณหภูมิวิกฤตอ่อนสุดสูงที่สุดที่ 93 เคลวิน และตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y156} + 0.05\text{Ag}_2\text{O}$ มีอุณหภูมิวิกฤตอ่อนสุดต่ำสุดที่ 89 เคลวิน

จากการศึกษาลักษณะสัญญาณด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีขนาดใหญ่ และมีรูพรุนเล็กน้อย ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีขนาดเกรนเล็กกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 อย่างเห็นได้ชัด บางบริเวณมีการกระจายตัวของเกรนไม่สม่ำเสมอ จึงเกิดช่องว่างระหว่างเกรนขึ้น แต่เมื่อมีการเจือเงิน (Ag_2O) ในตัวนำยวดยิ่ง Y156 พบว่ามีรูพรุนน้อยลง ช่องว่างระหว่างเกรนแคบลง และสำหรับการศึกษาปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน พบว่าสารแต่ละสูตรมีอัตราส่วนของอิตเทรียม แบเรียม คอปเปอร์ออกซิเจน และซิลเวอร์ มีค่าไม่ตรงกับปริมาณของสารตั้งต้น และไม่พบสารอื่นเจือปน

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมฟูลพรอพ พบว่าสารตัวอย่างทั้งหมดมีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก มีสารองค์ประกอบที่เป็นเฟสส่วนผสมสองชนิด คือ สารนำยวดยิ่งและสารปกติ โดยสารนำยวดยิ่งมีกลุ่มปริภูมิแบบ Pmmm ส่วนสารปกติมีหลายกลุ่มปริภูมิ ได้แก่ ได้แก่ $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ มีกลุ่มปริภูมิแบบ Pccm และ BaCuO_2 มีกลุ่มปริภูมิแบบ Im-3m เมื่อพิจารณาค่าของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่ง

พบว่าค่าของหน่วยเซลล์ของแกน a และ b ของสารตัวอย่างทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วยเงิน (Ag_2O) มีค่ามากกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 หากพิจารณาในกลุ่มตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วยเงินในปริมาณต่าง ๆ พบว่าค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการเจือเงินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของหน่วยเซลล์ของแกน c น้อยมาก และเมื่อพิจารณาค่าแอนไอโซทรอปิก จะเห็นได้ว่าการเจือเงินมีผลต่อค่าแอนไอโซทรอปิกและขนาดแกน c/a

จากการศึกษาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน สำหรับสารตัวอย่าง Y123 มีสูตรเคมี $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$ สารตัวอย่าง Y156 มีสูตรเคมี $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-z}$ ส่วนสารตัวอย่าง Y156 ที่เจือด้วยเงิน มีสูตรเคมี $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-z}\text{Ag}_x$ โดยที่ $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ วิธีนี้ทำให้ได้ปริมาณของ Cu^{2+} และ Cu^{3+} จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณพร่องออกซิเจน (z) จากการศึกษ พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ เท่ากับ 0.317 มีค่า z เท่ากับ 0.137 และมีเปอร์เซ็นต์พร่องออกซิเจน คือ 1.986% หากพิจารณาในกลุ่มตัวอย่าง Y156 และ Y156 ที่เจือด้วยเงิน พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ มากที่สุด คือ 0.263 และมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงสุด คือ 95 เคลวิน ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 + $0.05\text{Ag}_2\text{O}$ มีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ น้อยที่สุด คือ 0.135 และยังมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตต่ำสุด คือ 89 เคลวิน แสดงว่า เมื่อตัวนำยวดยิ่งมีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ สูง จะมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ มีผลต่อค่าแอนไอโซทรอปิกและขนาดแกน c/a

อภิปรายผลการวิจัย

จากการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$ และ $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-z} + x\text{Ag}_2\text{O}$ ($x = 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) เพื่อศึกษาอิทธิพลจากการเจือเงิน (Ag_2O) ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ผลจากการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งด้วยการวัดแบบ 4 ขั้ว เพื่อหาอุณหภูมิวิกฤตของสาร พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต 91 เคลวิน ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 เป็นอย่างมาก คือ 95 เคลวิน ซึ่งอุณหภูมิวิกฤตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ในงานวิจัยของอุดมสมุทรหิรัญและคณะ (Udomsamuthirun; & et al. 2010: 1377-1380) ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่มีการเจือเงินทั้งหมดมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่ไม่ได้เจือ โดยในสารกลุ่มที่มีการเจือเงิน พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y156 + $0.15\text{Ag}_2\text{O}$ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงสุดที่ 93 เคลวิน และตัวนำยวดยิ่ง Y156 + $0.05\text{Ag}_2\text{O}$ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตต่ำสุดที่ 89 เคลวิน โดยไม่สอดคล้องกับการเจือเงินในตัวนำยวดยิ่ง Y358 (Metin; & Tepe. 2016: 1083-1087) ที่พบว่าการเจือเงินทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น อาจเป็นเพราะมีวิธีการเตรียมไม่เหมือนกัน โดยในงานวิจัยของเมทิน และเทเป มีการเจือเงินโดยให้เงินเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของทองแดงในตัวนำยวดยิ่ง Y358

เมื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแบบอโรรอมบิก สามารถจำแนกสารที่เป็นองค์ประกอบของเฟส ส่วนผสมได้ 2 ชนิด คือ สารนำยวดยิ่งและสารปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ โดยพบว่าบางตำแหน่งไม่พบอิตเทรียม และบางตำแหน่งไม่พบซิลเวอร์ โดยเมื่อวิเคราะห์ภาพถ่าย ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความพรุน ซึ่งผลการเจือเงินในตัวนำยวดยิ่ง Y156 พบว่ามีรูพรุนน้อยลง ช่องว่างระหว่างเกรนแคบลง สอดคล้องกับการเจือเงินในตัวนำยวดยิ่ง Y134 (Sripawatakul; & et al. 2016: 46-50) และตัวนำยวดยิ่ง Y145 (Panklang; & et al. 2016: 57-60) ที่พบว่าการเจือเงินทำให้เกิดการปรับปรุงลักษณะสัณฐาน

เมื่อศึกษาปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลง ปริมาณ Cu^{3+} และ Cu^{2+} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของทองแดงที่อยู่ในสารตัวนำยวดยิ่ง พบว่าอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ มีผลต่ออุณหภูมิวิกฤต โดยตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่มีปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ สูง จะมีอุณหภูมิวิกฤตสูงด้วย ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของสุภदनัยสรและคณะ (Supadanaison; & et al. 2017: 51-55) ที่เจือเงินในตัวนำยวดยิ่ง Y134 และ Y145 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ ในตัวนำยวดยิ่งมีผลต่อโครงสร้างในตัวนำยวดยิ่ง โดยเมื่อพิจารณาตัวนำยวดยิ่งที่มีการเจือเงิน ตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y156} + 0.15\text{Ag}_2\text{O}$ มีอัตราส่วน $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้มีค่าแอนไอโซทรอปิกและขนาดแกน c/a สูงสุด ส่งผลให้ตัวนำยวดยิ่งนี้มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดด้วย แสดงว่าเจือเงินในตัวนำยวดยิ่งในปริมาณต่าง ๆ กัน มีผลต่อค่าแอนไอโซทรอปิก รวมถึงมีผลต่ออุณหภูมิวิกฤตด้วย

