

ผลกระทบของการเจือปนอินทรีย์ในตัวอย่าง Y123 และ Y235



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2557

ผลกระทบของการเจอฝุ่นในตัวยาวดิ่ง Y123 และ Y235



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ธนรัชต์ คันทักษ์ (2557). ผลกระทบของการเจือฟลูออรีนในตัวยานวดยั้ง Y123 และ Y235

ปริญญาานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย

ศรีนครินทรวิโรฒ คณะกรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย,

อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการเจือฟลูออรีนในตัวยานวดยั้ง $Y123+F_x$ และ $Y235+F_x$ ที่ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 ที่เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้ยิบเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และ คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2) เป็นสารตั้งต้น จากนั้นนำสารตั้งต้นที่ผสมตามอัตราส่วนของตัวยานวดยั้งแต่ละสูตรเข้าสู่กระบวนการเผาแบบผงสองครั้งที่อุณหภูมิ 810 องศาเซลเซียส และกระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวยานวดยั้งที่เตรียมได้ด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดแบบสี่ขั้ว วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่าตัวยานวดยั้ง $Y123+F_x$ ที่ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 มีอุณหภูมิวิกฤตตอนเขตเท่ากับ 92 เคลวิน 95 เคลวิน และ 93 เคลวิน ตัวยานวดยั้ง $Y235+F_x$ ที่ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 มีอุณหภูมิวิกฤตตอนเขตเท่ากับ 92 เคลวิน 93 เคลวิน 92 เคลวิน ตามลำดับ ปริมาณการเจือฟลูออรีนที่ $x = 0.1$ มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุด ผลของการเจือฟลูออรีนทำให้เกิดการปรับปรุงลักษณะพื้นฐาน เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและความพรุนลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับตัวยานวดยั้งที่ไม่เจือด้วย การศึกษาอัตราส่วนของปริมาณธาตุพบว่า การกระจายตัวของธาตุที่ไม่สม่ำเสมอและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสาร การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวยานวดยั้งพบว่า มีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิกและประกอบด้วยเฟสสภาพนำยวดยิ่งและเฟสสภาพไม่นำยวดยิ่ง การเจือฟลูออรีนไม่มีผลกับขนาดแกน c และอัตราส่วนระหว่างแกน c/a แต่ทำให้ขนาดของแกน a ลดลง และแกน b เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแอนไอโซโทรปิกเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าตัวยานวดยั้งเจือฟลูออรีนที่ $x = 0.1$ ทั้งสองสูตรมีค่าแอนไอโซโทรปิกสูงสุด

คำสำคัญ: ตัวยานวดยั้งเจือฟลูออรีน, ตัวยานวดยั้ง Y235, ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

THE DOPING EFFECT OF FLUORINE IN Y123 AND Y235
SUPERCONDUCTORS



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
May 2014

Thanarat Khuntak (2014). *The doping effect of Fluorine in Y123 and Y235 superconductors*.

Master. Thesis, M.Sc. (physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Assist Prof. Dr. Pongkaew Udomsamuthirun, Dr. Supphadate Sujinnapram

In this research, the doping effect of Fluorine in $Y_{123}F_x$ and $Y_{235}F_x$ superconductors; $x = 0, 0.1$ and 0.2 prepared by solid state reaction method were studied. The starting materials were Yttrium(III)oxide (Y_2O_3), Barium Carbonate ($BaCO_3$), Copper oxide (CuO) and Copper(II)Fluoride (CuF_2). The precursor powders were mixed according to each recipe chemical formulas of superconductors. The mixed powders were calcinated at $810\text{ }^{\circ}C$ and sintered at $925\text{ }^{\circ}C$. The physical properties of samples obtained were studied by the resistance measurement with four-point probe technique, Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-Ray spectroscopy (EDX) and X-ray diffraction (XRD). We found that the critical temperature onset of $Y_{123}F_x$; $x = 0, 0.1, 0.2$ were 92 K, 95 K and 93 K, respectively. The critical temperature onset of $Y_{235}F_x$; $x = 0, 0.1, 0.2$ were 92 K, 93 K and 92 K, respectively. The amount of fluorine doped at 0.1 has the highest critical temperature. The fluorine doping cause improvement on morphology; larger grain size and less porosity than the samples without doped. The studied on compositions of elements were shown uneven distribution of elements and the non-homogeneous material. The analysis of microstructure found the orthorhombic structures and consisting of superconducting phase and non-superconducting phase. There were no effect of fluorine doped on c-axis and c/a ratio but the decreasing on a-axis and increasing on b-axis with increasing of amount of fluorine doped were found that agreed with the increase of anisotropy. The highest anisotropy was found at doping $x = 0.1$.

Keywords: Fluorine-doped superconductor, Y235 superconductor, Solid state reaction

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบของการเจือปนของอินทรีย์ในตัวอย่างดิน Y123 และ Y235

ของ

ธนรัชต์ คันทักษ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2557

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษาหลักประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว)

.....ที่ปรึกษาร่วมกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม) (รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อารียา เอี่ยมบุญ)

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำปริญญานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรมฟูลพรอฟ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกกับข้าพเจ้าตลอดการศึกษาระดับมหาบัณฑิต รวมทั้ง

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว และ อาจารย์ ดร.อารียา เอี่ยมบุ๋ม ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานและกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์และคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณธัญนพ นิลกำจร คุณเสริมสุข รัตเร่ง คุณวิวัฒน์ เครือวงศ์ และ คุณสยาม หาบ่านแท่น ที่ช่วยอำนวยความสะดวกการใช้อุปกรณ์เพื่อทำการวิจัย ขอขอบคุณ คุณปิยะมาศ ไชยนอก นิสิตปริญญาเอก คุณสมิตตา เมฆนิตติ คุณปิยะดา วัจวร คุณรชตวรรณ กมลเพชร เพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์และคุณศิริณญา ชัยประเดิมศักดิ์ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติๆ ทุกคนที่สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยตลอดมา

ธนรัชต์ กัณทักษ์



งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จาก
ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ประวัติความเป็นมาและสมบัติพื้นฐาน	1
การค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง	2
ความมุ่งหมายของการวิจัย	4
ความสำคัญของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	4
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
สมบัติของตัวนำยวดยิ่ง	5
ประเภทของตัวนำยวดยิ่ง	6
ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว	7
ทฤษฎีบีซีเอส	8
การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123	9
การเตรียมตัวนำยวดยิ่งเจือด้วยฟลูออรีน	12
การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว	13
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
การวิเคราะห์ธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน	16
การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
โปรแกรมฟูลพรอฟ	18
3 การดำเนินการวิจัย	21
การเตรียมตัวนำยวดยิ่ง	21
การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง	26
กระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง	27
การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง	29
การวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง	29
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (SEM) และวิเคราะห์ธาตุ (EDX)	31
การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน	31

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย	32
การวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดแบบสี่ขั้ว	33
การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของตัวนำวยดยิ่ง	39
การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ	46
การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวนำวยดยิ่ง	51
5 สรุป อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
สรุปผลการวิจัย	58
อภิปรายผลการวิจัย	59
ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	61
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยิ่งแต่ละสูตร	64
ภาคผนวก ข ตารางปริมาณธาตุที่วัดได้ของตัวนำวยดยิ่งแต่ละสูตร	77
ประวัติย่อผู้วิจัย	90

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123		33
2 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F _{0.1}		34
3 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F _{0.2}		35
4 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y235		36
5 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F _{0.1}		37
6 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F _{0.2}		38
7 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรที่กระแสไฟฟ้าคงตัว 100 mA		39
8 ปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง		48
9 อัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้เฉลี่ยเทียบกับยิทธิเทียม		50
10 แสดงค่าคงตัวแลตทิซของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร กลุ่มปริภูมิของสารที่มี มีสภาพนำยวดยิ่งและสภาพไม่นำยวดยิ่ง		54
11 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123		65
12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F _{0.1}		67
13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F _{0.2}		69
14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235		71
15 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F _{0.1}		73
16 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F _{0.2}		75
17 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123		78
18 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F _{0.1}		80
19 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F _{0.2}		82
20 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235		84
21 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F _{0.1}		86
22 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F _{0.2}		88

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ	2
2 แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	3
3 (a) แสดงตัวนำปกติในสนามแม่เหล็ก (b) แสดงตัวนำยวดยิ่งในสนามแม่เหล็ก	5
4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและสนามแม่เหล็กภายในของ ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1	6
5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและสนามแม่เหล็กภายในของ ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2	7
6 แผนภาพของอันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดคูคูเปอร์	
ก) อิเล็กตรอนตัวแรกที่เคลื่อนเข้ามา	8
ข) เมื่ออิเล็กตรอนตัวแรกเคลื่อนเข้าหาโครงสร้างผลึกทำให้เสียรูป	8
ค) อิเล็กตรอนตัวที่สองจะถูกดึงดูดเข้ามาด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกที่เกิดจาก การเสียรูปของโครงสร้างผลึก	8
7 โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	9
.....	13
8 ลักษณะซ้ำของห้วงความต้านทานแบบ 4 ขั้ว	14
9 แสดงการหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของมูราเซและคณะ	15
10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	16
11 แสดงการทำงานของเครื่อง EDX	17
12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	18
13 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน	19
14 หลักการทำงานของโปรแกรมฟูลพรอฟ	
15 สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง	
(ก) ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	
(ข) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)	27
(ค) คอปเปอร์ออกไซด์ และ (ง) คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2)	27
16 แสดงสารตั้งต้นที่ผสมเข้ากันจนเป็นสารเนื้อเดียวที่มีลักษณะเป็นผงสีเทา	28
17 แสดงกระบวนการเผาแบบผง	29
18 แสดงกระบวนการเผาแบบขึ้นรูป	30
19 ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample holder)	30
20 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า	

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำวยดยิ่ง Y123	32
22 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยิ่ง Y123	33
23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำวยดยิ่ง Y123+F _{0.1}	33
24 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยิ่ง Y123+F _{0.1}	34
25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำวยดยิ่ง Y123+F _{0.2}	34
26 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยิ่ง Y123+F _{0.2}	35
27 กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำวยดยิ่ง Y235	35
28 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยิ่ง Y235	36
29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำวยดยิ่ง Y235+F _{0.1}	36
30 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยิ่ง Y235+F _{0.1}	37
31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำวยดยิ่ง Y235+F _{0.2}	37
32 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยิ่ง Y235+F _{0.2}	38
33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ก) Y123+F _x ข) Y235+F _x กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของ ค) Y123+F _x ง) Y235+F _x ; x = 0, 0.1, 0.2	39
34 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	40
35 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123+F _{0.1} ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	41
36 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123+F _{0.2} ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	42
37 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y235 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	43

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
38 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ $Y235+F_{0.1}$ ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	44
39 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ $Y235+F_{0.2}$ ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า	45
40 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y123	46
41 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง $Y123+F_{0.1}$	46
42 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง $Y123+F_{0.2}$	47
43 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y235	47
44 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง $Y235+F_{0.1}$	47
45 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง $Y235+F_{0.2}$	48
46 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 6 สูตร	51
47 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากผลการทดลองของ ตัวนำยวดยิ่ง Y123	52
48 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากผลการทดลองของ ตัวนำยวดยิ่ง $Y123+F_{0.1}$	52
49 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากผลการทดลองของ ตัวนำยวดยิ่ง $Y123+F_{0.2}$	52
50 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากผลการทดลองของ ตัวนำยวดยิ่ง Y235	53
51 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากผลการทดลองของ ตัวนำยวดยิ่ง $Y235+F_{0.1}$	53
52 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากผลการทดลองของ ตัวนำยวดยิ่ง $Y235+F_{0.2}$	53
53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับอุณหภูมิวิกฤต onset ($T_{c\text{onset}}$)	55
54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับค่าแอนไอโซโทรปีค	55
55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับขนาดแกน c/a	56

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับขนาดแกน a และ แกน b	56
57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับขนาดแกน c	57



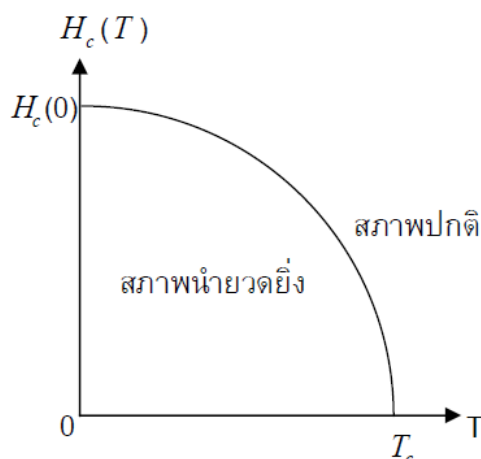
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ประวัติความเป็นมาและสมบัติพื้นฐาน

สภาพนำยวดยิ่ง (Superconductivity) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1911 โดยคาร์ล เฮอร์ลิง ออนเนส นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ (Buckel. 1991: 3) ซึ่งได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของปรอท โดยใส่ปรอทลงในภาชนะรูปวงแหวน แล้วแช่ลงไปในฮีเลียมเหลว เมื่ออุณหภูมิของปรอทลดลงอย่างสม่ำเสมอถึงอุณหภูมิ 4.2 เคลวิน พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด เรียกสภาพดังกล่าวนี้อีกว่า “สภาพนำยวดยิ่ง” และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งนี้ว่า “อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c)” อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งสามารถใช้ในการแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งได้ ถ้าตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นไม่เกิน 35 เคลวิน เรียกตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ว่าตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional superconductors) และเรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นสูงกว่า 35 เคลวินว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High temperature superconductors) (Murakami. 1999: 1) ในปีเดียวกันออนเนสได้นำปรอทรูปวงแหวนที่มีสภาพนำยวดยิ่งใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปแล้วหยุดจ่ายกระแสพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปจะมีค่าคงตัวตลอดเวลาเนื่องจากไม่มีผลของความต้านทานไฟฟ้าในตัววัสดุ กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่นี้เรียกว่า กระแสยืนยง (Persistent current) หลังจากนั้น 2 ปี ค้นพบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่ากระแสค่าหนึ่งสภาพนำยวดยิ่งจะถูกทำลาย เรียกค่ากระแสที่สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้นี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical current, J_c) ปีถัดมา ออนเนสค้นพบสมบัติของตัวนำยวดยิ่งอีกประการหนึ่งว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้เช่นเดียวกับค่าของกระแส กล่าวคือถ้าให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง สนามแม่เหล็กจะสามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้ เรียกค่าสนามแม่เหล็กที่ทำลายสภาพนำยวดยิ่งนี้ว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical magnetic field: H_c) ซึ่งผลการทดลองสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิได้ดังภาพประกอบ 1

ในปี ค.ศ. 1933 ไมสเนอร์และออกเซนเฟลด์ (Meissner; & Ochsenfeld. 1933: 787) ได้ค้นพบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญอีกประการหนึ่งของตัวนำยวดยิ่งที่ว่า ถ้าสารมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปจะสามารถทะลุผ่านสารนี้ได้ และถ้าลดอุณหภูมิของสารลงจนกระทั่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสารจะเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่ง จากนั้นใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปอีกครั้งพบว่าสนามแม่เหล็กนี้ไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect)



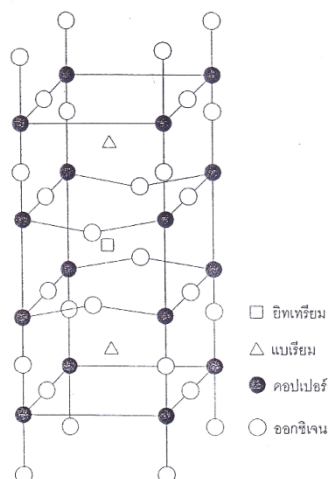
ภาพประกอบ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ

ที่มา: Kresin, V. Z.; & Worf, S. A. (1990). *Fundamentals of Superconductivity*.

1.2 การค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง

ในปี ค.ศ.1986 เบทนอสและมูลเลอร์ (Bednorz; & Muller. 1986: 189) ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารกลุ่ม Ba-La-Cu-O ซึ่งเป็นสารที่มีคอปเปอร์และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเรียกระบบประกอบประเภทนี้ว่า คิวเพรต (Cuprate) การเตรียมตัวนำยวดยิ่งของเบทนอสและมูลเลอร์ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) พบว่าสารมีอุณหภูมิวิกฤต 35 เคลวิน ต่อมาในปี ค.ศ.1987 วูและคณะ (Wu; & et al. 1987: 908) ได้ใส่ยทเทรียม (Yttrium) แทนที่ในกลุ่มแลนทานัม (Lanthanum) ทำให้อุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจากเดิม 35 เคลวินเป็น 93 เคลวิน เรียกตัวนำยวดยิ่งที่มียทเทรียมเป็นองค์ประกอบนี้ว่า Y123 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) ในปีเดียวกันโอฟชินสกีและคณะ (Ovshinsky; & et al. 1987: 2579) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วยฟลูออรีน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y-x}\text{F}_x$ โดยที่ $x = 0, 1, 2, 3, 4$ ตามลำดับ พบว่าตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y-2}\text{F}_2$ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตเท่ากับ 155 เคลวิน ต่อมาในปี ค.ศ.2009 อะลีบาดีและคณะ (Aliabadi; et al. 2009: 2012) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y358 ($\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$) ซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งสูตรใหม่ พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y358 มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 102 เคลวิน

ในปี ค.ศ. 2010 อุดมสมุทรหิรัญและคณะ (Udomsamuthirun; & et al. 2010) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่ที่มี Y-Ba-Cu-O เป็นองค์ประกอบโดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ได้ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่มีสูตรดังนี้ Y5-6-11 Y7-9-16 Y5-8-13 Y7-11-18 Y156 Y3-8-11 และ Y13-20-33 ได้ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงได้แก่ Y3-5-8 Y5-8-13 Y3-8-11 ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 94 เคลวินและตัวนำยวดยิ่ง Y358 มีโครงสร้างผลึกคล้ายกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 จากภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงกลุ่ม Y-Ba-CuO



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

ที่มา : Buckel. (1991). *Superconductivity Fundamental and Applications*.p. 295.