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลจากการเจือเงิน (Ag_2O) ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ซึ่งเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ควรมีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งเพิ่มอีก ยกตัวอย่างเช่น การหาค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต (J_c) ค่าความแข็ง หรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเจือเงินทำให้เกิดการปรับปรุงลักษณะสัณฐาน ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ผล และหาความสัมพันธ์ได้อย่างละเอียดและชัดเจนมากขึ้น



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จิตติพงษ์ เครือหงส์. (2550). การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม $Y-Ba-CuO$. ปรินญานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- จิตติพงษ์ เครือหงส์. (2554). การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม $YBaCuO$. ปรินญานิพนธ์ ปร.ด. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- ปิยะมาศ ไชยนอก. (2557). สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง $YBa_2Cu_3O_{y-x}F_x$ และ $YBa_3Cu_4O_{y-x}F_x$. ปรินญานิพนธ์ ปร.ด. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ. (2559). ตัวนำยวดยิ่งพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Akyuz, B.; et al. (2011). The Effect of Sb Substitution on Structural Properties in $YBa_2Cu_3O_7$ Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 24: 2189-2201.
- Azambuja, P.; et al. (2009) Effects of Ag Addition on Some Physical Properties of Granular $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Superconductor. *Brazilian Journal of Physics*. 39: 638-644.
- Bednorz, J. G.; & Muller, K. A. (1986). Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. *Zeitschrift für Physik B*. 64: 189-193.
- Bolat, S.; & Kutuk, S. (2012). Fabrication of the New $Y_3Ba_5Cu_8O_y$ Superconductor Using Melt-Power-Melt-Growth Method and Comparison with $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 25: 731-738.
- Buckel, W. (1991). *Superconductivity: Fundamental and Application*. New York: VCH Publisher, Inc.
- Chainok, P.; et al. (2015). Some properties of $YBa_mCu_{1+m}O_y$ ($m = 2, 3, 4, 5$) superconductors. *Int. J. Mod. Phys*. 29: 1-14.
- Choy, J. H.; et al. (1988). Determination of the Copper Valency and the Oxygen Deficiency in the High T_c Superconductor, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. *Bull. Korean Chem. Soc*. 9: 289-291.
- Dong Han Ha; & et al. (2001). Effects of Cation Substitution on the Oxygen Loss in YBCO Superconductors. *Journal of the Korean Physics Society*. 39: 1041-1045.

- Meissner, W.; & Ochsenfeld, R. (1933). Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*. 44: 787-788.
- Metin, T.; & Tepe, M. (2016). The Effect of Ag Doping on the Superconducting Properties of $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_{8-x}\text{Ag}_x\text{O}_{18-\delta}$ Ceramics. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 30: 1083-1087.
- Monospektra. (2017). *Drives and Positioning Systems for Electron Microscopes*. Retrieved July 24, 2017, from <http://www.monospektra.com/positioning/applications/drives-positioning-systems-electron-microscopes/>
- Murase, S.; et al. (2001). Critical temperature measurement method of composite superconductors. *Physica C*. 357-360: 1197-1200.
- Panklang, T.; et al. (2016). Effect of Ag_2O Doping on Some Physical Properties Y145 Superconductor. *Applied Mechanics and Materials*. 851: 57-60.
- Rani, P.; Jha, R.; & Awana, V.P.S. (2013). AC Susceptibility Study of Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}\text{Ag}_x$ Bulk Composites ($x = 0.0-0.20$): The Role of Intra and Intergranular Coupling. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 26: 2347-2352.
- Rodríguez-Carvajal, J. *An introduction to the Program Fullprof 2000*. France: Laboratoire Leon Brillouin (CEA-CNRS).
- Sahoo, M.; & Behera, D. (2014). Effect of Ti Doping on Structural and Superconducting Property of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ High T_c Superconductor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 27: 83-93.
- Shao, M.; et al. (1989). Effect of Ag-doping on critical current densities in high T_c superconducting materials of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. *Materials Research Bulletin*. 24: 1369-1373.
- Sripawatakul, N.; et al. (2016). Investigate Effect of Ag_2O Adding on Y134 Superconductor. *Applied Mechanics and Materials*. 851: 46-50.
- Stoyanova-Ivanova, A.; et al. (2006). Superconducting REBCO (RE = Y, Eu, Er) Ceramics with Ca Substitution. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 41: 25-28.
- Supadanaison, R.; et al. (2017). Determination of Cu^{2+} and Cu^{3+} by Titration in Y134 and Y145 superconductor. *Applied Mechanics and Materials*. 852: 51-55.
- Udomsamuthirun, P.; et al. (2010). The New Superconductors of YBaCuO Materials. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 23: 1377-1380.

Wikipedia. (2017). *X-ray crystallography*. Retrieved August 29, 2017, from https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography

Wu, M. K.; et al. (1987). Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letters*. 58: 908-910.

Zheng, X. G.; et al. (1998). Superconducting Properties of Silver-Doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ and $\text{Y}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$. *Materials Research Bulletin*. 33: 1213-1219.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ชุดการทดลองเกี่ยวกับตัวนำวยดยงที่สามารถนำไปใช้ในห้องเรียน

เนื่องจากตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เช่น มีความต้านทานเป็นศูนย์เมื่อถึงอุณหภูมิวิกฤต การยกตัวด้วยแม่เหล็ก (Magnetic levitation) หรือปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอการทดลองอย่างง่ายที่สามารถนำไปสาธิตหรือทดลองในห้องเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความเข้าใจและสนใจตัวนำยวดยิ่งมากขึ้น

การทดลองนี้สอดคล้องกับหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ สาระที่ 5 พลังงาน มาตรฐาน ว 5.1 หน่วยการเรียนรู้ไฟฟ้ากระแสหัวข้อ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทาน

การทดลอง ปรากฏการณ์ไมสเนอร์

เป็นการทดลองที่ใช้ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงเพื่อสาธิตคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง หรือปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect) คือ เมื่อตัวนำยวดยิ่งถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนสถานะอยู่ในสภาพนำยวดยิ่ง มีสมบัติเป็นแม่เหล็กไดอาที่สมบูรณ์ (Perfect diamagnetism) จากนั้นเมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไม่สามารถพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ โดยถ้าทำการทดลองโดยวางตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตไว้เหนือแท่งแม่เหล็ก ตัวนำยวดยิ่งจะลอยนิ่ง ๆ เหนือแท่งแม่เหล็กได้

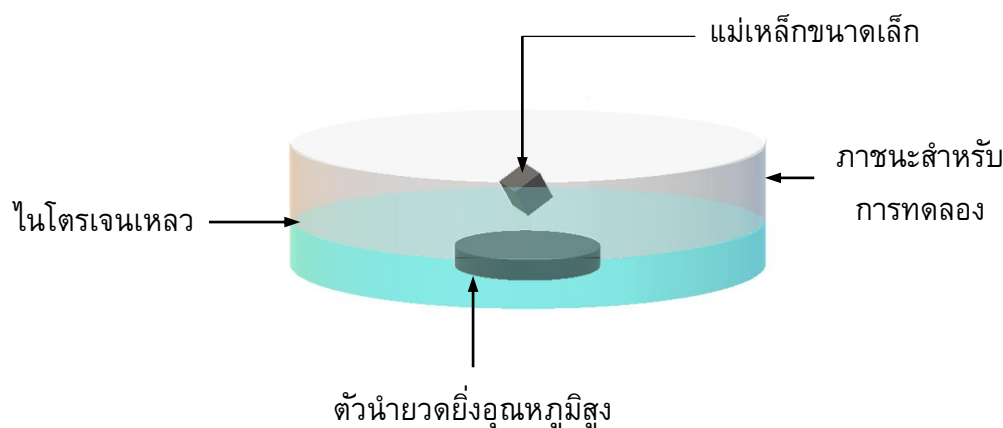
อุปกรณ์การทดลอง

1. ภาชนะสำหรับการทดลอง เช่น สไตระโฟม (Styrofoam)
2. แม่เหล็กขนาดเล็ก
3. ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง เช่น Y123 Y156
4. แหนบคีม
5. ไนโตรเจนเหลว (ผู้สอนควรให้คำแนะนำในการใช้)

วิธีการทดลอง

1. วางตัวนำยวดยิ่งในภาชนะ จากนั้นวางแม่เหล็กขนาดเล็กลงบนผิวของตัวนำยวดยิ่ง ให้นักเรียนสังเกตแม่เหล็กขนาดเล็ก
2. เทไนโตรเจนเหลวลงในภาชนะจนมีระดับเดียวกับผิวด้านบนของตัวนำยวดยิ่ง หลังจากผ่านไป 1-2 นาที ให้นักเรียนสังเกตแม่เหล็กขนาดเล็กอีกครั้ง จะพบว่าแม่เหล็กจะลอยอยู่เหนือตัวนำยวดยิ่ง
3. เพื่อรักษาสภาพนำยวดยิ่งให้เต็มไนโตรเจนเหลวลงในภาชนะ ใช้แหนบคีมกดแม่เหล็กลงบนผิวของตัวนำยวดยิ่ง ให้นักเรียนสังเกตการลอยตัวของแม่เหล็ก

ข้อควรระวัง ควรระมัดระวังการกระเด็นระหว่างเทไนโตรเจนเหลว และอย่าใช้มือสัมผัสสิ่งใด ๆ ที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว



ภาพประกอบ 48 ชุดการทดลองแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์

หลังจากสาธิตหรือทำการทดลองปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ผู้สอนอาจตั้งคำถามให้นักเรียนอภิปรายร่วมกัน

ตัวอย่างคำถาม

- ทำไมต้องเทไนโตรเจนเหลวลงในภาชนะ บริเวณรอบ ๆ ตัวนำยวดยิ่ง
แนวคำตอบ: เพื่อให้ตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนสถานะอยู่ในสภาพนำยวดยิ่ง ทำให้เกิดแรงผลักขึ้นระหว่างตัวนำยวดยิ่งกับแม่เหล็ก
- เมื่อไนโตรเจนเหลวระเหยไป แต่แม่เหล็กจะลอยอยู่อีกสักครู่ เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น
แนวคำตอบ: เนื่องจากเมื่อไนโตรเจนเหลวระเหยไป แต่ตัวนำยวดยิ่งยังมีอุณหภูมิต่ำอยู่
- ให้นักเรียนค้นคว้านวัตกรรมหรือเทคโนโลยีที่มีการประยุกต์ใช้ตัวนำยวดยิ่ง
แนวคำตอบ:
 - เครื่องเร่งอนุภาคกำลังสูง เป็นเครื่องมือสำหรับทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้ามีพลังงานจลน์สูงมากเพื่อใช้วิจัยทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ ฟิสิกส์อนุภาค โดยใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในตัวนำยวดยิ่ง
 - รถไฟความเร็วสูง ขณะเคลื่อนที่ตัวรถจะยกตัวขึ้นเหนือรางเล็กน้อย เนื่องจากแรงผลักของสนามแม่เหล็กระหว่างรางกับตัวรถ และตัวนำยวดยิ่งทำให้แรงเสียดทานน้อยมาก รถไฟจึงเคลื่อนที่ได้เร็ว

ภาคผนวก ข

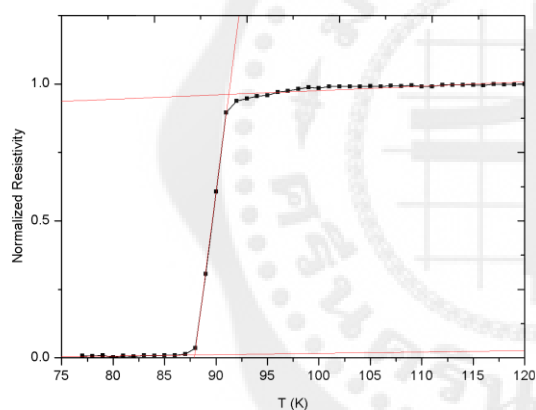
- ตารางแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยั้งแต่ละสูตร
- ภาพแสดงการหา $T_{c\text{ onset}}$ และ $T_{c\text{ offset}}$ ของตัวนำวยดยั้งแต่ละสูตร

ตาราง 13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยวดยิ่ง Y123

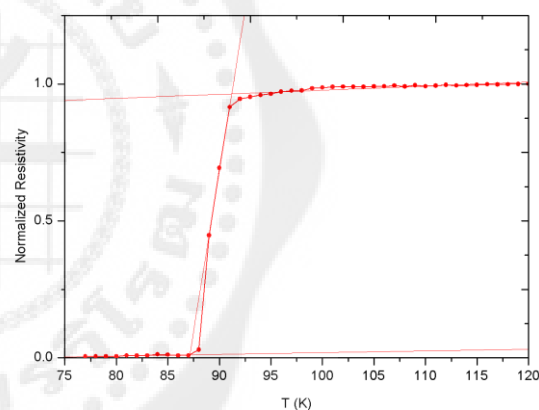
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized
77	0.00000119	0.00758516	0.00000081	0.00511816	0.00000622	0.02769539
78	0.00000089	0.00572182	0.00000081	0.00511816	0.00000563	0.02505306
79	0.00000147	0.00940889	0.00000081	0.00511816	0.00000631	0.02807884
80	0.00000029	0.00187015	0.00000081	0.00511816	0.00000643	0.02863622
81	0.00000115	0.00732965	0.00000142	0.00888752	0.00000596	0.02654529
82	0.00000085	0.00545134	0.00000122	0.00766646	0.00000594	0.02644114
83	0.00000142	0.00911144	0.00000142	0.00893613	0.00000651	0.02899096
84	0.00000114	0.00730453	0.00000203	0.01271996	0.00000634	0.02824225
85	0.00000144	0.00918157	0.00000183	0.01146901	0.00000601	0.02678398
86	0.00000144	0.00923934	0.00000142	0.00892552	0.00000571	0.02544333
87	0.00000205	0.01310383	0.00000142	0.00891559	0.00000600	0.02671322
88	0.00000560	0.03580271	0.00000479	0.03005847	0.00000614	0.02734705
89	0.00004798	0.30694276	0.00007117	0.44696163	0.00002681	0.11940358
90	0.00009499	0.60772799	0.00011043	0.69354393	0.00010600	0.47205965
91	0.00014003	0.89588409	0.00014576	0.91539911	0.00019107	0.85090186
92	0.00014658	0.93773382	0.00015052	0.94529297	0.00020978	0.93418731
93	0.00014785	0.94588917	0.00015160	0.95208817	0.00021324	0.94962179
94	0.00014932	0.95526261	0.00015272	0.95914087	0.00021484	0.95673660
95	0.00014979	0.95831979	0.00015348	0.96385731	0.00021651	0.96419472
96	0.00015167	0.97032018	0.00015477	0.97199648	0.00021795	0.97058407
97	0.00015239	0.97494656	0.00015530	0.97529360	0.00021839	0.97255719
98	0.00015349	0.98196779	0.00015546	0.97632984	0.00021889	0.97477712
99	0.00015432	0.98729214	0.00015672	0.98424920	0.00021950	0.97749700
100	0.00015405	0.98553182	0.00015718	0.98712554	0.00021959	0.97787276
101	0.00015493	0.99119004	0.00015756	0.98953087	0.00022000	0.97972624
102	0.00015478	0.99024066	0.00015760	0.98976952	0.00022062	0.98249316
103	0.00015485	0.99068310	0.00015764	0.98999560	0.00022091	0.98376165
104	0.00015476	0.99010249	0.00015751	0.98918546	0.00022105	0.98439674
105	0.00015507	0.99209830	0.00015774	0.99061735	0.00022160	0.98685782
106	0.00015496	0.99138685	0.00015785	0.99132073	0.00022152	0.98647676
107	0.00015543	0.99441464	0.00015835	0.99446712	0.00022200	0.98860841
108	0.00015501	0.99169040	0.00015776	0.99075551	0.00022225	0.98972340
109	0.00015553	0.99499970	0.00015844	0.99502606	0.00022248	0.99077561
110	0.00015483	0.99056590	0.00015789	0.99160962	0.00022259	0.99125518