ในปี ค.ศ. 2011 โทपालและอัคโดเกน (Topal; & Akdogan.2011: 1815) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y-2352 Y-145 และ Y-259 พบว่าอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นของตัวนำยวดยิ่ง Y-2352 Y-145 และ Y-259 อยู่ที่ 98 เคลวิน 98 เคลวิน และ 97.3 เคลวิน ตามลำดับ ในปีเดียวกันนี้ศรีนิวาสนและคณะ (Srinivasan; & et al.2011: 1277) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y_{358}F_x เจือด้วยฟลูออรีนที่ $x = 0, 0.1, 0.2$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์(CuF_2) เป็นสารตั้งต้น พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y358 ที่เจือด้วยฟลูออรีน $x = 0.2$ มีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 110 เคลวิน (Y358 ที่ไม่เจือฟลูออรีนมีอุณหภูมิวิกฤต 92 เคลวิน)

ในปี ค.ศ. 2013 กรีเวลและแอนเดอร์สัน (Grivel; & Anderson. 2013) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{Bi}_{1.72}\text{Pb}_{0.34}\text{Sr}_{1.87}\text{Ca}_{1.91}\text{Cu}_{3.13}\text{O}_{9.83-x}\text{F}_x$ ($0.00 \leq x \leq 0.51$) ที่เจือด้วยฟลูออรีน (CuF_2 จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 836 องศาเซลเซียส) ผสมสารตั้งต้นแล้วนำไปเผาแบบผง(Calcination) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งเป็น 800 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอัดเม็ดภายใต้ความดัน 1.8 กิโลบาร์ นำเม็ดสารตัวอย่างไปเผาขึ้นรูป(sintering) ที่อุณหภูมิ 835 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าการเจือด้วยฟลูออรีนไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤตและค่าคงตัวแลตทิซแต่การเจือด้วยฟลูออรีนทำให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y_{123}F_x และ Y_{235}F_x เจือด้วยฟลูออรีน เมื่อ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากนั้นศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้

1.3 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y235 ที่เจือด้วยฟลูออรีน ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้ ดังนี้
 - 2.1 อุณหภูมิวิกฤตด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว
 - 2.2 ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง
 - 2.3 ปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน
 - 2.4 โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractometer)

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y235 ที่เจือด้วยฟลูออรีน $Y_{1-x}F_x$ และ $Y_{2-x}F_x$ เจือด้วยฟลูออรีน เมื่อ $x = 0, 0.1, 0.2$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาตัวนำยวดยิ่งสูตรอื่นที่มี Y-Ba-Cu-O เป็นองค์ประกอบได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่ง $Y_{1-x}F_x$ และ $Y_{2-x}F_x$ ที่เจือด้วยฟลูออรีน เมื่อ $x = 0, 0.1, 0.2$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้
2. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้ ดังต่อไปนี้
 - 2.1 อุณหภูมิวิกฤตด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว
 - 2.2 ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - 2.3 ปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโกปี แบบการกระจายพลังงาน
 - 2.4 โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันที่ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ทราบถึงกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y235 ที่เจือด้วยฟลูออรีนด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
2. ทราบอุณหภูมิวิกฤต ค่าคงตัวแลตทิซ และลักษณะพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y235 ที่เจือด้วยฟลูออรีน
3. สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O สูตรอื่นๆ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

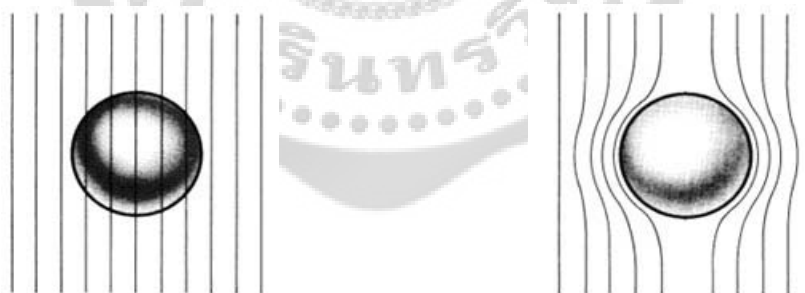
2.1 สมบัติของตัวนำยวดยิ่ง

1. ความต้านทานเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด

เมื่อลดอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่งจนถึงอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนจากสถานะนำปกติไปเป็นสถานะนำยวดยิ่ง ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งจะเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นสมบัติเบื้องต้นของตัวนำยวดยิ่งทุกประเภทและเป็นที่มาของชื่อตัวนำยวดยิ่ง หรือ Superconductor

2. ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต สสารแม่เหล็กภายนอกสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อสารได้ แต่เมื่อลดอุณหภูมิจนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต และสารเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่งแล้ว สารนั้นจะผลักสนามแม่เหล็กภายนอกให้เบนออก โดยสนามแม่เหล็กภายนอกจะไม่สามารถพุ่งผ่านเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งได้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผิวของตัวนำยวดยิ่งและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นทำให้เกิดสนาม แม่เหล็กต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกที่เข้าไป เป็นผลให้สนามแม่เหล็กภายในตัวนำยวดยิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ($B=0$) ทำให้ตัวนำยวดยิ่งมีสมบัติของสารแม่เหล็กไดอาแบบสมบูรณ์ (Perfect diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect) ดังภาพประกอบ 3



(a) $T > T_c$

(b) $T < T_c$

ภาพประกอบ 3 (a) แสดงตัวนำปกติในสนามแม่เหล็ก (b) แสดงตัวนำยวดยิ่งในสนามแม่เหล็ก

ที่มา : Kittel. (1997). *Introduction to Solid State Physics*. 7th edition. p.344.

ทั้งนี้ตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมที่เป็นตัวนำยวดยิ่งแบบที่ 1 สามารถเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้สมบูรณ์ แต่สำหรับตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 2 ซึ่งส่วนใหญ่ก็คือตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างสมบูรณ์ได้ โดยเฉพาะเมื่อสนามภายนอกมีค่ามากกว่า

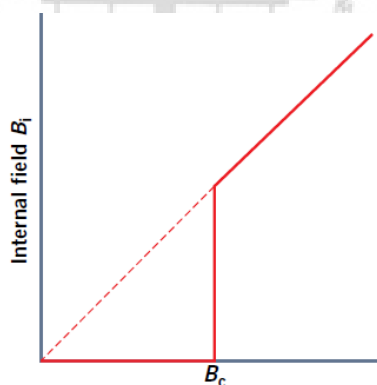
สนามแม่เหล็กวิกฤติที่ 1 แต่ต่ำกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติที่ 2 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กบางส่วนทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อตัวนำยวดยิ่ง เกิดการตรึงของเส้นแรงแม่เหล็ก เกิดการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งสิ่งที่เกิดขึ้นตามมาก็คือ เมื่อทำการทดลองปรากฏการณ์ไมส์เนอร์โดยใส่สนามแม่เหล็กไปก่อนแล้วค่อยลดอุณหภูมิในบางตัวนำยวดยิ่งจะไม่สามารถแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยการยกตัวลอยเหนือแม่เหล็กได้ เนื่องจากถูกเส้นแรงแม่เหล็กตรึงอยู่และเมื่อทำการยกตัวนำยวดยิ่งขึ้นแท่งแม่เหล็กจะลอยตัวตามขึ้นมา ซึ่งถ้าทำการทดลองโดยลดอุณหภูมิจนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติแล้วใส่สนามแม่เหล็กจะเห็นปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ตามปกติได้

2.2 ประเภทของตัวนำยวดยิ่ง

ประเภทของตัวนำยวดยิ่ง เมื่อใช้สมมติฐานทางแม่เหล็กเป็นเกณฑ์ จะสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ประกอบด้วย ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2

1. ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 (Type I Superconductors)

โดยทั่วไปอุณหภูมิและสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงๆ สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้ ถ้าสามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยที่อุณหภูมินั้นมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและสนามแม่เหล็กภายในเป็นไปตามภาพประกอบ 4



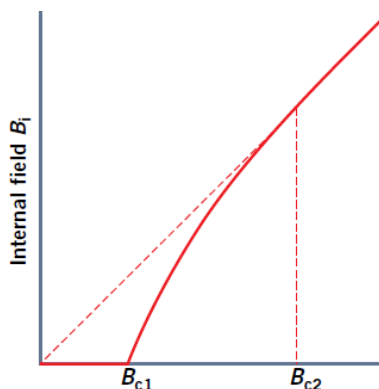
ภาพประกอบ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและสนามแม่เหล็กภายในของตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1

ที่มา : Bosi, S; & et al. (2010). *In2 Physics @ HSC Activity Manual*. p. 213.

2.2.2 ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 (Type II Superconductors)

ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 มีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต 2 ค่า คือสนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง (Lower critical magnetic field : H_{c1}) และสนามแม่เหล็กวิกฤตบน (Upper critical magnetic field : H_{c2}) เมื่อสนามแม่เหล็กจากภายนอกมีค่าน้อยกว่า H_{c1} ตัวนำยวดยิ่งจะมีสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่ง

อย่างสมบูรณ์ และจะแสดงปรากฏการณ์ไมเนอร์อย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกับตัวนำยิ่งยวดประเภทที่ 1 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่ามากกว่า H_{c1} แต่น้อยกว่า H_{c2} ตัวนำยิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมเนอร์ไม่สมบูรณ์และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่ามากกว่า H_{c2} ตัวนำยิ่งยวดจะกลายเป็นตัวนำปกติ ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและสนามแม่เหล็กภายในของตัวนำยิ่งยวดประเภทที่ 2

ที่มา : Bosi, S; & et al. (2010). *In2 Physics @ HSC Activity Manual*. p. 213.

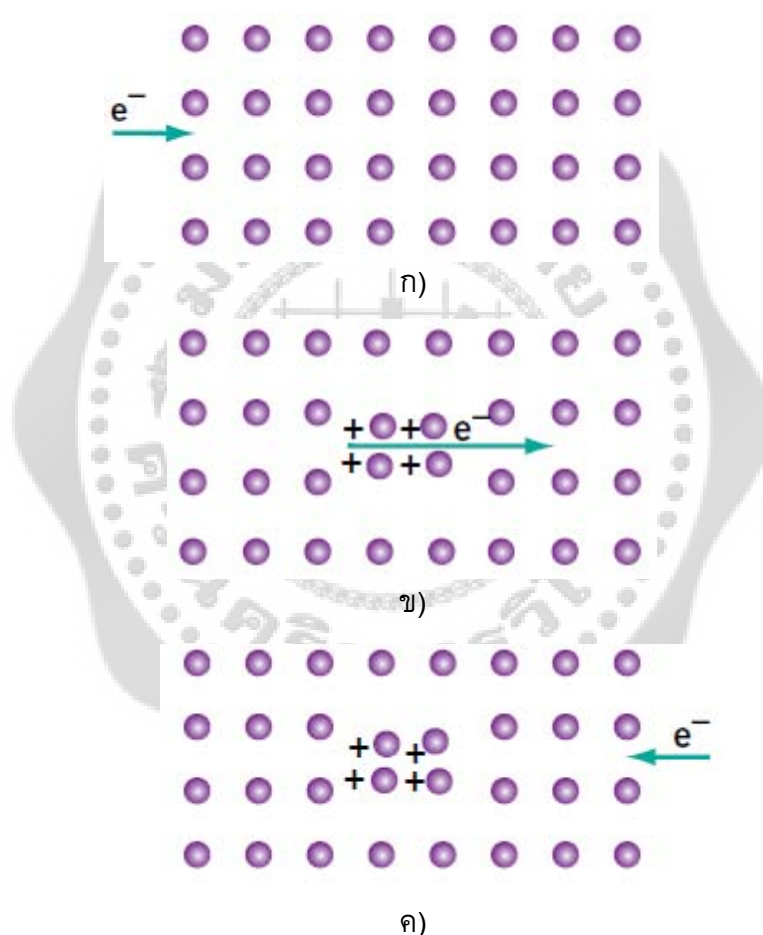
2.3 ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginzburg-Landau Theory)

เป็นทฤษฎีแบบ Phenomenological theory นำเสนอโดยกินซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginzburg; & Landau. 1950: 1064) โดยได้กำหนดให้ระบบของตัวนำยิ่งยวดมีตัวแปรของความ เป็นระเบียบเกิดขึ้น เพื่อใช้อธิบายสมบัติของตัวนำยิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก แต่เนื่องด้วย ทฤษฎีนี้อธิบายแบบกว้างๆ จึงเกิดข้อบกพร่องที่ว่า ไม่สามารถอธิบายได้ว่า อิเล็กตรอนในตัวนำ ยิ่งยวดจะทำอันตรกริยากันอย่างไร

ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวได้ถูกพัฒนาโดยอะบริโกซอฟ (Abrikosov, A.A. 1957: 1174) ได้จัดประเภทของตัวนำยิ่งยวด โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวอาพันธ์ (coherence length : ξ) และความลึกซาบซึมได้ของลอนดอน (London penetration depth : λ_L) โดยกำหนด พารามิเตอร์ K ขึ้นมาซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวอาพันธ์และความลึกซาบซึมได้ของ ลอนดอน โดยสามารถแบ่งประเภทของตัวนำยิ่งยวดจากค่า K เมื่อ $K < \frac{1}{\sqrt{2}}$ จัดเป็นตัวนำยิ่งยวด ประเภทที่ 1 และเมื่อ $K > \frac{1}{\sqrt{2}}$ จัดเป็นตัวนำยิ่งยวดประเภทที่ 2

2.4 ทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory)

ทฤษฎีบีซีเอสเป็นทฤษฎีแบบ Microscopic theory ถูกนำเสนอโดยบาร์ดีน คูเปอร์ และ ชริฟเฟอร์ (Bardeen; & Cooper; & Schrieffer. 1957) เพื่ออธิบายกลไกการเกิดและสมบัติต่างๆ ของตัวนำยิ่งยวดที่ดีที่สุดเป็นทฤษฎีที่แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอน โดยมีแนวคิดว่าการเกิดสภาพนำยิ่งยวดเกิดจากการดึงดูดกันของอิเล็กตรอนสองตัวภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ภาพประกอบ 6 แสดงอันตรกิริยาแบบดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนสองตัวภายในตัวนำยิ่งยวดอาศัยโฟนอนเป็นสื่อกลางในการจับคู่อิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนที่สามารถจับคู่กันจะต้องมีโมเมนตัมและสปินตรงข้ามกัน และเรียกกิเล็กตรอนที่จับคู่กันนี้ว่า คูคูเปอร์ (Cooper pair)



ภาพประกอบ 6 แผนภาพของอันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดคูคูเปอร์

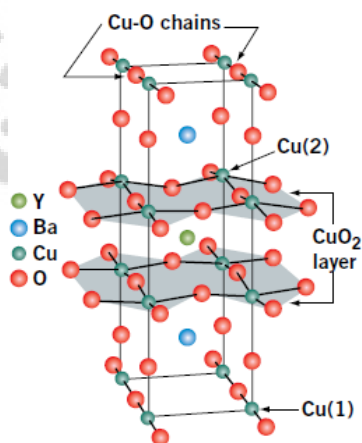
- ก) อิเล็กตรอนตัวแรกที่เคลื่อนเข้ามา
- ข) เมื่ออิเล็กตรอนตัวแรกเคลื่อนเข้าหาโครงสร้างผลึกทำให้เสียรูป
- ค) อิเล็กตรอนตัวที่สองจะถูกดึงดูดเข้ามาด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกที่เกิดจากการเสียรูปของโครงสร้างผลึก

ที่มา : Bosi, S; & et al. (2010). *In2 Physics @ HSC Activity Manual*. p. 215.