ตาราง 13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123 (ต่อ)

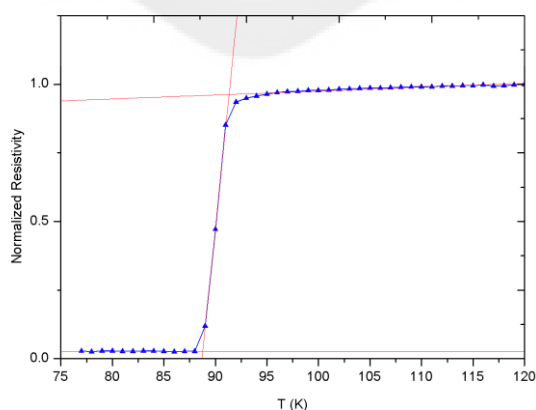
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized
111	0.00015498	0.99148015	0.00015828	0.99402123	0.00022235	0.99017838
112	0.00015589	0.99734315	0.00015870	0.99668404	0.00022323	0.99410940
113	0.00015569	0.99605807	0.00015831	0.99419707	0.00022321	0.99401542
114	0.00015575	0.99643975	0.00015853	0.99560384	0.00022338	0.99477929
115	0.00015589	0.99731187	0.00015874	0.99689129	0.00022358	0.99564201
116	0.00015559	0.99541997	0.00015903	0.99873139	0.00022415	0.99820561
117	0.00015631	1.00000000	0.00015895	0.99822270	0.00022329	0.99437693
118	0.00015603	0.99822716	0.00015908	0.99905169	0.00022358	0.99565547
119	0.00015595	0.99770455	0.00015915	0.99949130	0.00022411	0.99803614
120	0.00015616	0.99907809	0.00015923	1.00000000	0.00022456	1.00000000



ก)



ข)



ค)

ภาพประกอบ 49 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y123

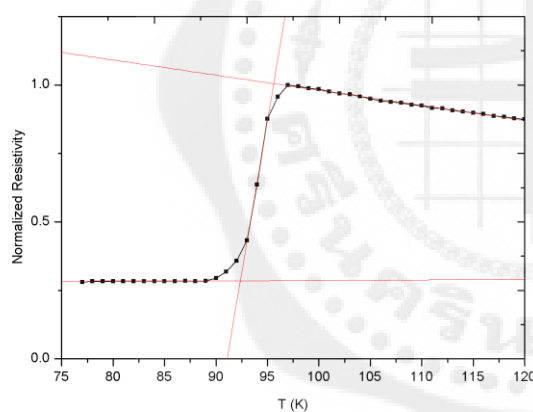
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA

ตาราง 14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดย้ง Y156

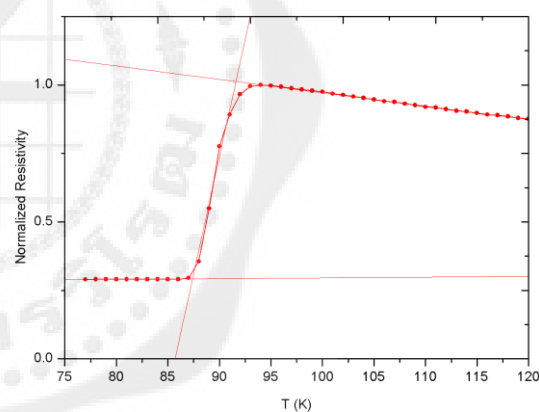
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized
77	0.00159465	0.28076330	0.00166769	0.28990934	0.00171960	0.29786801
78	0.00160539	0.28265436	0.00167072	0.29043554	0.00172619	0.29900883
79	0.00160805	0.28312224	0.00167148	0.29056830	0.00172301	0.29845842
80	0.00160701	0.28294007	0.00167192	0.29064428	0.00172404	0.29863700
81	0.00160600	0.28276240	0.00167125	0.29052843	0.00172447	0.29871114
82	0.00160778	0.28307491	0.00167187	0.29063555	0.00172460	0.29873418
83	0.00160809	0.28313066	0.00167132	0.29054127	0.00172561	0.29890830
84	0.00160865	0.28322764	0.00167034	0.29036948	0.00172591	0.29896105
85	0.00161042	0.28354027	0.00167175	0.29061554	0.00172767	0.29926523
86	0.00161202	0.28382188	0.00167313	0.29085516	0.00174300	0.30192037
87	0.00161770	0.28482261	0.00170010	0.29554449	0.00205696	0.35630522
88	0.00160694	0.28292699	0.00204683	0.35581981	0.00338162	0.58576074
89	0.00161541	0.28441920	0.00316176	0.54963725	0.00475806	0.82418670
90	0.00167835	0.29550029	0.00446306	0.77585454	0.00548283	0.94973100
91	0.00181055	0.31877679	0.00513025	0.89183726	0.00569861	0.98710921
92	0.00203694	0.35863532	0.00556052	0.96663477	0.00577303	1.00000000
93	0.00245725	0.43263720	0.00572789	0.99573135	0.00576450	0.99852158
94	0.00361831	0.63706043	0.00575245	1.00000000	0.00574636	0.99538006
95	0.00497961	0.87673899	0.00573855	0.99758459	0.00572203	0.99116536
96	0.00543467	0.95685972	0.00571576	0.99362182	0.00569240	0.98603229
97	0.00567969	1.00000000	0.00568407	0.98811334	0.00566299	0.98093781
98	0.00565438	0.99554305	0.00565707	0.98341960	0.00564402	0.97765310
99	0.00560976	0.98768838	0.00563417	0.97943936	0.00561145	0.97201125
100	0.00559418	0.98494509	0.00561126	0.97545632	0.00558859	0.96805164
101	0.00554706	0.97664873	0.00556996	0.96827639	0.00556359	0.96372026
102	0.00550456	0.96916574	0.00554098	0.96323822	0.00553853	0.95938037
103	0.00548273	0.96532122	0.00550926	0.95772476	0.00550811	0.95411068
104	0.00544009	0.95781382	0.00547756	0.95221417	0.00547928	0.94911616
105	0.00539546	0.94995721	0.00544498	0.94655015	0.00544744	0.94360179
106	0.00535130	0.94218178	0.00540906	0.94030647	0.00541435	0.93786995
107	0.00532882	0.93822387	0.00539279	0.93747825	0.00538310	0.93245553
108	0.00531000	0.93490986	0.00535868	0.93154789	0.00534861	0.92648201
109	0.00526679	0.92730148	0.00532585	0.92584139	0.00531778	0.92114085
110	0.00524847	0.92407670	0.00529133	0.91984021	0.00530024	0.91810407

ตาราง 14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 (ต่อ)

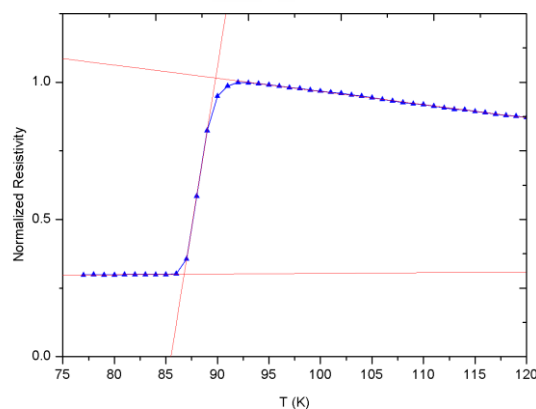
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized
111	0.00520555	0.91651923	0.00527458	0.91692749	0.00526824	0.91256047
112	0.00518972	0.91373369	0.00524209	0.91128044	0.00523701	0.90714972
113	0.00515109	0.90693222	0.00520946	0.90560744	0.00520664	0.90188986
114	0.00513027	0.90326562	0.00519421	0.90295600	0.00519410	0.89971797
115	0.00509789	0.89756506	0.00516157	0.89728199	0.00516272	0.89428212
116	0.00507585	0.89368342	0.00512870	0.89156801	0.00513312	0.88915517
117	0.00503596	0.88666013	0.00511550	0.88927313	0.00510403	0.88411643
118	0.00502205	0.88421240	0.00509200	0.88518833	0.00507554	0.87918027
119	0.00498758	0.87814269	0.00505639	0.87899872	0.00506234	0.87689379
120	0.00497123	0.87526397	0.00503933	0.87603154	0.00503578	0.87229454



ก)



ข)



ค)

ภาพประกอบ 50 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156

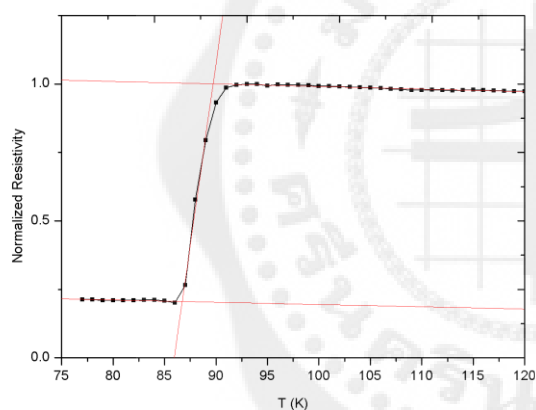
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA

ตาราง 15 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O

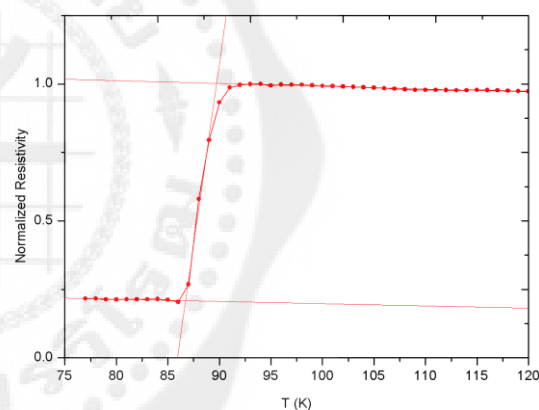
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized
77	0.00085019	0.21350502	0.00086491	0.21640303	0.00106931	0.25452687
78	0.00085127	0.21377743	0.00086600	0.21667444	0.00107040	0.25478507
79	0.00083939	0.21079333	0.00085412	0.21370134	0.00105851	0.25195662
80	0.00083808	0.21046403	0.00085281	0.21337324	0.00105720	0.25164449
81	0.00083913	0.21072858	0.00085386	0.21363682	0.00105826	0.25189524
82	0.00083973	0.21087822	0.00085445	0.21378591	0.00105885	0.25203707
83	0.00084085	0.21115932	0.00085557	0.21406597	0.00105997	0.25230351
84	0.00084175	0.21138691	0.00085648	0.21429272	0.00106088	0.25251923
85	0.00083311	0.20921736	0.00084784	0.21213117	0.00105224	0.25046284
86	0.00080191	0.20138034	0.00081663	0.20432303	0.00102103	0.24303458
87	0.00105825	0.26575515	0.00107298	0.26846064	0.00127737	0.30405175
88	0.00230260	0.57824502	0.00231733	0.57979907	0.00252172	0.60024284
89	0.00316452	0.79469669	0.00317925	0.79545318	0.00338365	0.80540486
90	0.00371277	0.93237527	0.00372749	0.93262444	0.00393189	0.93590242
91	0.00393029	0.98700069	0.00394501	0.98704859	0.00414941	0.98767871
92	0.00397018	0.99701860	0.00398490	0.99702958	0.00418930	0.99717410
93	0.00398009	0.99950900	0.00399482	0.99951081	0.00419922	0.99953461
94	0.00398205	1.00000000	0.00399678	1.00000000	0.00420117	1.00000000
95	0.00395937	0.99430396	0.00397410	0.99432495	0.00417849	0.99460106
96	0.00397354	0.99786279	0.00398827	0.99787067	0.00419266	0.99797426
97	0.00397042	0.99707989	0.00398515	0.99709065	0.00418955	0.99723220
98	0.00397026	0.99703873	0.00398499	0.99704964	0.00418938	0.99719318
99	0.00396433	0.99554904	0.00397905	0.99556544	0.00418345	0.99578119
100	0.00395309	0.99272653	0.00396781	0.99275333	0.00417221	0.99310590
101	0.00394984	0.99191085	0.00396457	0.99194065	0.00416896	0.99233276
102	0.00394472	0.99062663	0.00395945	0.99066117	0.00416385	0.99111553
103	0.00393912	0.98921930	0.00395385	0.98925903	0.00415824	0.98978160
104	0.00393312	0.98771144	0.00394784	0.98775672	0.00415224	0.98835238
105	0.00392732	0.98625536	0.00394205	0.98630600	0.00414644	0.98697225
106	0.00391960	0.98431751	0.00393433	0.98437529	0.00413873	0.98513547
107	0.00391262	0.98256506	0.00392735	0.98262930	0.00413175	0.98347443
108	0.00390380	0.98035015	0.00391853	0.98042256	0.00412293	0.98137504
109	0.00389539	0.97823827	0.00391012	0.97831845	0.00411452	0.97937331
110	0.00389454	0.97802351	0.00390927	0.97810449	0.00411366	0.97916976

ตาราง 15 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O (ต่อ)