2.5 การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123

ในปี ค.ศ.1987 วูและคณะ (Wu ; & et al. 1987: 908) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นคือ ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) การวัดอุณหภูมิวิกฤตเป็นการวัดแบบ 4 ขั้ว วัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ซึ่งวัดค่าของอุณหภูมิวิกฤตออกเซตได้เท่ากับ 93 เคลวิน

ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ที่ถูกค้นพบโดยวูและคณะในปี ค.ศ. 1987 นี้มีสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ สารนี้ใน 1 หน่วยเซลล์ประกอบไปด้วยอะตอมของยิทเทรียม 1 อะตอมมีพันธะของ CuO อยู่ 1 พันธะ อะตอมของแบเรียมอยู่ 2 อะตอมและมีระนาบของ CuO_2 อยู่ 2 ระนาบ อีกทั้งจำนวนอะตอมของยิทเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมจะมีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ สารกลุ่มนี้มีโครงสร้างเป็นแบบออโรมบิกและมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 93 เคลวิน มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.8219$ อังสตรอม $b = 3.8844$ อังสตรอม และ $c = 11.6862$ อังสตรอม ดังภาพประกอบ 7 ลักษณะโครงสร้างของสารกลุ่มนี้มีลักษณะเป็นชั้นๆ ประกอบไปด้วยระนาบของ CuO_2 และ พันธะของ $Cu-O$ และระหว่างระนาบของ CuO_2 มีอะตอมของยิทเทรียมและแบเรียมอยู่สลับกันจะทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า การนำไฟฟ้าของสารกลุ่มนี้จะเกิดขึ้นได้ในระนาบของ CuO_2 โดยมีอะตอมของคอปเปอร์เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่ง อีกทั้งการเกิดสภาพนำยวดยิ่งจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิทำให้โครงสร้างของสารเกิดการบิดเบี้ยวได้ การเพิ่มจำนวนระนาบของ CuO_2 จึงเป็นสมมติฐานที่สำคัญในการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$

ที่มา : Bosi, S.; & et al. (2010). *In2 Physics @ HSC Activity Manual*. p.216.

ในปี ค.ศ. 2007 จูติพงศ์และคณะ (จูติพงศ์ และคณะ. 2550:1-16) ได้ทำงานวิจัยเรื่องการเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยมีสารตั้งต้นคือ ยิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ ในการคำนวณหาสัดส่วนของมวลเป็นกรัมของสารตั้งต้นจากปฏิกิริยาเคมีของสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งมีสูตรทางเคมี ดังสมการ (1)



จากสมการ (1) สามารถคำนวณหาสัดส่วนของมวลเป็นกรัมออกมาได้จากสมการเคมี โดยแสดงให้เห็นว่าจากสูตร Y_2O_3 หมายถึง มีจำนวนยิทเทรียมอยู่ 2 อะตอม และมีจำนวนของออกซิเจนอยู่ 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมยิทเทรียมมีค่า 88.905 ซึ่งจะหมายถึง ยิทเทรียม 88.905 กรัมจะมี 6.02×10^{23} อะตอม ส่วนออกซิเจนมีมวลอะตอมเท่ากับ 15.9994 หมายถึง ออกซิเจน 15.9994 กรัม จะมี 6.02×10^{23} อะตอม ดังนั้น สำหรับยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) จะสามารถแบ่งแยกได้เป็น

ในส่วนของยิทเทรียม : $\text{Y}_2 = 2 \times 88.905 = 177.810$

ในส่วนของออกซิเจน : $\text{O}_3 = 3 \times 15.9994 = 47.998$

ดังนั้นมวลโมเลกุลในส่วนของ Y_2O_3 มีค่าเท่ากับ $177.810 + 47.998 = 225.808$ กรัม

ในส่วนของ แบเรียมคาร์บอเนต จะประกอบด้วยแบเรียมอยู่ 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และมีจำนวนของออกซิเจนอยู่ 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมแบเรียมมีค่า 137.34 มวลอะตอมคาร์บอนมีค่า 12.0112 ส่วนออกซิเจนมีมวลอะตอมเท่ากับ 15.9994 ดังนั้นสำหรับแบเรียมคาร์บอเนต จะสามารถแบ่งแยกได้เป็น

ในส่วนของแบเรียม : $\text{Ba} = 1 \times 137.34 = 137.340$

ในส่วนของคาร์บอน : $\text{C} = 1 \times 12.0112 = 12.0112$

ในส่วนของออกซิเจน : $\text{O}_3 = 3 \times 15.9994 = 47.998$

ดังนั้นมวลโมเลกุลในส่วนของ BaCO_3 มีค่าเท่ากับ $137.34 + 12.0112 + 47.998 = 197.349$ กรัม

ในส่วนของ คอปเปอร์ออกไซด์ จากสูตรเคมี CuO จะประกอบด้วยคอปเปอร์อยู่ 1 อะตอม และมีออกซิเจน 1 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมคอปเปอร์มีค่า 63.546 ส่วนออกซิเจนมีมวลอะตอมเท่ากับ 15.9994 ดังนั้นสำหรับคอปเปอร์ออกไซด์ จะสามารถแบ่งแยกได้เป็น

ในส่วนของคอปเปอร์ : $\text{Cu} = 1 \times 63.546 = 63.546$

ในส่วนของออกซิเจน : $\text{O} = 1 \times 15.9994 = 15.999$

ดังนั้นมวลโมเลกุลในส่วนของ CuO มีค่าเท่ากับ $63.546 + 15.9994 = 79.545$ กรัม

จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมจากปฏิกิริยาเคมีคือ

$$\text{ยิทเทรียมออกไซด์} : 1 \times 225.8082 = 225.808 \text{ กรัม}$$

$$\text{แบเรียมคาร์บอเนต} : 4 \times 197.3494 = 789.397 \text{ กรัม}$$

$$\text{คอปเปอร์ออกไซด์} : 6 \times 79.5454 = 477.272 \text{ กรัม}$$

ในทางปฏิบัติ สามารถใช้อัตราส่วนที่ทำให้ย่อยลง ซึ่งทำได้โดยนำข้อมูลข้างบนมาหารตลอดด้วย 10 จะได้ว่า

$$\text{ยิทเทรียมออกไซด์} \quad \text{เท่ากับ} \quad 22.58 \text{ กรัม}$$

$$\text{แบเรียมคาร์บอเนต} \quad \text{เท่ากับ} \quad 78.93 \text{ กรัม}$$

$$\text{คอปเปอร์ออกไซด์} \quad \text{เท่ากับ} \quad 47.72 \text{ กรัม}$$

ข้อควรระวังในการใช้สารเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) เป็นสารเคมีที่เป็นอันตราย ดังนั้นในการผสมสารเคมีจึงควรหาหน้ากากกันฝุ่นและถุงมือ เพื่อป้องกันอันตรายจากสารเคมีดังกล่าว

ในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O มีขั้นตอนดังนี้ คือ

ขั้นที่หนึ่ง: การผสมสารเคมี

การผสมสารเป็นกระบวนการเริ่มแรกของกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งซึ่งจะต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการนี้ โดยนำยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารดังกล่าวมีลักษณะเป็นผงโดยใช้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมดังนี้

$$\text{ยิทเทรียมออกไซด์ (Y}_2\text{O}_3\text{)} \quad \text{เท่ากับ} \quad 11.29 \text{ กรัม}$$

$$\text{แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO}_3\text{)} \quad \text{เท่ากับ} \quad 39.47 \text{ กรัม}$$

$$\text{คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)} \quad \text{เท่ากับ} \quad 23.86 \text{ กรัม}$$

ผสมสารทั้งสามให้เข้ากันในถ้วยครกอลูมินาจนได้สารที่มีเทา จากนั้นนำไปใส่ในเตาเผาสารเพื่อทำการเผาต่อไป

ขั้นตอนที่สอง การเผาแบบผง (Calcination)

นำสารที่ได้จากข้อ 2.5.1 ใส่ในถ้วยอลูมินา แล้วเริ่มต้นกระบวนการเผาแบบผงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการเพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที จนอุณหภูมิของเตาสูงถึง 950 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิลดลงมาถึง 100 องศาเซลเซียส อีกครั้งก็เป็นอันเสร็จของกระบวนการเผาครั้งที่ 1 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเผาแบบผงครั้ง 1 สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นสารสีดำจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง มีรูพรุน หลังจากนั้นนำสารที่ได้จากกระบวนการเผาแบบผงครั้ง 1 ไปบดในครกอลูมินาจนได้สารที่เป็นผงละเอียดสีดำ แล้วนำผงสีดำนี้นี้ไปเผาแบบผงอีกครั้ง

ขั้นตอนที่สาม การเผาขึ้นรูป (Sintering)

นำสารที่ได้จากการเผาแบบผงครั้งที่ 2 ไปบดให้ละเอียดในด้วยครกอลูมินา แล้วนำมาใส่ถ้วยอลูมินาอีกครั้งเพื่อนำไปเผาในขั้นตอนต่อไป โดยเริ่มต้นกระบวนการเผาขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส แล้วคงไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แล้วคงที่อุณหภูมินี้ไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิอีกครั้งด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสอีกครั้ง

สารที่เตรียมได้จะมีลักษณะแผ่นกลมสีดำ จากนั้นศึกษาสมบัติของสภาพนำวดยิ่งของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ แล้วทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตและสมบัติอื่นๆ ของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD SEM และ EDX ซึ่งผลการทดลองที่ทำให้ทราบว่าตัวนำวดยิ่งที่เตรียมได้มีสูตรเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$

ในปี ค.ศ. 2011 โทปาลและอักโดเกน (Topal; & Akdogan. 2011: 1815-1820) ได้เตรียมตัวนำวดยิ่งด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้น 3 ชนิด ได้แก่ ยิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ ในการเตรียมตัวนำวดยิ่ง Y-2352, Y-145 และ Y-259 จากนั้นผสมสารตั้งต้นในโกรกบดสาร แล้วอัดเม็ดภายใต้ความดัน 2,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นนำเม็ดสารตัวอย่างเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ชั่วโมง นำเม็ดสารตัวอย่างออกมาบดและอัดหลังจากเวลาผ่านไปทุกๆ 20 ชั่วโมง สุดท้าย ปล่อยก๊าซออกซิเจน 0.5 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ มายังอุณหภูมิห้อง (50 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง) พบว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำวดยิ่ง Y-2352 Y-145 และ Y-259 อยู่ที่ 98 เคลวิน 98 เคลวิน และ 97.3 เคลวิน ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าค่าคงตัวแลตทิซของตัวนำวดยิ่ง มีค่าดังนี้ Y-2352 ($a = 3.835$ อังสตรอม $b = 3.892$ อังสตรอม และ $c = 11.593$ อังสตรอม) Y-145 ($a = 3.840$ อังสตรอม $b = 3.887$ อังสตรอม และ $c = 11.581$ อังสตรอม) และ Y-259 ($a = 3.821$ อังสตรอม $b = 3.898$ อังสตรอม และ $c = 11.660$ อังสตรอม)

2.6 การเตรียมตัวนำวดยิ่งเจือด้วยฟลูออรีน

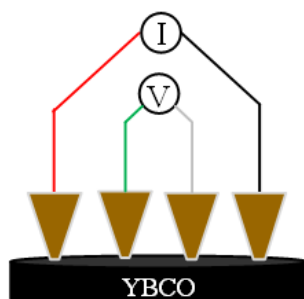
ในปี ค.ศ. 1987 โอฟชินสกีและคณะ (Ovshinsky; & et al. 1987) ได้เตรียมตัวนำวดยิ่ง Y123 เจือด้วยฟลูออรีนด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง สำหรับตัวนำวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ ใช้ยิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ เป็นสารตั้งต้น ส่วนตัวนำวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{F}_x\text{O}_y$ ($x = 0, 1, 2, 3$ และ 4) จะใช้ยิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมฟลูออไรด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ จากนั้นผสมสารตั้งต้นตามที่คำนวณแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาแบบผงมาบดแล้วนำไปอัดเป็นเม็ดแล้วเผาขึ้นรูปที่ 950 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พร้อมกับเจือ O_2 เมื่อลดอุณหภูมิไปที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3F_{2O_y}$ มีอุณหภูมิวิกฤตตอนบนอยู่ที่ประมาณ 155 เคลวิน

ในปี ค.ศ. 2011 ศรีนิวาสน์และคณะ (Srinivasan; & et al. 2011: 1277-1283) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y358 เจือด้วยฟลูออรีน โดยใช้ยี่ห้อเตรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต คอปเปอร์ออกไซด์ และ คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ เป็นสารตั้งต้น โดยได้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง $Y_3Ba_5Cu_8O_y$ (Sample-A) และ $Y_3Ba_5Cu_8O_{y-0.2}F_{0.2}$ (Sample-B) โดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยนำสารตั้งต้น ในอัตราส่วนที่เหมาะสมมาผสมแล้วบดรวมกัน จากนั้นนำไปเผาแบบผง ในเตาเผาแบบท่อที่อุณหภูมิ 810 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง นำผงที่ได้จากการเผาแบบผง มาบดแล้วนำไปอัดขึ้นรูปภายใต้ความดัน 5000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำสารตัวอย่าง A และ สารตัวอย่าง B ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วไปเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิให้เย็นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง พบว่าสารตัวอย่าง B มีการหลอมของฟลูออรีนเล็กน้อยบริเวณผิว จึงนำสารตัวอย่าง B มาบดและอัดขึ้นรูปอีกครั้งจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเรียกว่าสารตัวอย่าง B' พบว่าอุณหภูมิวิกฤตตอนบนของสารตัวอย่างมีค่าดังนี้ สารตัวอย่าง A มีอุณหภูมิวิกฤตตอนบนเท่ากับ 92 เคลวิน สารตัวอย่าง B มีอุณหภูมิวิกฤตตอนบนเท่ากับ 98 เคลวิน และสารตัวอย่าง B' มีอุณหภูมิวิกฤตตอนบนเท่ากับ 110 เคลวิน

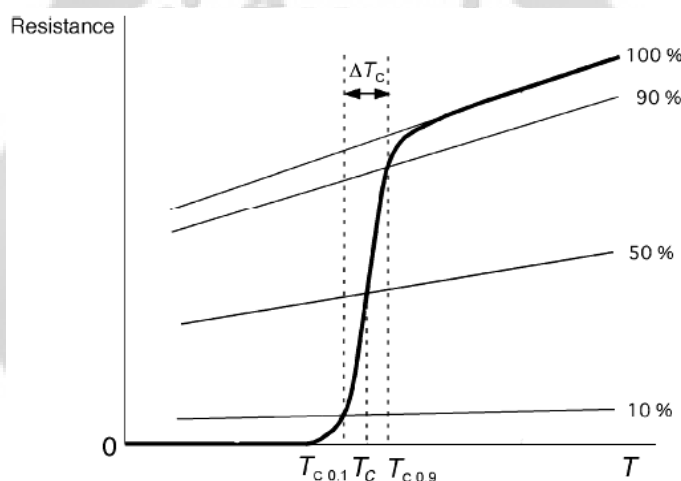
2.7 การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว เป็นการวัดเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่ง โดยหลักการทำขั้วคือ นำตัวนำยวดยิ่งมาทำขั้ว 4 ขั้ว โดยใช้กาวเงินประสานระหว่างขั้วกับสารตัวนำยวดยิ่ง เพราะกาวเงินนี้มีคุณสมบัติช่วยในการนำไฟฟ้า โดยแต่ละขั้วจะมีระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร สองขั้วด้านนอกจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สองขั้วด้านในเป็นขั้วที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 8 โดยก่อนทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง จะทำการวัดความต้านทานจากโอห์มมิเตอร์ที่อุณหภูมิห้องซึ่งจะมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม



ภาพประกอบ 8 ลักษณะขั้วของหัววัดความต้านทานแบบ 4 ขั้ว

การอ่านค่าอุณหภูมิวิกฤตสามารถอ่านได้จากกราฟระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ โดยมูราเซและคณะ (Murase; & et al. 2001: 1197) ได้แบ่งผลของการวัดอุณหภูมิวิกฤตออกเป็นช่วงๆ อยู่ 4 ช่วงในแกนนอน ดังนี้ ช่วงกราฟตรงสภาพปกตินี้ให้มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ถัดจากช่วงสภาพปกติมา 10 เปอร์เซ็นต์ ตัวนำวยดยังจะมีสภาพของตัวนำปกติอยู่ 90 เปอร์เซ็นต์ ถัดลงมาจนกระทั่งกึ่งกลางของกราฟ ตัวนำวยดยังจะมีสภาพของตัวนำปกติ 50 เปอร์เซ็นต์ และก่อนจะถึงสภาพนำวยดยังอยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยการแบ่งกราฟของการวัดอุณหภูมิวิกฤตออกเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังภาพประกอบ 9 ซึ่งได้จากการทำการวัดแบบ 4 ขั้ว จากนั้นลากเส้นตรงทุกช่วง 100 เปอร์เซ็นต์, 90 เปอร์เซ็นต์, 50 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ และลากเส้นแกนตั้งที่ค่า 90 เปอร์เซ็นต์, 50 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ตัดเส้นแกนนอน และสามารถหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิวิกฤต (ΔT_c) ของกราฟระหว่างช่วง 10 เปอร์เซ็นต์ และ 90 เปอร์เซ็นต์ ได้ตามลำดับ



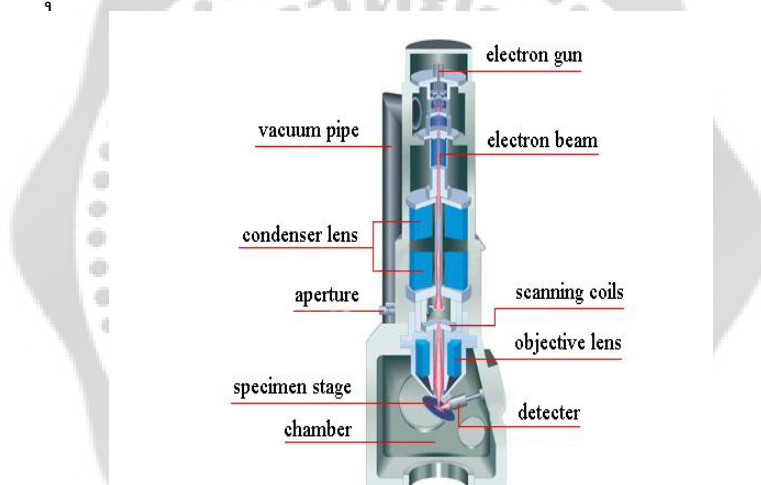
ภาพประกอบ 9 แสดงการหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของมูราเซและคณะ

ที่มา : Murase.; & et al. (2001). *Physica C*. p. 1197.