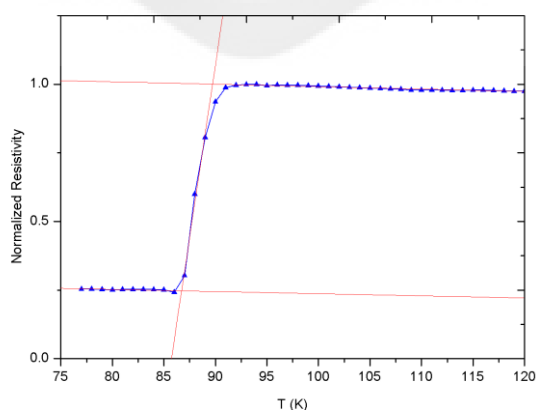
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized
111	0.00389679	0.97858941	0.00391152	0.97866830	0.00411592	0.97970614
112	0.00389313	0.97767076	0.00390786	0.97775304	0.00411226	0.97883540
113	0.00388979	0.97683014	0.00390451	0.97691552	0.00410891	0.97803863
114	0.00389075	0.97707128	0.00390547	0.97715576	0.00410987	0.97826719
115	0.00389664	0.97855037	0.00391136	0.97862941	0.00411576	0.97966914
116	0.00389187	0.97735434	0.00390660	0.97743778	0.00411100	0.97853549
117	0.00388895	0.97662009	0.00390368	0.97670623	0.00410807	0.97783953
118	0.00388280	0.97507580	0.00389753	0.97516764	0.00410192	0.97637579
119	0.00387809	0.97389270	0.00389282	0.97398889	0.00409721	0.97525440
120	0.00387645	0.97348163	0.00389118	0.97357934	0.00409558	0.97486477



ก)



ข)



ค)

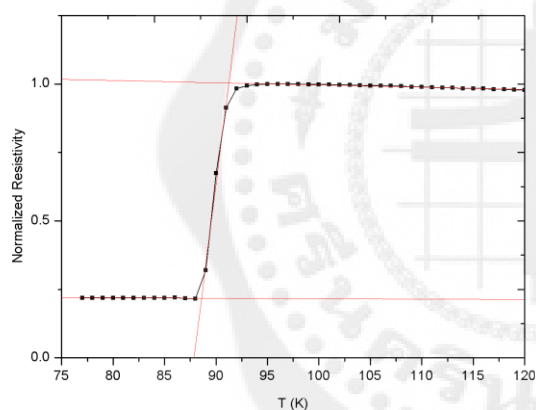
ภาพประกอบ 51 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.05Ag₂O
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA

ตาราง 16 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O

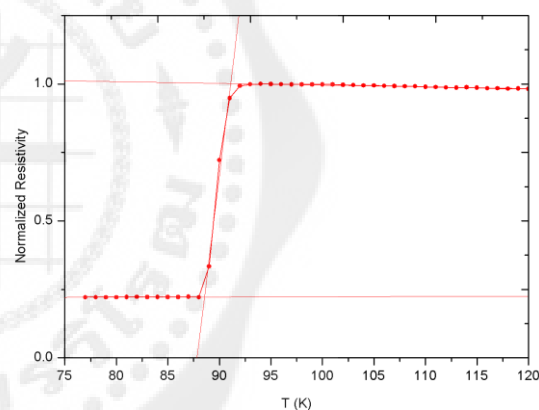
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized
77	0.00120349	0.21911526	0.00121821	0.22126682	0.00142261	0.23878634
78	0.00120308	0.21904155	0.00121821	0.22126682	0.00141226	0.23704888
79	0.00120426	0.21925694	0.00121821	0.22126682	0.00141315	0.23719933
80	0.00120518	0.21942297	0.00121904	0.22141677	0.00141697	0.23784056
81	0.00120553	0.21948800	0.00122199	0.22195242	0.00141740	0.23791123
82	0.00120339	0.21909812	0.00122387	0.22229366	0.00141718	0.23787539
83	0.00120447	0.21929503	0.00122051	0.22168467	0.00141812	0.23803290
84	0.00120457	0.21931279	0.00122154	0.22187218	0.00142879	0.23982318
85	0.00120655	0.21967275	0.00122262	0.22206788	0.00142162	0.23862102
86	0.00120837	0.22000522	0.00122314	0.22216109	0.00141974	0.23830505
87	0.00119640	0.21782585	0.00122772	0.22299327	0.00142206	0.23869388
88	0.00118403	0.21557337	0.00121945	0.22149093	0.00142818	0.23972080
89	0.00175718	0.31992559	0.00183861	0.33395074	0.00149382	0.25073899
90	0.00370327	0.67424327	0.00397518	0.72202194	0.00425848	0.71479044
91	0.00501652	0.91334371	0.00521874	0.94789174	0.00537056	0.90145330
92	0.00539910	0.98299862	0.00546837	0.99323347	0.00571212	0.95878477
93	0.00546078	0.99422829	0.00549812	0.99863650	0.00595288	0.99919728
94	0.00547871	0.99749437	0.00550562	1.00000000	0.00595766	1.00000000
95	0.00549028	0.99959927	0.00550183	0.99931036	0.00595236	0.99911006
96	0.00548987	0.99952555	0.00549766	0.99855388	0.00594998	0.99871035
97	0.00549102	0.99973461	0.00549501	0.99807117	0.00594201	0.99737294
98	0.00549248	1.00000000	0.00549514	0.99809583	0.00593736	0.99659187
99	0.00548357	0.99837777	0.00549392	0.99787393	0.00588145	0.98720661
100	0.00548130	0.99796472	0.00549516	0.99809872	0.00586563	0.98455209
101	0.00548056	0.99783022	0.00549349	0.99779611	0.00585739	0.98316802
102	0.00547591	0.99698342	0.00548644	0.99651482	0.00585148	0.98217664
103	0.00547524	0.99686191	0.00548250	0.99579982	0.00584318	0.98078369
104	0.00546859	0.99565048	0.00547514	0.99446276	0.00584010	0.98026594
105	0.00545957	0.99400961	0.00547571	0.99456637	0.00583389	0.97922433
106	0.00545743	0.99361934	0.00546642	0.99287906	0.00583371	0.97919426
107	0.00545546	0.99326094	0.00546267	0.99219819	0.00582809	0.97825136
108	0.00544975	0.99222058	0.00545903	0.99153613	0.00582660	0.97800057
109	0.00543643	0.98979567	0.00545777	0.99130891	0.00581299	0.97571683
110	0.00543264	0.98910529	0.00544730	0.98940613	0.00581066	0.97532588

ตาราง 16 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O (ต่อ)

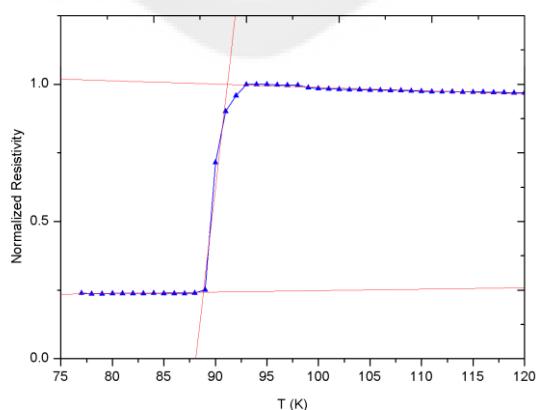
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized
111	0.00542888	0.98842089	0.00544289	0.98860521	0.00580266	0.97398153
112	0.00541899	0.98661994	0.00543565	0.98728983	0.00579889	0.97334993
113	0.00541564	0.98601125	0.00543253	0.98672420	0.00579616	0.97289199
114	0.00540581	0.98422031	0.00543789	0.98769681	0.00579230	0.97224258
115	0.00540152	0.98344007	0.00542932	0.98614089	0.00579159	0.97212483
116	0.00539835	0.98286345	0.00542075	0.98458469	0.00578673	0.97130823
117	0.00538887	0.98113627	0.00541761	0.98401342	0.00578262	0.97061935
118	0.00538795	0.98096845	0.00540998	0.98262711	0.00578204	0.97052085
119	0.00537937	0.97940744	0.00541405	0.98336632	0.00577611	0.96952636
120	0.00537273	0.97819728	0.00540829	0.98232011	0.00577333	0.96905857



ก)



ข)



ค)

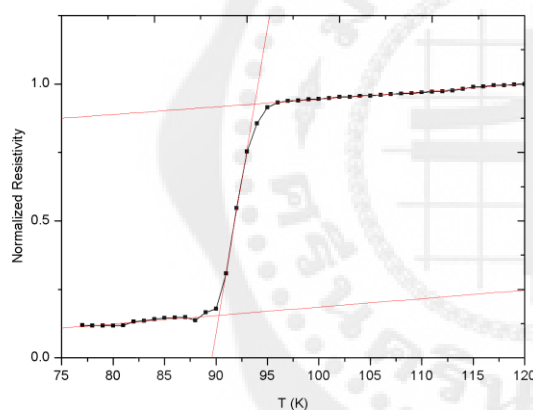
ภาพประกอบ 52 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA

ตาราง 17 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O

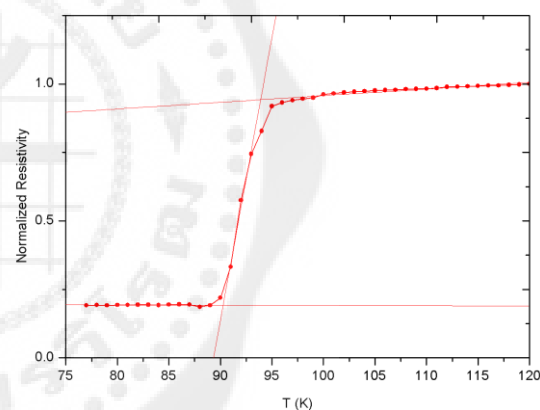
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized	$\rho (\Omega \cdot m)$	Normalized
77	0.00005899	0.11914936	0.00010238	0.19184662	0.00009906	0.18366991
78	0.00005859	0.11835192	0.00010314	0.19327320	0.00010642	0.19731700
79	0.00005868	0.11853660	0.00010238	0.19184662	0.00010642	0.19731700
80	0.00005831	0.11777546	0.00010314	0.19327320	0.00010715	0.19865700
81	0.00005931	0.11979741	0.00010308	0.19315204	0.00010802	0.20026514
82	0.00006561	0.13252068	0.00010344	0.19383183	0.00011220	0.20802658
83	0.00006729	0.13592833	0.00010346	0.19386685	0.00011036	0.20460517
84	0.00006966	0.14071525	0.00010274	0.19252412	0.00011546	0.21406432
85	0.00007216	0.14576630	0.00010392	0.19474042	0.00011719	0.21726672
86	0.00007293	0.14731522	0.00010449	0.19579405	0.00011814	0.21904550
87	0.00007361	0.14868311	0.00010384	0.19458426	0.00011622	0.21548625
88	0.00006793	0.13722069	0.00009928	0.18603813	0.00011648	0.21595235
89	0.00008219	0.16600986	0.00010245	0.19198387	0.00012950	0.24010761
90	0.00008909	0.17995195	0.00011719	0.21960101	0.00015556	0.28842350
91	0.00015274	0.30851429	0.00017746	0.33254609	0.00020538	0.38078872
92	0.00027079	0.54698036	0.00030734	0.57590676	0.00031185	0.57818170
93	0.00037310	0.75364110	0.00039750	0.74487059	0.00045074	0.83568855
94	0.00042383	0.85610777	0.00044201	0.82826257	0.00049668	0.92086321
95	0.00045284	0.91471068	0.00049013	0.91844753	0.00050650	0.93907984
96	0.00046101	0.93120890	0.00049740	0.93205564	0.00051001	0.94557972
97	0.00046396	0.93717010	0.00050164	0.93999911	0.00051191	0.94911427
98	0.00046512	0.93949991	0.00050459	0.94552822	0.00051876	0.96181510
99	0.00046680	0.94290452	0.00050651	0.94913539	0.00052562	0.97452279
100	0.00046785	0.94502267	0.00051331	0.96186954	0.00052509	0.97354092
101	0.00046902	0.94738343	0.00051528	0.96557160	0.00052085	0.96568039
102	0.00047136	0.95210918	0.00051686	0.96853258	0.00052494	0.97326964
103	0.00047166	0.95271389	0.00051844	0.97148149	0.00052253	0.96879257
104	0.00047341	0.95625316	0.00051962	0.97370865	0.00052829	0.97948260
105	0.00047380	0.95704051	0.00052082	0.97594532	0.00053250	0.98728543
106	0.00047499	0.95944804	0.00052161	0.97743797	0.00053399	0.99004214
107	0.00047694	0.96338126	0.00052228	0.97867889	0.00053120	0.98486267
108	0.00047784	0.96519409	0.00052359	0.98113838	0.00052573	0.97473568
109	0.00047840	0.96633040	0.00052425	0.98237104	0.00052999	0.98263395
110	0.00047989	0.96935024	0.00052441	0.98267627	0.00053150	0.98543172

ตาราง 17 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O (ต่อ)

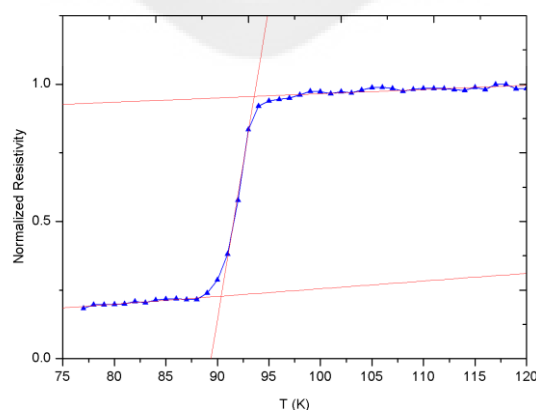
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized
111	0.00048130	0.97219587	0.00052568	0.98505686	0.00053152	0.98545761
112	0.00048192	0.97344469	0.00052781	0.98905360	0.00053140	0.98524856
113	0.00048301	0.97564890	0.00052829	0.98994702	0.00052923	0.98121345
114	0.00048615	0.98198479	0.00052905	0.99136824	0.00052751	0.97802185
115	0.00048946	0.98866840	0.00052989	0.99294979	0.00053342	0.98897970
116	0.00049025	0.99027715	0.00053061	0.99430252	0.00052911	0.98100407
117	0.00049286	0.99554783	0.00053086	0.99476131	0.00053911	0.99954455
118	0.00049252	0.99485775	0.00053195	0.99680425	0.00053936	1.00000000
119	0.00049435	0.99854459	0.00053277	0.99833646	0.00053032	0.98323468
120	0.00049507	1.00000000	0.00053366	1.00000000	0.00053142	0.98527991