เนื่องจากอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบการวัดนี้จะเกิดการหดตัวเมื่อใส่ไนโตรเจนเหลวลงไปในระบบการวัดเพื่อใช้เป็นสารหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 77 เคลวิน การอ่านค่าอุณหภูมิวิกฤตโดยใช้หลักการของมูราเซแต่จะพิจารณาจุดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 0 เปอร์เซ็นต์เป็นหลักและใช้จุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ มาประกอบการพิจารณา

2.8 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 เท่าจนถึง 500,000 เท่า การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น โดยมีหลักการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังภาพประกอบ 10 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) สแกนลงบนตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศ โดยลำอิเล็กตรอนนี้เกิดขึ้นจากการกระทำให้คาโทดทั้งสแตนท์ร้อนจนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูงและถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่เล็ก โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า 2 ชุด



ภาพประกอบ 10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ที่มา : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/images/articles/SEM/sem001.jpg> (online)

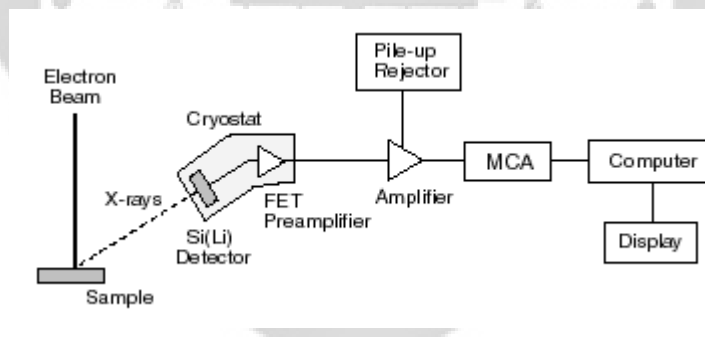
เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งลำอิเล็กตรอนนี้เราเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ อิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง โดยทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหลุดออกจากวงโคจร และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดวงโคจรนี้ว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยสามารถศึกษาลักษณะของพื้นผิว

ตัวอย่างได้จากการใช้หัววัดสัญญาณ (Detector) รับอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้ และนำไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่นำมาสร้างเป็นภาพมากที่สุด
2. อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered electron) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี และลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

2.9 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน (EDX)

การวัดเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray spectroscopy: EDX) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารโดยยิงรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (primary x-ray beam) ไปยังบริเวณที่ต้องการศึกษา รังสีเอกซ์ปฐมภูมินี้จะทะลุเข้าไปชนอิเล็กตรอนวงในในชั้น K ให้หลุดออกทำให้อิเล็กตรอนวงนอกชั้น L และชั้น M ซึ่งมีระดับพลังงานที่สูงกว่าเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนวงในให้หลุดออก แล้วปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (secondary x-ray beam) รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนี้มีสมบัติเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด โดยในส่วนที่ใช้งานเครื่อง EDX เป็นเครื่องมือที่ใช้แหล่งกำเนิดร่วมกับเครื่อง SEM ภาพประกอบ 11 แสดงการทำงานของเครื่อง EDX



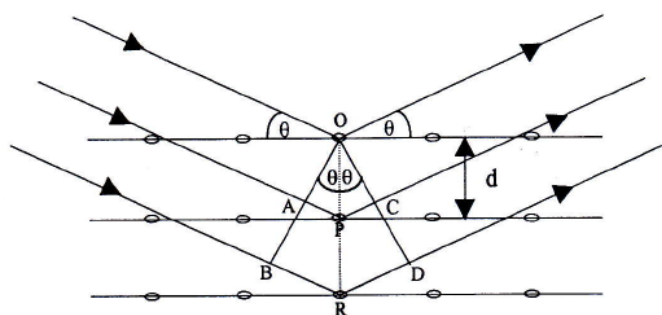
ภาพประกอบ 11 แสดงการทำงานของเครื่อง EDX

ที่มา : Goldstein.; & et al. (1981). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*.

2.10 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-Ray diffractometer) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก (Crystal structure) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังภาพประกอบ 12 และความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างของผลึกมาใช้ในการวิเคราะห์ เทคนิคนี้สามารถบอกเฟสของสารและบอกขนาดของผลึกได้ โดยจะใช้ลำรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวฉายลงบนสารตัวอย่างที่ถูก

วางอยู่บนแท่นดังภาพประกอบ 13 รังสีที่เลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแล้วบันทึกค่าที่ได้ โดยเครื่องตรวจวัดจะหมุนเครื่องตรวจวัดด้วยความเร็วคงที่ เพื่อบันทึกค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เครื่องตรวจวัดได้แล้วนำมาเขียนกราฟดิฟแฟรกโทแกรม (Diffractogram) ซึ่งประกอบด้วยพีคต่างๆ โดยที่พีคแต่ละพีคจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่างๆ จึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ จากความสัมพันธ์ของสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) จะสามารถหาค่า d ของแต่ละพีคแล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปอะตอมภายในผลึกจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆ กัน



ภาพประกอบ 12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ที่มา : วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. (2543). เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น. หน้า 314.

จากภาพประกอบ 12 เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าผลึกเป็นมุม θ เพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบนและการกระเจิงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอม O P และ R ถ้า

$$AP + PC = n\lambda \quad (2)$$

เมื่อ n คือจำนวนเต็ม

รังสีที่กระเจิงจะอยู่ในเฟสที่ OCD ผลึกก็จะทำหน้าที่สะท้อนรังสีเอกซ์ จะเห็นว่า

$$AP = PC = d \sin \theta \quad (3)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

ดังนั้นจากสมการที่ (2) และ (3) สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการ (4) เมื่อคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ที่มุม θ เรียกสมการนี้ว่า สมการของแบรกก์ (Bragg's equation)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4)$$

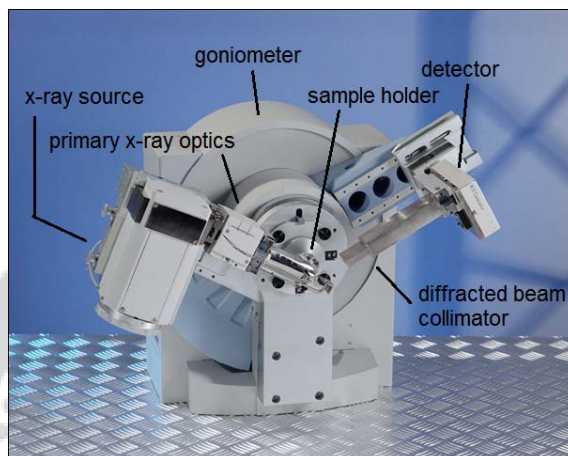
เมื่อ

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อน เมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ อันดับของการสะท้อนเป็นจำนวนเต็ม



ภาพประกอบ 13 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

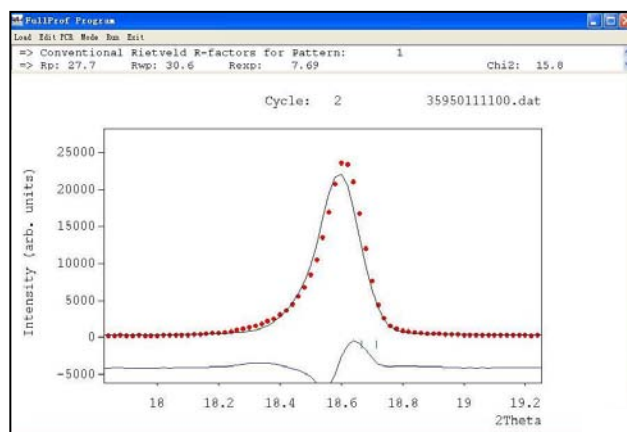
ที่มา : <http://www.xrpd.eu> (online)

2.11 โปรแกรมฟูลพรอฟ (Fullprof)

โปรแกรมฟูลพรอฟเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าคงที่หน่วยเซลล์ของสารตัวอย่าง ซึ่งสามารถหาได้จากการนำข้อมูลเอกซเรย์สเปกตรัมของสารตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองโครงสร้างที่ถูกกำหนดขึ้น โดยแบบจำลองโครงสร้างที่กำหนดขึ้นนี้จะต้องมีการใส่ค่าตัวแปรเริ่มต้นต่างๆ ดังนี้

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

หลักการทำงานของโปรแกรม เป็นการวิเคราะห์ปริมาณสองปริมาณโดยจะต้องทำให้เส้นกราฟ (วงกลม) ที่เกิดจากการคำนวณไปซ้อนทับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (สีดำ) ให้มากที่สุด ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 หลักการทำงานของโปรแกรมฟูลพรอฟ

ที่มา : <http://emuch.net/html/201011/2558663.html> (online)

และมีพารามิเตอร์ในคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองดังนี้

1. ข้อมูลแสดงลักษณะเฉพาะ (Profile factor) (Rodriguez. 2000: 43)

$$R_p = \frac{\sum_i |y_{oi} - y_{ci}|}{\sum_i y_{oi}} \quad (5)$$

2. แฟกเตอร์ของข้อมูลโดยน้ำหนัก (Weighted profile factor) (Rodriguez. 2000: 44)

$$R_{wp} = 100 \left[\frac{\sum_i w_i |y_{oi} - y_{ci}|^2}{\sum_i w_i y_{oi}^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

3. แฟกเตอร์ค่าคาดหวัง (Expected factor) (Rodriguez. 2000: 45)

$$R_{exp} = 100 \left[\frac{n - p}{\sum_i w_i y_{oi}} \right]^{1/2} \quad (7)$$

4. ค่าความถูกต้อง (Goodness) (Rodriguez. 2000: 45)

$$\chi^2 = \left[\frac{R_{wp}}{R_{exp}} \right]^2 \quad (8)$$

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 รูปแบบของกราฟจากการจำลองโครงสร้างขึ้นมาจากการทดลอง
w_i	คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง

การเปรียบเทียบของกระบวนการทั้งหมดที่ได้จะดูจากค่า R โดยค่า R เหล่านี้ควรจะมีค่าน้อยกว่า 15 % จึงเป็นค่าที่ดี ส่วนคุณภาพของกระบวนการจำลองโครงสร้างดูได้จาก χ^2 ซึ่งควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.5 จึงจะดี แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า 1 นั้นหมายความว่ามีความผิดพลาดไป (Young. 2002: 21)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะประกอบด้วยกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y_{123} $Y_{123}+F_{0.1}$ $Y_{123}+F_{0.2}$ Y_{235} $Y_{235}+F_{0.1}$ และ $Y_{235}+F_{0.2}$ แล้วนำสารตัวอย่างที่เตรียมได้มาวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งและสมบัติทางฟิสิกส์

3.1 การเตรียมตัวนำยวดยิ่ง

1. การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง

ตัวนำยวดยิ่ง Y_{123} , $Y_{123}+F_{0.1}$ $Y_{123}+F_{0.2}$ Y_{235} $Y_{235}+F_{0.1}$ และ $Y_{235}+F_{0.2}$ จะเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นคือ ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2)

1.1 การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y_{123}



จากสมการ (9) สามารถหาคำนวณหาสัดส่วนของมวลออกมาเป็นกรัมได้ 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ประกอบด้วย ยิทเทรียม 2 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของยิทเทรียมมีค่า 88.906 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของยิทเทรียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[(2 \times 88.906) + (3 \times 15.999)] = 225.809$ กรัมจากสมการ (9) ใช้ยิทเทรียมออกไซด์ 0.5 โมลจะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมในส่วนของยิทเทรียมออกไซด์เท่ากับ $0.5 \times 225.809 = 112.9045$ กรัม

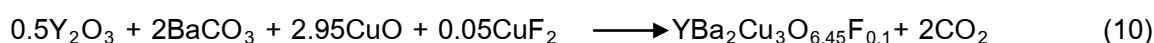
ส่วนที่ 2 แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ประกอบด้วย แบเรียม 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของแบเรียมมีค่า 137.327 มวลอะตอมของคาร์บอนมีค่า 12.011 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ $[137.327 + 12.011 + (3 \times 15.999)] = 197.335$ กรัม จากสมการ(9) ใช้แบเรียมคาร์บอเนต 2 โมลจะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของแบเรียมคาร์บอเนตเท่ากับ $2 \times 197.335 = 394.67$ กรัม

ส่วนที่ 3 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + 15.999] = 79.545$ กรัมจากสมการ (9) ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ 3 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ $3 \times 79.545 = 238.635$ กรัม

ในงานวิจัยนี้ต้องการ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ จำนวน 15 กรัม เพราะฉะนั้นต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	เท่ากับ	2.573 กรัม
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)	เท่ากับ	8.994 กรัม
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	เท่ากับ	5.438 กรัม

1.2 การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y123}+\text{F}_{0.1}$



จากสมการ (10) สามารถหาคำนวณหาสัดส่วนของมวลออกมาเป็นกรัมได้ 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ประกอบด้วย ยิทเทรียม 2 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของยิทเทรียมมีค่า 88.906 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของยิทเทรียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[(2 \times 88.906) + (3 \times 15.999)] = 225.809$ กรัม จากสมการ (10) ใช้ยิทเทรียมออกไซด์ 0.5 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมในส่วนของยิทเทรียมออกไซด์เท่ากับ $0.5 \times 225.809 = 112.9045$ กรัม

ส่วนที่ 2 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) ประกอบด้วย แบเรียม 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของแบเรียมมีค่า 137.327 มวลอะตอมของคาร์บอนมีค่า 12.011 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ $[137.327 + 12.01 + (3 \times 15.999)] = 197.335$ กรัม จากสมการ (10) ใช้แบเรียมคาร์บอเนต 2 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของแบเรียมคาร์บอเนตเท่ากับ $2 \times 197.335 = 394.67$ กรัม

ส่วนที่ 3 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + 15.999] = 79.545$ กรัมจากสมการ (10) ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ 2.95 โมลจะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์ออกไซด์เท่ากับ $2.95 \times 79.545 = 234.65775$ กรัม

ส่วนที่ 4 คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และฟลูออรีน 2 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของฟลูออรีนมีค่า 18.998 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + (2 \times 18.998)] = 101.542$ กรัม จากสมการ(10) ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ 0.05 โมลจะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์เท่ากับ $0.05 \times 101.542 = 5.0771$ กรัม

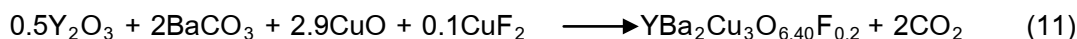
ในงานวิจัยนี้ต้องการ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.45}\text{F}_{0.1}$ จำนวน 15 กรัม เพราะฉะนั้นต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	เท่ากับ	2.568 กรัม
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)	เท่ากับ	8.979 กรัม

คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เท่ากับ 5.338 กรัม

คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF₂) เท่ากับ 0.115 กรัม

1.3 การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2}



จากสมการ (11) สามารถหาคำนวณหาสัดส่วนของมวลออกมาเป็นกรัมได้ 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ยิทเทรียมออกไซด์ (Y₂O₃) ประกอบด้วย ยิทเทรียม 2 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของยิทเทรียมมีค่า 88.906 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้น มวลโมเลกุลของยิทเทรียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ [(2×88.906) + (3×15.999)] = 225.809 กรัมจากสมการ (11) ใช้ยิทเทรียมออกไซด์ 0.5 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมในส่วนของยิทเทรียมออกไซด์เท่ากับ 0.5×225.809 = 112.9045 กรัม

ส่วนที่ 2 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) ประกอบด้วย แบเรียม 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของแบเรียมมีค่า 137.327 มวลอะตอมของคาร์บอนมีค่า 12.011 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ [137.327 + 12.011 + (3×15.999)] = 197.335 กรัม จากสมการ (11) ใช้แบเรียมคาร์บอเนต 2 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของแบเรียมคาร์บอเนตเท่ากับ 2×197.335 = 394.67 กรัม

ส่วนที่ 3 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้น มวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ [63.546 + 15.999] = 79.545 กรัมจากสมการ (11) ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ 2.9 โมลจะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.9×79.545 = 230.6805 กรัม

ส่วนที่ 4 คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF₂) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และฟลูออรีน 2 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของฟลูออรีนมีค่า 18.998 ดังนั้น มวลโมเลกุลของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ [63.546 + (2×18.998)] = 101.542 กรัมจากสมการ(11) ใช้คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ 0.1 โมลจะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์เท่ากับ 0.1×101.542 = 10.1542 กรัม

ในงานวิจัยนี้ต้องการ YBa₂Cu₃O_{6.40}F_{0.2} จำนวน 15 กรัม เพราะฉะนั้นต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้

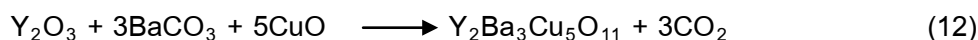
ยิทเทรียมออกไซด์ (Y₂O₃) เท่ากับ 2.564กรัม

แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) เท่ากับ 8.964กรัม

คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เท่ากับ 5.239กรัม

คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF₂) เท่ากับ 0.230 กรัม

1.4 การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง 235



จากสมการ (12) สามารถหาคำนวณหาสัดส่วนของมวลออกมาเป็นกรัมได้ 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ประกอบด้วย ยิทเทรียม 2 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของยิทเทรียมมีค่า 88.906 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของยิทเทรียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[(2 \times 88.906) + (3 \times 15.999)] = 225.809$ กรัมจากสมการ (12) ใช้ยิทเทรียมออกไซด์ 1 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมในส่วนของยิทเทรียมออกไซด์เท่ากับ $1 \times 225.809 = 225.809$ กรัม

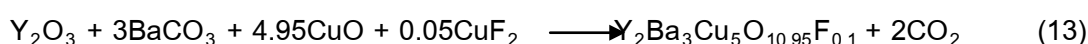
ส่วนที่ 2 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) ประกอบด้วย แบเรียม 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของแบเรียมมีค่า 137.327 มวลอะตอมของคาร์บอนมีค่า 12.011 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ $[137.327 + 12.011 + (3 \times 15.999)] = 197.335$ กรัม จากสมการ (12) ใช้แบเรียมคาร์บอเนต 3 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของแบเรียมคาร์บอเนตเท่ากับ $3 \times 197.335 = 592.005$ กรัม

ส่วนที่ 3 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + 15.999] = 79.545$ กรัม จากสมการ (12) ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ 5 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ $5 \times 79.545 = 397.725$ กรัม

ในงานวิจัยนี้ต้องการ $\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_{11}$ จำนวน 15 กรัม เพราะฉะนั้นต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	เท่ากับ	3.126 กรัม
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)	เท่ากับ	8.196 กรัม
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	เท่ากับ	5.506 กรัม

1.5 การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y}_{235}\text{F}_{0.1}$



จากสมการ (13) สามารถหาคำนวณหาสัดส่วนของมวลออกมาเป็นกรัมได้ 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ประกอบด้วย ยิทเทรียม 2 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของยิทเทรียมมีค่า 88.906 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้น

มวลโมเลกุลของยิทเทรียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[(2 \times 88.906) + (3 \times 15.999)] = 225.809$ กรัมจากสมการ (13) ใช้ยิทเทรียมออกไซด์ 1 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมในส่วนของยิทเทรียมออกไซด์เท่ากับ $1 \times 225.809 = 225.809$ กรัม

ส่วนที่ 2 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) ประกอบด้วย แบเรียม 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของแบเรียมมีค่า 137.327 มวลอะตอมของคาร์บอนมีค่า 12.011 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ $[137.327 + 12.011 + (3 \times 15.999)] = 197.335$ กรัม จากสมการ (13) ใช้แบเรียมคาร์บอเนต 3 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของแบเรียมคาร์บอเนตเท่ากับ $3 \times 197.335 = 592.005$ กรัม

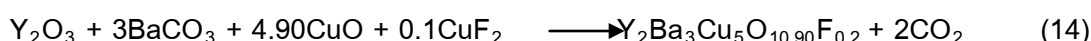
ส่วนที่ 3 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + 15.999] = 79.545$ กรัม จากสมการ (13) ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ 4.95 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์ออกไซด์เท่ากับ $4.95 \times 79.545 = 393.74775$ กรัม

ส่วนที่ 4 คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และฟลูออรีน 2 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของฟลูออรีนมีค่า 18.998 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + (2 \times 18.998)] = 101.542$ กรัมจากสมการ(13) ใช้คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ 0.05 โมลจะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์เท่ากับ $0.05 \times 101.542 = 5.0771$ กรัม

ในงานวิจัยนี้ต้องการ $\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_{10.95}\text{F}_{0.1}$ จำนวน 15 กรัม เพราะฉะนั้นต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	เท่ากับ	3.122 กรัม
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)	เท่ากับ	8.187 กรัม
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	เท่ากับ	5.445 กรัม
คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2)	เท่ากับ	0.070 กรัม

1.6 การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y235}+\text{F}_{0.2}$



จากสมการ (14) สามารถหาคำนวณหาสัดส่วนของมวลออกมาเป็นกรัมได้ 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ประกอบด้วย ยิทเทรียม 2 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของยิทเทรียมมีค่า 88.906 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของยิทเทรียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[(2 \times 88.906) + (3 \times 15.999)] = 225.809$ กรัมจาก

สมการ (14) ใช้ยิทเทรียมออกไซด์ 1 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมในส่วนของยิทเทรียมออกไซด์เท่ากับ $1 \times 225.809 = 225.809$ กรัม

ส่วนที่ 2 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) ประกอบด้วย แบเรียม 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของแบเรียมมีค่า 137.327 มวลอะตอมของคาร์บอนมีค่า 12.011 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ $[137.327 + 12.011 + (3 \times 15.999)] = 197.335$ กรัม จากสมการ (14) ใช้แบเรียมคาร์บอเนต 3 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของแบเรียมคาร์บอเนตเท่ากับ $3 \times 197.335 = 592.005$ กรัม

ส่วนที่ 3 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่า 15.999 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + 15.999] = 79.545$ กรัม จากสมการ (14) ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ 4.90 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์ออกไซด์เท่ากับ $4.90 \times 79.545 = 389.7705$ กรัม

ส่วนที่ 4 คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2) ประกอบด้วย คอปเปอร์ 1 อะตอม และฟลูออรีน 2 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่า 63.546 และมวลอะตอมของฟลูออรีนมีค่า 18.998 ดังนั้นมวลโมเลกุลของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ $[63.546 + (2 \times 18.998)] = 101.542$ กรัม จากสมการ (14) ใช้คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ 0.1 โมล จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมของคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์เท่ากับ $0.1 \times 101.542 = 10.1542$ กรัม

ในงานวิจัยนี้ต้องการ $\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_{10.90}\text{F}_{0.2}$ จำนวน 15 กรัม เพราะฉะนั้นต้องใช้ปริมาณสารตั้งต้น ดังนี้

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	เท่ากับ	3.120 กรัม
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)	เท่ากับ	8.179 กรัม
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	เท่ากับ	5.385 กรัม
คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2)	เท่ากับ	0.140 กรัม

2. กระบวนการเตรียมนำยวดยั้ง

2.1 หลังจากทราบปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมนำยวดยั้งสูตรต่างๆแล้ว จากนั้นชั่งปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมนำยวดยั้งสูตรต่างๆ ภาพประกอบ 15 แสดงสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วย ยิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต คอปเปอร์ออกไซด์ และคอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

ภาพประกอบ 15 สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง (ก) ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) (ข) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) (ค) คอปเปอร์ออกไซด์ และ (ง) คอปเปอร์(II)ฟลูออไรด์ (CuF_2)

2.2 นำสารตั้งต้นที่ซังแล้วของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร มาผสมในโกรกอลูมินาให้เข้ากัน จนเป็นสารเนื้อเดียวที่มีลักษณะเป็นผงสีเทาจากนั้นนำไปใส่ในถ้วยอลูมินาพร้อมเขียนกำกับว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งสูตรใด ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงสารตั้งต้นที่ผสมเข้ากันจนเป็นสารเนื้อเดียวที่มีลักษณะเป็นผงสีเทา

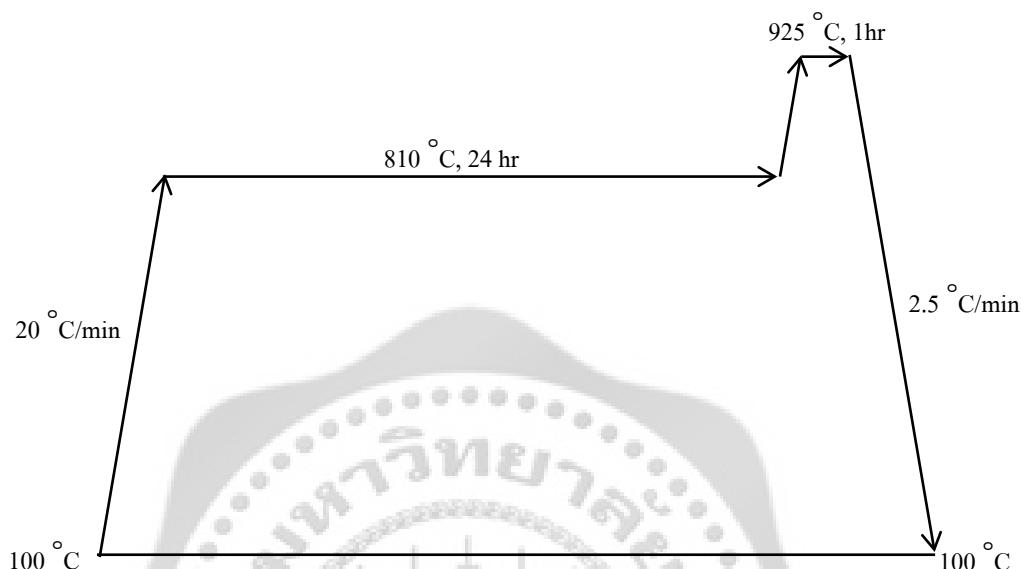
2.3 นำสารในถ้วยอลูมินาทั้ง 6 ตัวอย่าง ได้แก่ Y123 Y123+F_{0.1} Y123+F_{0.2} Y235 Y235 +F_{0.1} และ Y235+F_{0.2} ใส่ในเตาเผาเพื่อทำการสังเคราะห์สารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

3. การสังเคราะห์สารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

การสังเคราะห์สารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีขั้นตอนดังนี้

3.1 กระบวนการเผาแบบผงเริ่มกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 810 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 925 องศาเซลเซียสแล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ดังภาพประกอบ 17

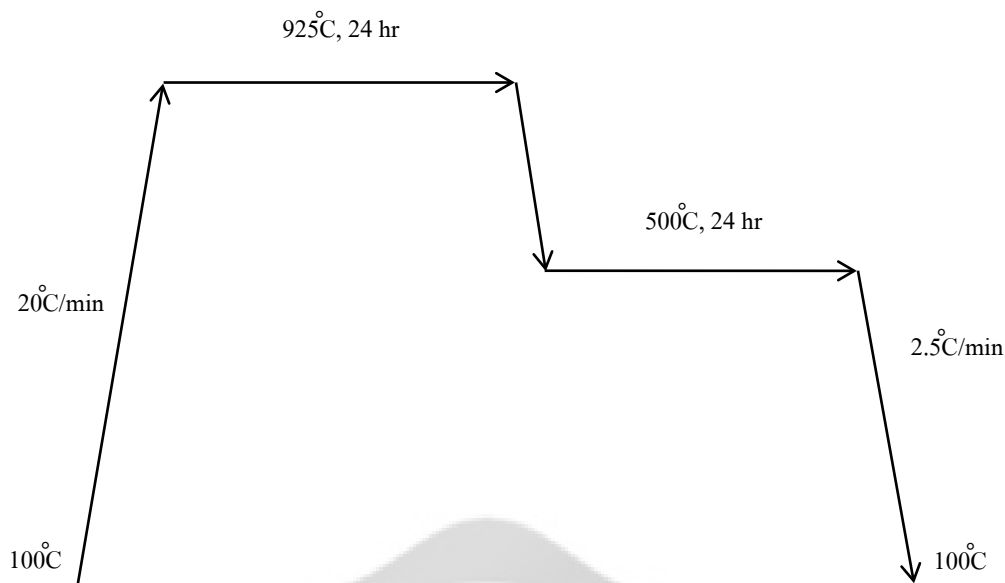


ภาพประกอบ 17 แสดงกระบวนการเผาแบบผิง

3.2 นำสารที่ผ่านกระบวนการเผาแบบผิงครั้งที่ 1 มาบดในโกรกอลูมินาจนเป็นสารเนื้อเดียวที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ จากนั้นจากนั้นนำไปใส่ในถ้วยอลูมินาพร้อมเขียนกำกับว่าเป็นตัวนำวดยิ่งสูตรใด จากนั้นนำสารตัวอย่างใส่ในเตาเผา แล้วทำการเผาแบบผิงอีกครั้ง

3.3 นำสารที่ผ่านกระบวนการเผาแบบผิงครั้งที่ 2 มาบดในโกรกอลูมินาจนเป็นสารเนื้อเดียว จากนั้นนำสารแต่ละสูตรไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกด้วยแรงอัด 1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เป็นเวลา 3 นาที สารทุกสูตรที่ผ่านกระบวนการอัดจะมีลักษณะเป็นก้อนกลมแบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร มีความหนา 4 มิลลิเมตรและ มีมวล 15 กรัม แล้วนำสารนี้วางบนแผ่นอลูมินา

3.4 นำสารนี้วางบนแผ่นอลูมินาเข้าเตาเผา เพื่อเริ่มกระบวนการเผาแบบขึ้นรูป (sintering) โดยเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 925 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสดังภาพประกอบ 18



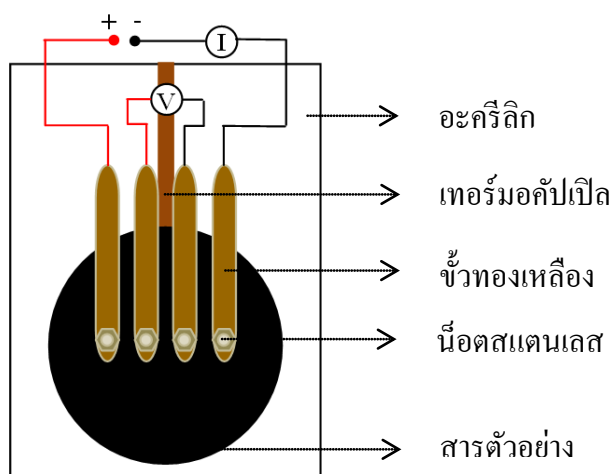
ภาพประกอบ 18 แสดงกระบวนการเผาแบบขึ้นรูป

3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง

1. การวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง

หลังจากผ่านกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปแล้วนำสารมาทดสอบด้วยปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ถ้าสารตัวอย่างเป็นตัวนำยวดยิ่งจะสามารถแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างชัดเจน พบว่าสารตัวอย่างทุกตัวแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างชัดเจน นำสารตัวอย่างทั้ง 6 ตัวอย่างไปวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว โดยจะทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 77 ถึง 120 เคลวิน ซึ่งมีขั้นตอนในการวัดดังนี้

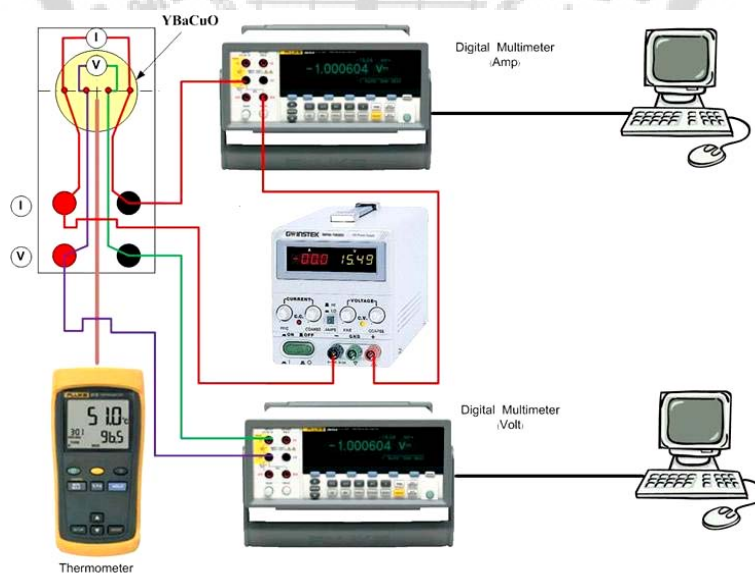
1.1 การทำขั้ว : ใส่สารตัวอย่างในที่ใส่ตัวอย่าง (Sample holder) ขั้วที่ใช้ในการวัดทำจากทองเหลือง ปลายขั้วที่จิกลงบนสารตัวอย่างมีขนาด 1 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร ขั้วทั้ง 4 ดังภาพประกอบ 19 จากนั้นตรวจสอบการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างได้โดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วการวัดโดยแบ่งเป็น สองขั้วด้านนอกเป็นขั้วที่ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าและสองขั้วด้านในเป็นขั้วสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วที่อุณหภูมิห้องควรมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม



ภาพประกอบ 19 ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample holder)

1.2 ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 20 ซึ่งมีอุปกรณ์ ดังนี้

1. สายโคแอกเชียลเบอร์ TSLE156277
2. เทอร์มอคัปเปิลชนิดเค
3. เทอร์มอมิเตอร์ ยี่ห้อฟลัก (Fluke) รุ่น 51 II
4. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง รุ่น HY3005
5. มัลติมิเตอร์ยี่ห้อฟลัก (Fluke) รุ่น 8845A
6. คอมพิวเตอร์
7. ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample holder)