ก)



ข)



ค)

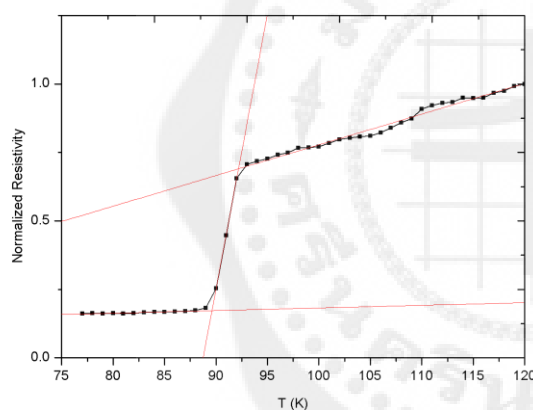
ภาพประกอบ 53 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.15Ag₂O เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA

ตาราง 18 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag₂O

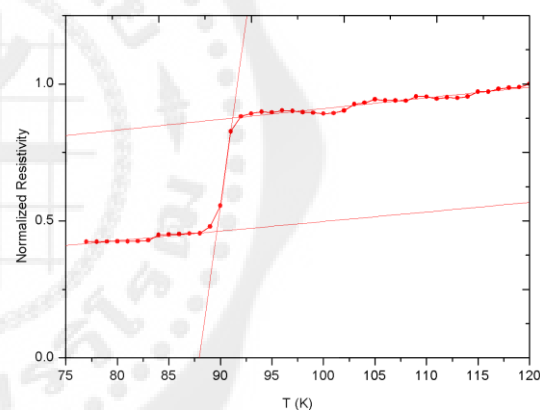
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized
77	0.00726364	0.16197825	0.03994764	0.42382188	0.02694388	0.22284985
78	0.00729906	0.16276826	0.03994764	0.42382188	0.02694388	0.22284985
79	0.00727234	0.16217242	0.04004378	0.42484185	0.02638236	0.21820554
80	0.00731359	0.16309226	0.04005109	0.42491937	0.02521804	0.20857554
81	0.00728965	0.16255837	0.04011779	0.42562701	0.02565333	0.21217581
82	0.00732140	0.16326639	0.04016585	0.42613698	0.02485972	0.20561200
83	0.00743205	0.16573382	0.04041692	0.42880063	0.02407626	0.19913205
84	0.00749377	0.16711022	0.04230308	0.44881175	0.02531817	0.20940372
85	0.00753656	0.16806448	0.04245950	0.45047125	0.02598286	0.21490133
86	0.00757045	0.16882023	0.04260003	0.45196219	0.02518692	0.20831818
87	0.00762095	0.16994632	0.04279093	0.45398757	0.02706522	0.22385339
88	0.00776029	0.17305365	0.04285787	0.45469773	0.02734303	0.22615113
89	0.00815407	0.18183492	0.04522007	0.47975941	0.02875137	0.23779937
90	0.01141922	0.25464723	0.05240663	0.55600470	0.04409563	0.36471005
91	0.02007962	0.44777320	0.07792497	0.82673982	0.08633573	0.71407319
92	0.02941366	0.65592119	0.08309784	0.88162111	0.10445730	0.86395460
93	0.03169246	0.70673809	0.08405031	0.89172623	0.10478023	0.86662553
94	0.03223773	0.71889763	0.08467200	0.89832202	0.10489974	0.86761397
95	0.03258006	0.72653154	0.08444295	0.89589195	0.10490617	0.86766721
96	0.03324410	0.74133949	0.08514405	0.90333022	0.10402032	0.86034039
97	0.03357217	0.74865540	0.08494598	0.90122875	0.10534567	0.87130228
98	0.03436072	0.76624005	0.08449718	0.89646731	0.10655694	0.88132049
99	0.03443880	0.76798113	0.08433069	0.89470094	0.10740401	0.88832656
100	0.03456499	0.77079530	0.08401838	0.89138743	0.10828002	0.89557196
101	0.03514105	0.78364130	0.08419747	0.89328748	0.10911342	0.90246489
102	0.03572202	0.79659678	0.08509286	0.90278712	0.11003266	0.91006784
103	0.03603223	0.80351446	0.08729333	0.92613279	0.11121505	0.91984719
104	0.03623805	0.80810423	0.08773562	0.93082529	0.11139037	0.92129726
105	0.03637412	0.81113856	0.08896655	0.94388472	0.11204696	0.92672786
106	0.03684233	0.82157977	0.08853382	0.93929373	0.11300468	0.93464902
107	0.03763722	0.83930566	0.08855160	0.93948238	0.11409537	0.94367004
108	0.04072504	0.85816367	0.08843772	0.93827418	0.11568076	0.95678259
109	0.04092735	0.87267506	0.08988627	0.95364242	0.11683482	0.96632771
110	0.04118332	0.90838321	0.08987183	0.95348925	0.11716489	0.96905767

ตาราง 18 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.20Ag₂O (ต่อ)

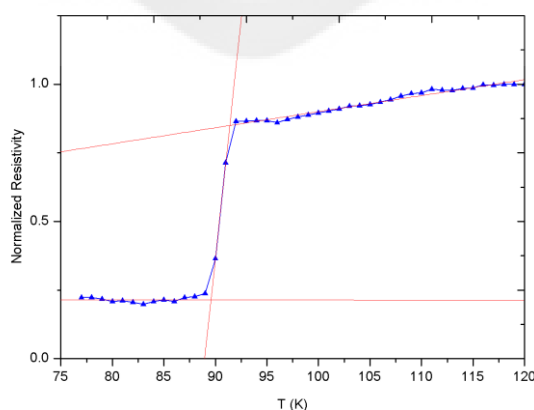
อุณหภูมิ (เคลวิน)	100 mA		150 mA		200 mA	
	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized	ρ ($\Omega \cdot m$)	Normalized
111	0.04134063	0.92189123	0.08912886	0.94560677	0.11866924	0.98149999
112	0.04173033	0.93058159	0.08961478	0.95076213	0.11836270	0.97896460
113	0.04186228	0.93352407	0.08940151	0.94849943	0.11815112	0.97721467
114	0.04258972	0.94974590	0.08989526	0.95373784	0.11916283	0.98558243
115	0.04249353	0.94760067	0.09156399	0.97144212	0.11931973	0.98688014
116	0.04259027	0.94975809	0.09158176	0.97163061	0.12075314	0.99873568
117	0.04338610	0.96750499	0.09255807	0.98198873	0.12054973	0.99705330
118	0.04372456	0.97505268	0.09295126	0.98616028	0.12078881	0.99903069
119	0.04452010	0.99279305	0.09314924	0.98826077	0.12084655	0.99950832
120	0.04484328	1.00000000	0.09425573	1.00000000	0.12090600	1.00000000



ก)



ข)



ค)

ภาพประกอบ 54 ภาพแสดงการหา T_c onset และ T_c offset ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.10Ag₂O
เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงตัว ก) 100 mA ข) 150 mA ค) 200 mA



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวกัญชพร ตันติวิชิตเวช
วันเดือนปีเกิด	13 พฤษภาคม 2536
สถานที่เกิด	อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	36/3 หมู่ 11 ตำบลปากแรต อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี 70110

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2554	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนรัตนราษฎร์บำรุง
พ.ศ. 2559	การศึกษาระดับบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2561	การศึกษามหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