ภาพประกอบ 20 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า

เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะเกิดสภานาวยอดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำจึงต้องใช้ไนโตรเจนเหลวมาหล่อเย็นเพื่อใช้ลดอุณหภูมิของสาร เมื่อสารตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่ากับ 77 เคลวิน เริ่มให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดคงตัว 3 ค่า คือ 50 มิลลิแอมแปร์ 100 มิลลิแอมแปร์และ 150 มิลลิแอมแปร์ตามลำดับ จนกระทั่งอุณหภูมิของสารถึง 120 เคลวิน นำค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ที่ให้เข้าไปมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ) โดยใช้สมการ (15)

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (15)$$

เมื่อ ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า
 V คือความต่างศักย์ไฟฟ้า
 I คือค่าของกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงตัว
 s คือระยะห่างระหว่างขั้ว

จากนั้นนำค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่คำนวณได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ) กับอุณหภูมิ (T) เพื่อหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง

2. การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (SEM) และวิเคราะห์ธาตุ (EDX)

นำสารมาศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX) โดยทั้งสองกระบวนการนี้ใช้เครื่องมือรุ่น JSM-6380LV, Oxford instruments EDX ยี่ห้อ JEOL ที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ซึ่งในขณะที่ทำการถ่ายภาพลักษณะสัณฐานสามารถทำการวิเคราะห์ธาตุไปพร้อมกันด้วย

3. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction: XRD) รุ่น D8 Discovery diffractometer ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเริ่มวัดจากมุม 10 องศา ถึง 90 องศา ด้วยอัตรา 0.02 องศาต่อวินาที จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพروف เพื่อหาค่าของหน่วยเซลล์

บทที่ 4

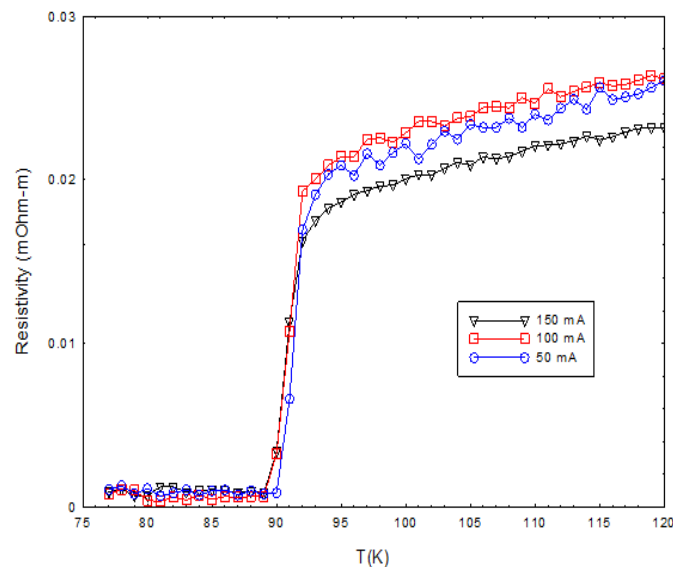
ผลการวิจัย

หลังจากได้ดำเนินการวิจัยตามกระบวนการในบทที่ 3 จะได้สารตัวอย่างทั้งหมด 6 สูตร ก่อนทำการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวอย่าง ผู้วิจัยจะนำสารตัวอย่างมาทดสอบด้วยปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่งพบว่าสารตัวอย่างทุกสูตรสามารถแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน จากนั้นนำตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรมาทำการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ ดังนี้

4.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดแบบสี่ขั้ว

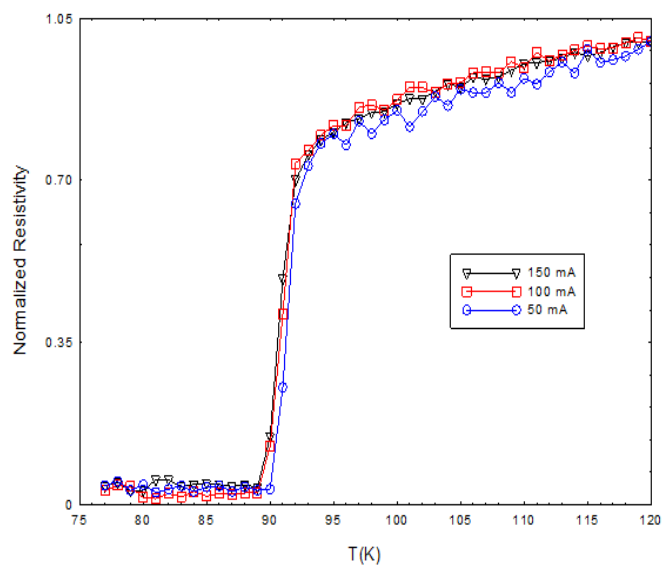
ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง จะใช้การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว โดยใช้ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นสารหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่งอยู่ที่ 77 เคลวิน ผู้วิจัยจะให้กระแสไฟฟ้าคงตัว 3 ค่า ได้แก่ 50 mA 100 mA และ 150 mA แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ในช่วงอุณหภูมิ 77 เคลวิน ถึง 120 เคลวิน นำค่าที่วัดได้มาคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ จากนั้นหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งด้วยวิธีของมูราเซ ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ตัวนำยวดยิ่ง Y123



ภาพประกอบ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง

Y123

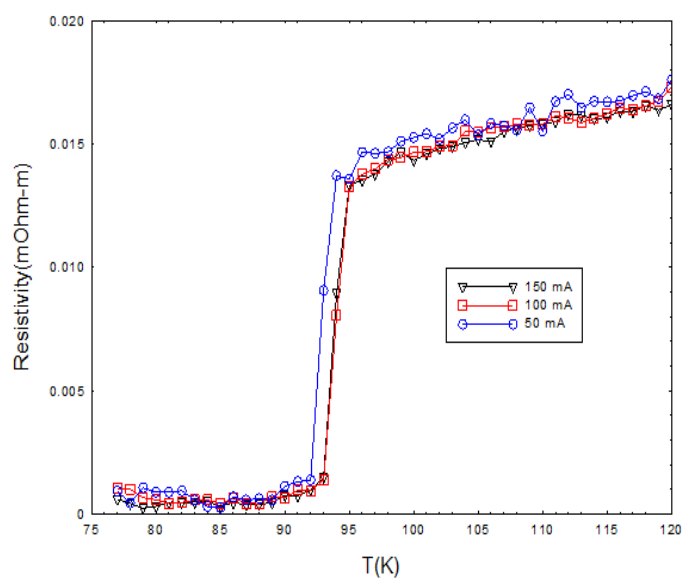


ภาพประกอบ 22 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123

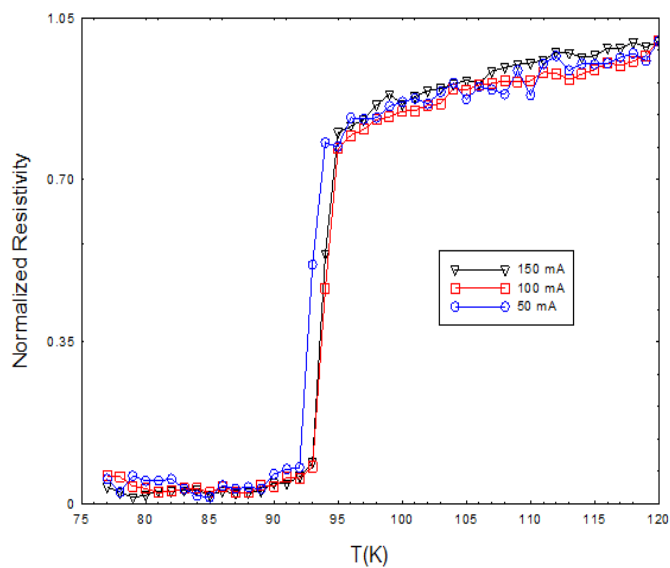
ตาราง 1 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123

กระแสคงตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
50 mA	90	92	2
100 mA	89	92	3
150 mA	89	92	3

2. ตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}



ภาพประกอบ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}

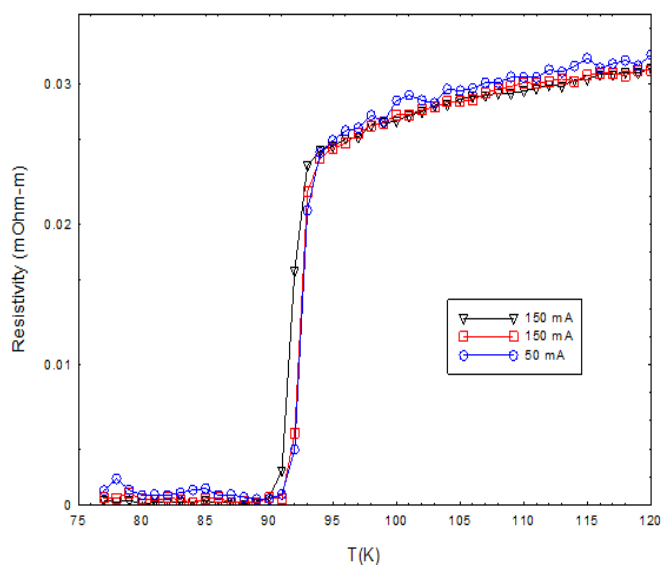


ภาพประกอบ 24 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}

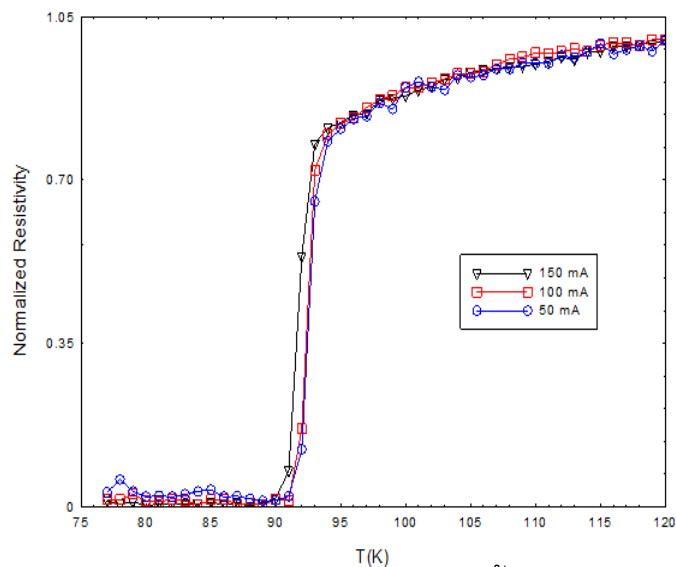
ตาราง 2 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}

กระแสคงตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
50 mA	92	94	2
100 mA	93	95	2
150 mA	93	95	2

3. ตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2}



ภาพประกอบ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2}

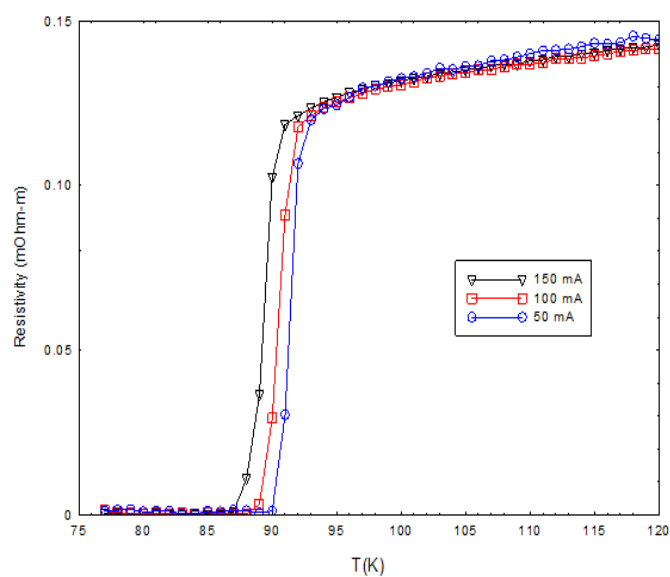


ภาพประกอบ 26 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2}

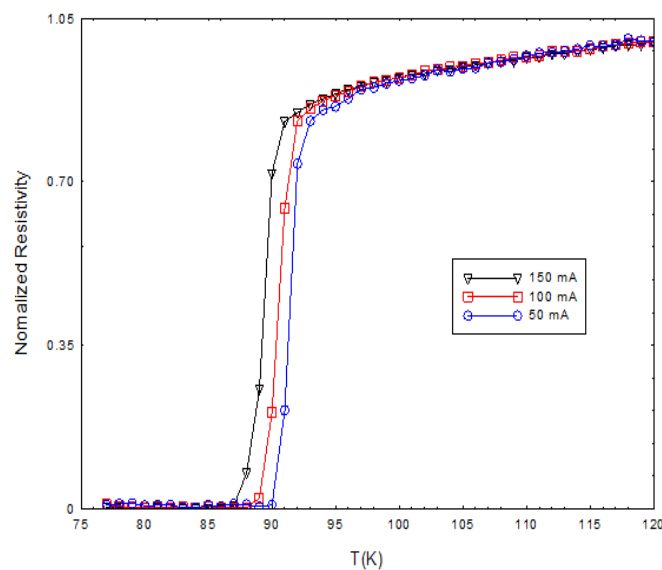
ตาราง 3 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2}

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
50 mA	91	94	3
100 mA	91	94	3
150 mA	90	93	3

4. ตัวนำยวดยิ่ง Y235



ภาพประกอบ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y235

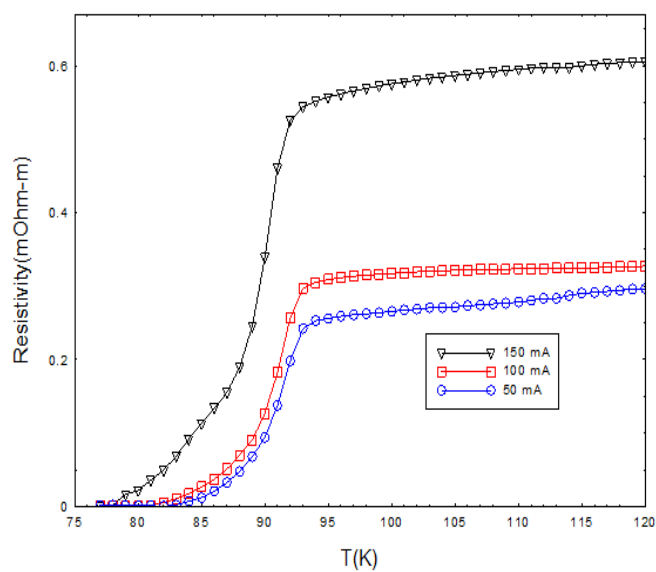


ภาพประกอบ 28 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235

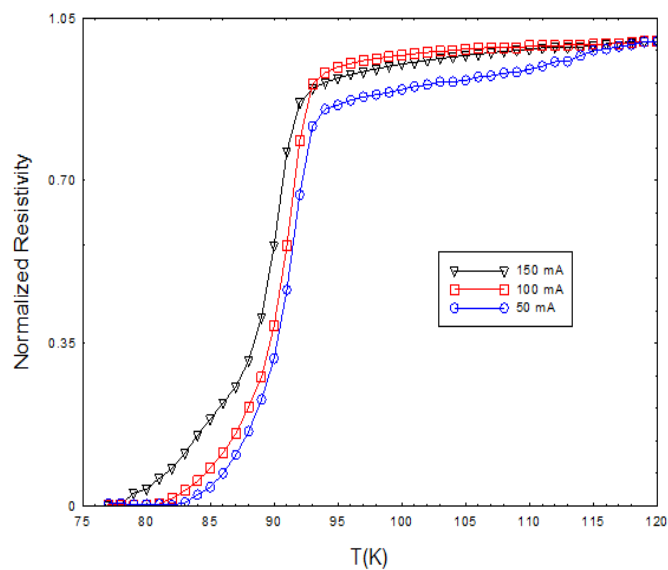
ตาราง 4 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y235

กระแสคงตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
50 mA	90	93	3
100 mA	89	92	3
150 mA	87	91	4

5. ตัวนำยวดยิ่ง Y235 + $F_{0.1}$



ภาพประกอบ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y235+ $F_{0.1}$

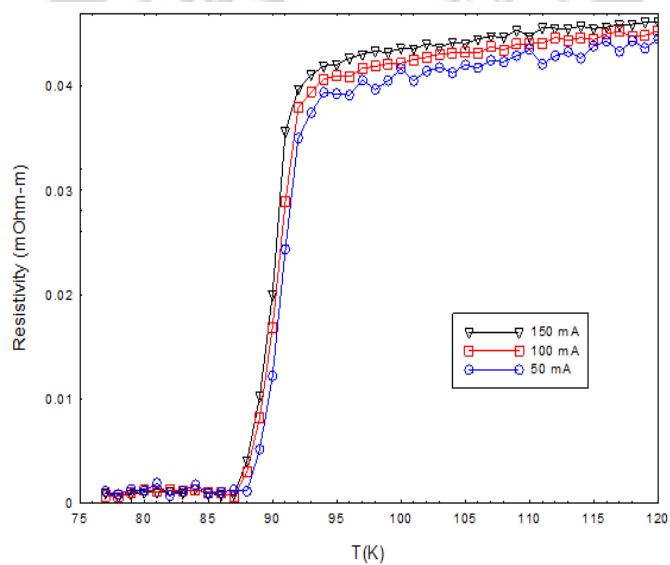


ภาพประกอบ 30 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.1}

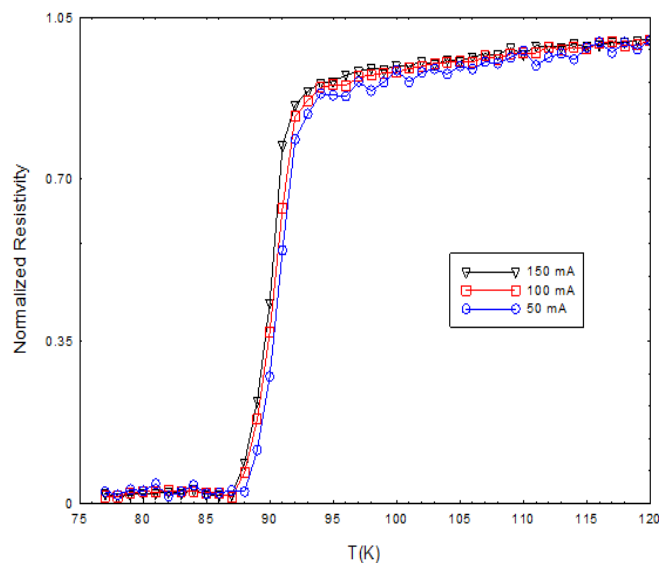
ตาราง 5 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.1}

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
50 mA	83	93	10
100 mA	83	93	10
150 mA	77	92	15

4.1.6 ตัวนำยวดยิ่ง Y235 + F_{0.2}



ภาพประกอบ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2}

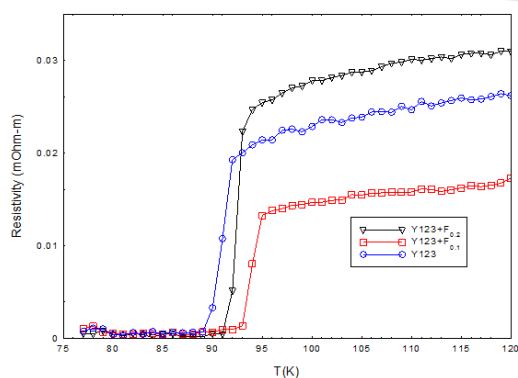


ภาพประกอบ 32 กราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2}

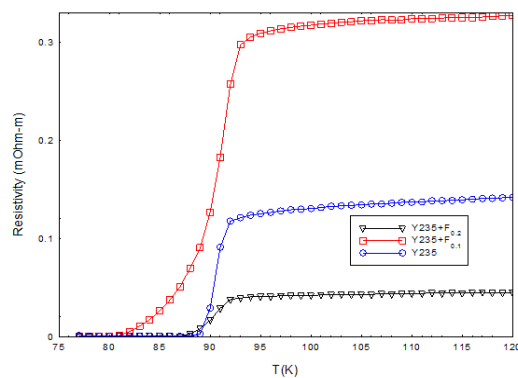
ตาราง 6 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2}

กระแสตัวที่ใช้วัด	T_c offset (เคลวิน)	T_c onset (เคลวิน)	ΔT_c (เคลวิน)
50 mA	88	92	4
100 mA	88	92	4
150 mA	89	92	3

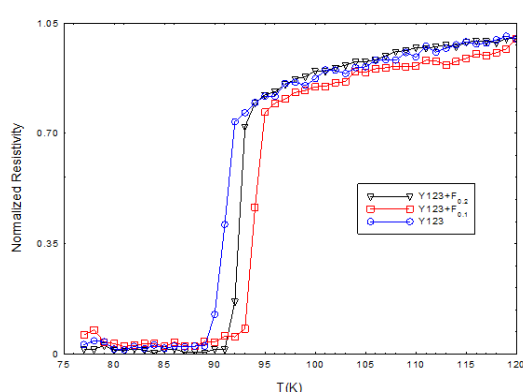
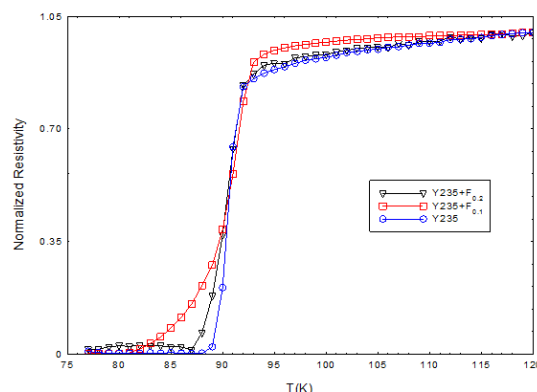
หากนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าคงตัว 100 mA ของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_x และ Y235+F_x ที่ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิดังภาพประกอบ 33 และค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร ดังตาราง 13



ก) Y123+F_x



ข) Y235+F_x

ค) Y123+F_xง) Y235+F_x

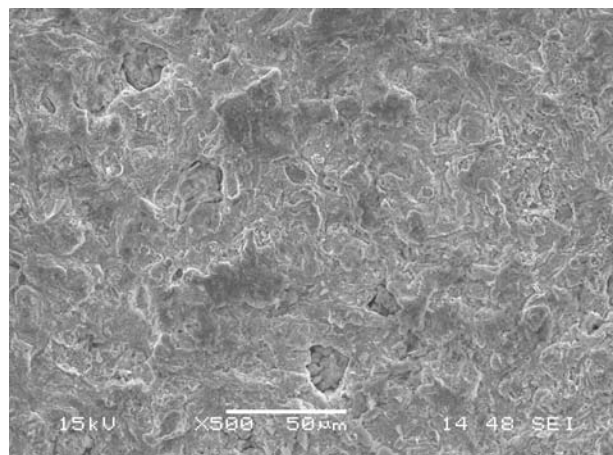
ภาพประกอบ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ก) Y123+F_x ข) Y235+F_x และกราฟนอร์มัลไลซ์สภาพต้านทานไฟฟ้าของ ค) Y123+F_x ง) Y235+F_x: x = 0, 0.1, 0.2

ตาราง 7 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรที่กระแสไฟฟ้าคงตัว 100 mA

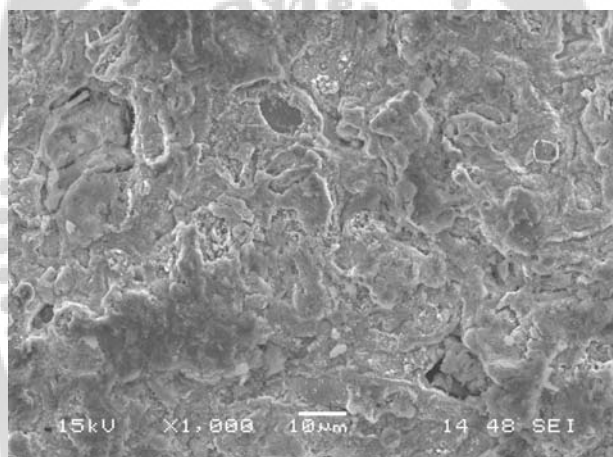
ตัวนำยวดยิ่ง	T _c offset (เคลวิน)	T _c onset (เคลวิน)	ΔT _c (เคลวิน)
YBa ₂ Cu ₃ O _y	89	92	3
YBa ₂ Cu ₃ O _{y-0.1} F _{0.1}	93	95	2
YBa ₂ Cu ₃ O _{y-0.1} F _{0.2}	90	94	4
Y ₂ Ba ₃ Cu ₅ O _y	89	92	3
Y ₂ Ba ₃ Cu ₅ O _{y-0.1} F _{0.1}	83	93	10
Y ₂ Ba ₃ Cu ₅ O _{y-0.2} F _{0.2}	88	92	4

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวนำยวดยิ่ง

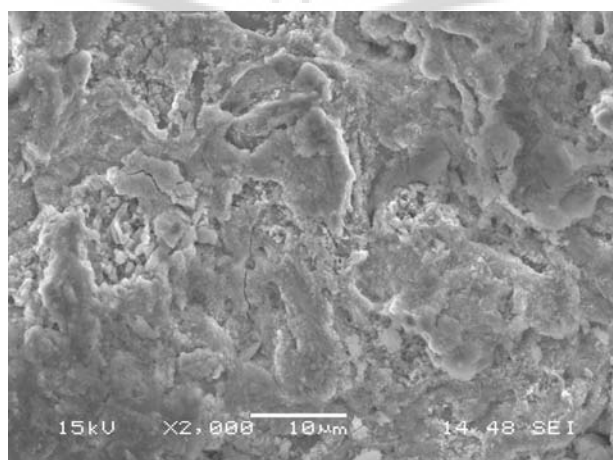
นำตัวนำยวดยิ่งมาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโทสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) โดยทั้งสองการวิเคราะห์นี้ใช้เครื่องมือ ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6380LV, Oxford instruments EDX ซึ่งสามารถถ่ายภาพลักษณะสัณฐานและทำการวัดปริมาณธาตุที่อยู่ในตัวนำยวดยิ่งไปพร้อมกันได้ โดยจะทำการถ่ายภาพลักษณะสัณฐานของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร ดังภาพประกอบ 34 ถึง 39 ผลของการเจือฟลูออรีนทำให้เกิดการปรับปรุงลักษณะสัณฐาน เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและความพรุนลดลง เมื่อเทียบกับตัวนำยวดยิ่งที่ไม่เจือด้วยฟลูออรีน



ก)



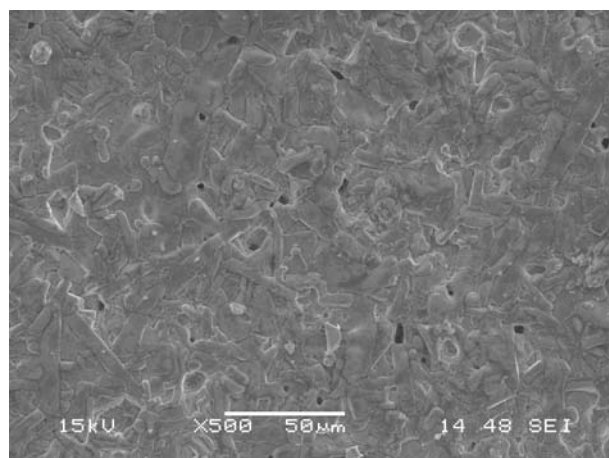
ข)



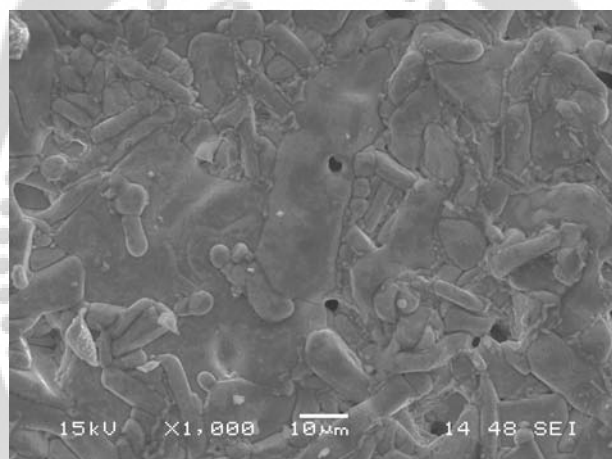
ค)

ภาพประกอบ 34 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123 ที่กำลังขยาย

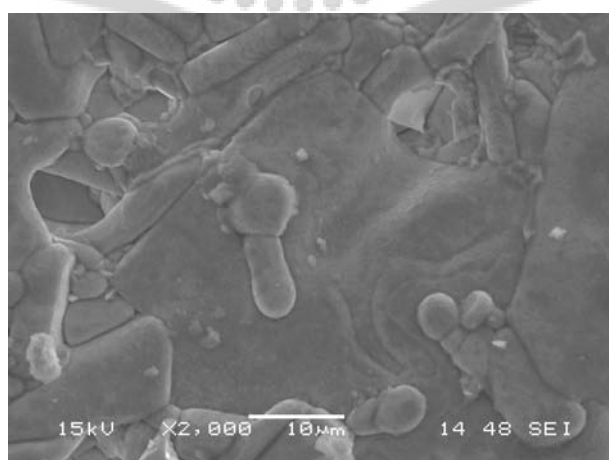
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)



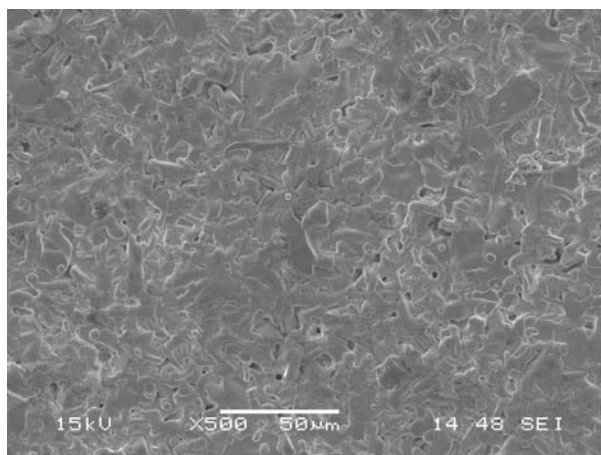
ข)



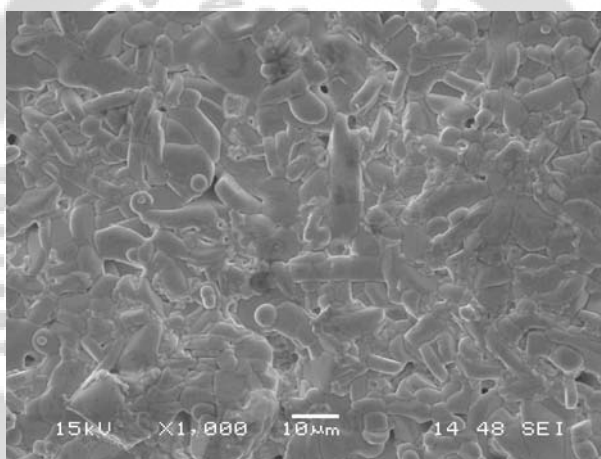
ค)

ภาพประกอบ 35 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y123+Fe_{0.1}ที่กำลังขยาย

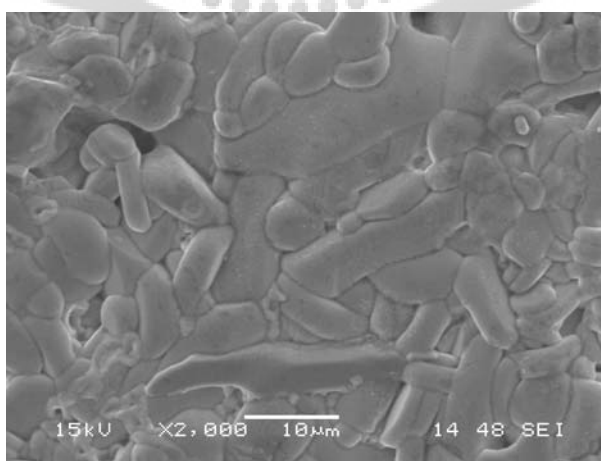
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)



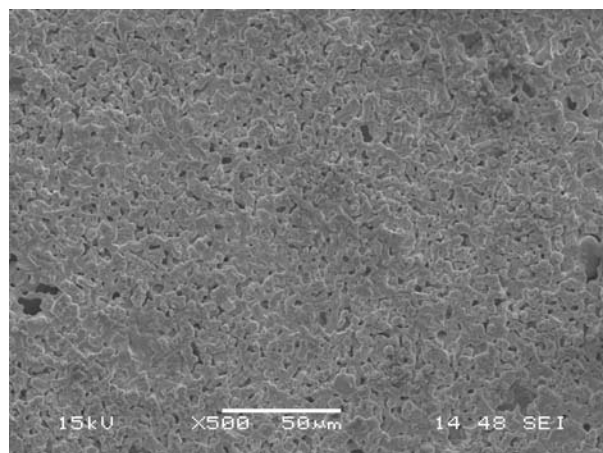
ข)



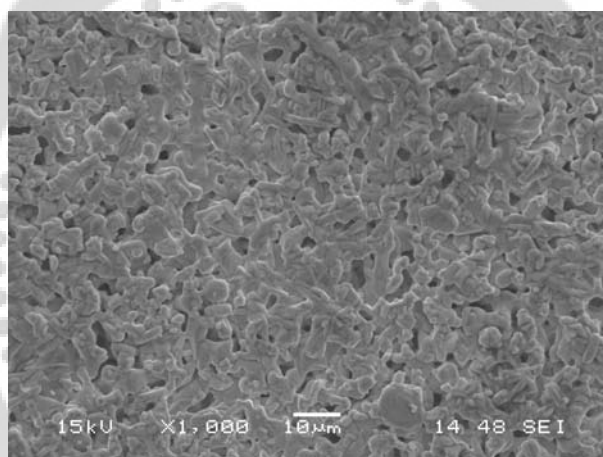
ค)

ภาพประกอบ 36 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ $Y_{123}+F_{0.2}$ ที่กำลังขยาย

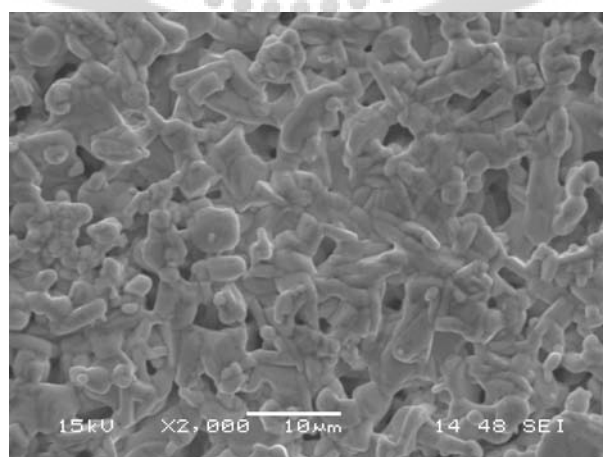
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)



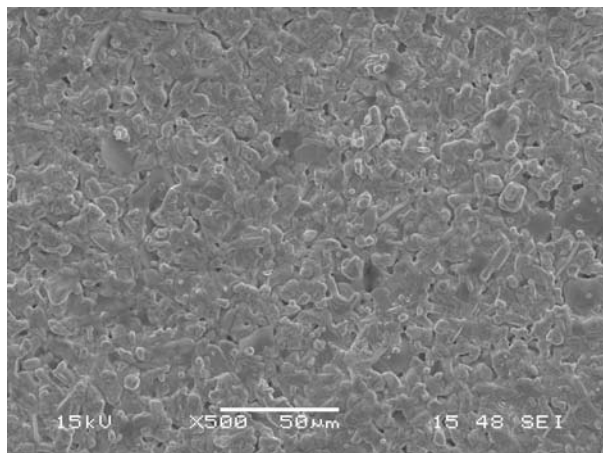
ข)



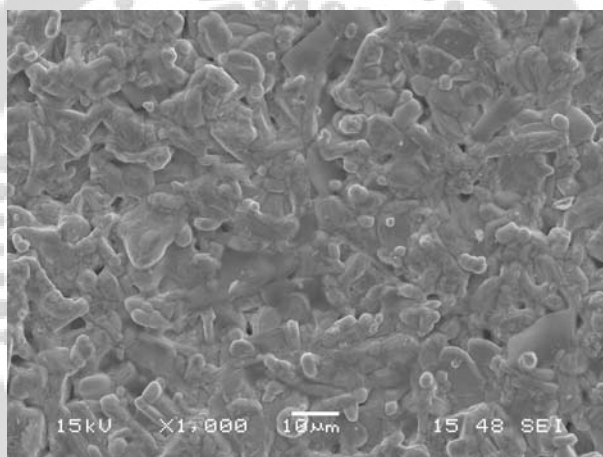
ค)

ภาพประกอบ 37 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y235 ที่กำลังขยาย

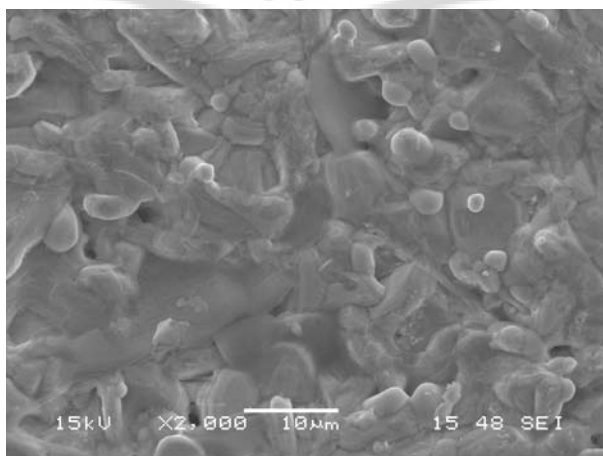
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)



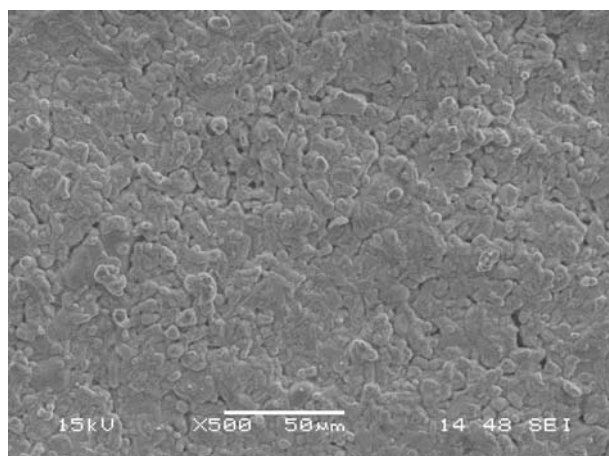
ข)



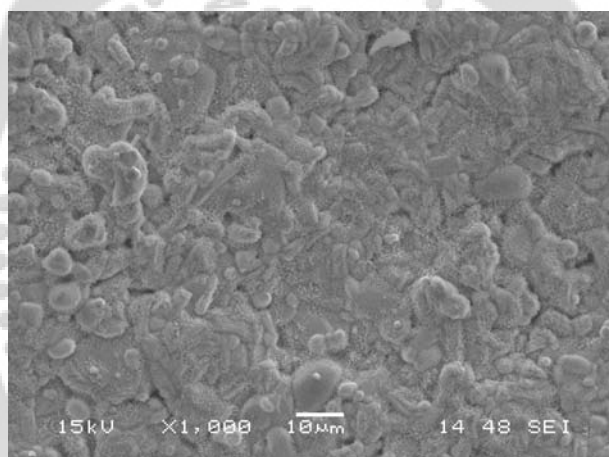
ค)

ภาพประกอบ 38 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ Y235+F_{0.1}ที่กำลังขยาย

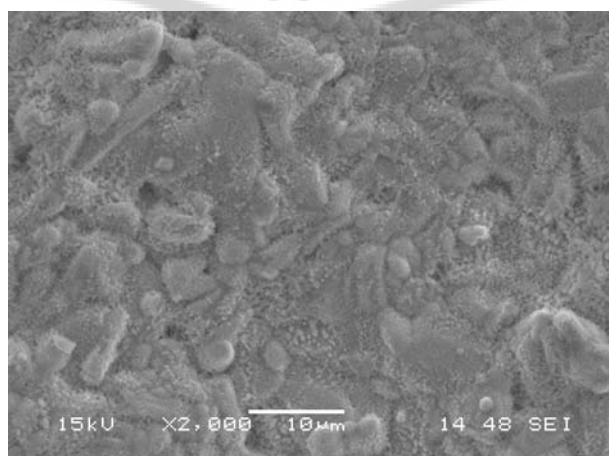
ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ก)



ข)



ค)

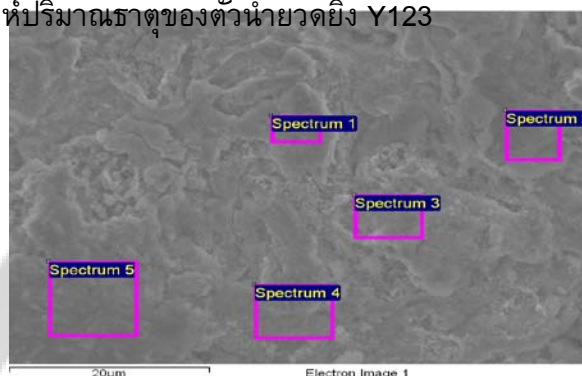
ภาพประกอบ 39 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของ $Y_{235}+F_{0.2}$ ที่กำลังขยาย

ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า

4.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง

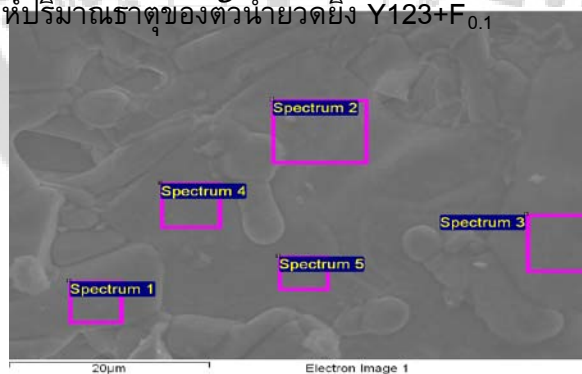
ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน โดยจะวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่อยู่ภายในตัวนำยวดยิ่งที่กำลังขยาย 2000 เท่า โดยจะวิเคราะห์แบบสุ่ม 5 ตำแหน่ง ได้ผลการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณธาตุ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y123



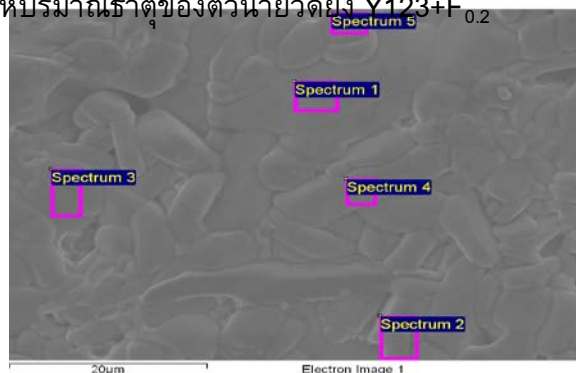
ภาพประกอบ 40 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y123

2. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}



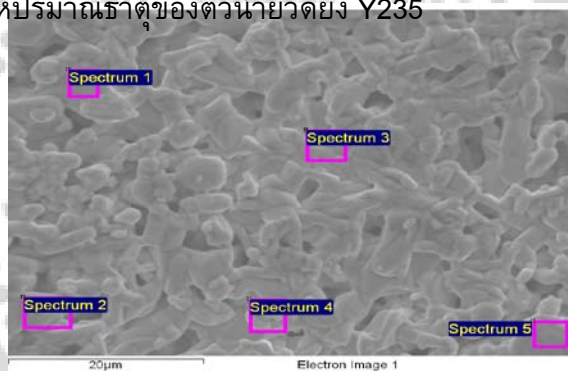
ภาพประกอบ 41 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}

3. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง $Y_{123}+F_{0.2}$



ภาพประกอบ 42 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง $Y_{123}+F_{0.2}$

4. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y_{235}

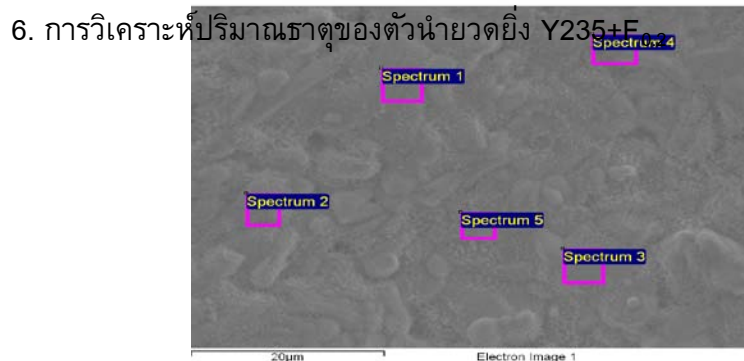


ภาพประกอบ 43 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y_{235}

5. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง $Y_{235}+F_{0.1}$



ภาพประกอบ 44 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.1}



ภาพประกอบ 45 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2}

ตาราง 8 ปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง

สูตรตัวนำยวดยิ่ง	ตำแหน่ง	ยิทเทรียม	แบเรียม	คอปเปอร์	ออกซิเจน	ฟลูออรีน
YBa ₂ Cu ₃ O _y	1	2.55	18.14	16.13	63.18	-
	2	0.00	22.42	5.60	65.84	-
	3	0.00	17.44	15.17	67.39	-
	4	0.00	15.85	16.97	67.17	-
	5	0.00	19.42	10.38	70.19	-
YBa ₂ Cu ₃ O _{y-0.1} F _{0.1}	1	9.56	15.55	23.16	51.73	0.00
	2	6.77	13.78	25.18	54.26	0.00
	3	10.44	18.84	25.74	44.97	0.00
	4	8.69	17.00	24.25	50.06	0.00
	5	7.51	15.72	23.95	52.82	0.00
YBa ₂ Cu ₃ O _{y-0.1} F _{0.2}	1	9.80	12.80	21.96	55.44	0.00
	2	8.34	14.95	17.43	51.53	7.76
	3	11.31	17.38	18.10	53.21	0.00
	4	9.92	17.58	30.20	42.30	0.00
	5	12.28	22.38	33.13	32.21	0.00

ตาราง 8 ปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง (ต่อ)

สูตรตัวนำยวดยิ่ง	ตำแหน่ง	ยิทเทรียม	แบเรียม	คอปเปอร์	ออกซิเจน	ฟลูออรีน
$Y_2Ba_3Cu_5O_y$	1	7.77	16.63	24.59	51.01	-
	2	11.19	12.81	27.81	48.20	-
	3	5.59	13.85	28.48	52.07	-
	4	17.03	17.00	14.65	51.33	-
	5	6.47	11.39	27.00	55.14	-
$Y_2Ba_3Cu_5O_{y-0.1}F_{0.1}$	1	6.80	13.66	18.21	61.33	0.00
	2	0.00	22.69	8.10	69.21	0.00
	3	6.74	14.16	23.32	55.78	0.00
	4	7.73	10.61	23.68	57.98	0.00
	5	7.05	18.05	25.24	49.66	0.00
$Y_2Ba_3Cu_5O_{y-0.2}F_{0.2}$	1	5.48	12.29	14.45	67.79	0.00
	2	3.51	16.05	14.85	57.55	8.05
	3	7.70	16.21	17.20	58.89	0.00
	4	7.82	18.84	9.53	63.82	0.00
	5	16.96	6.91	13.24	62.90	0.00

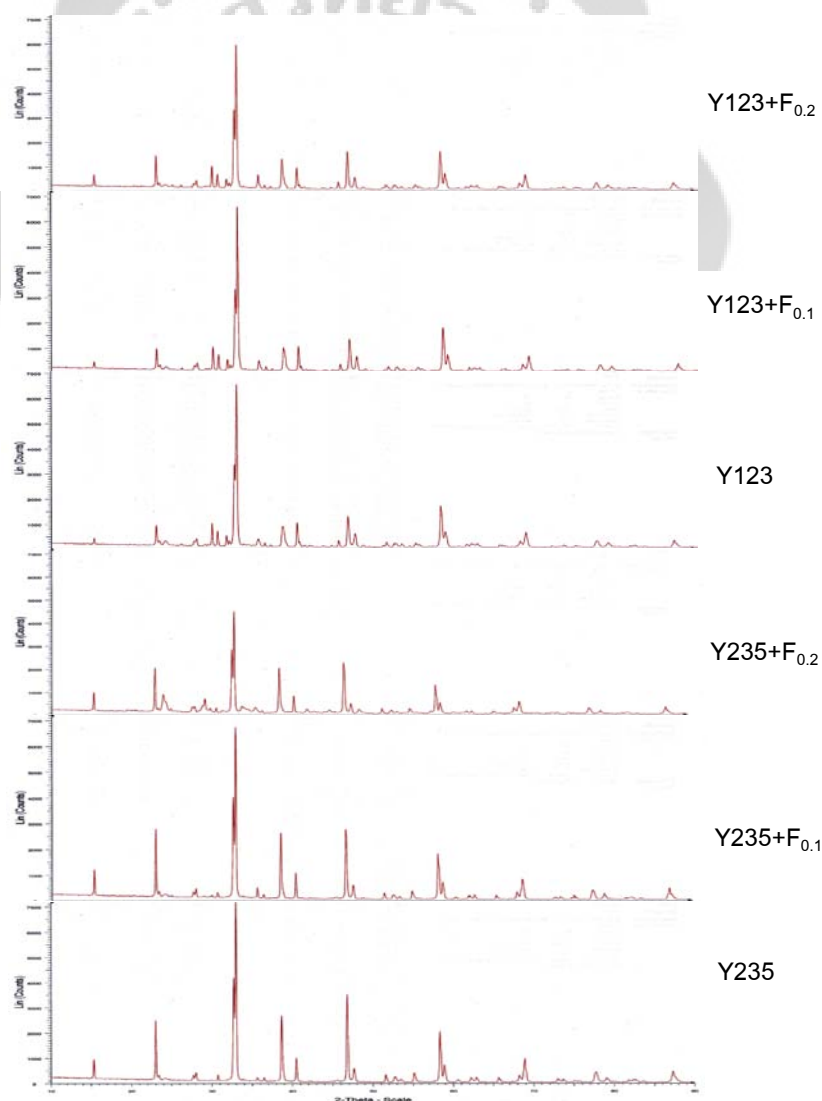
จากตาราง 8 จะได้อัตราส่วนปริมาณธาตุ Y: Ba: Cu: O: F ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร นำข้อมูลอัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้ของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรมาเฉลี่ย โดยเลือกเฉพาะตำแหน่งที่มียิทเทรียมเป็นองค์ประกอบ จากนั้นนำอัตราส่วนปริมาณธาตุเฉลี่ยมาปรับให้ตรงสูตรของตัวนำยวดยิ่ง ได้ข้อมูลดังตาราง 9 พบว่าปริมาณธาตุเฉลี่ยที่วัดได้ไม่ตรงกับสูตรของตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสาร

ตาราง 9 อัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้เฉลี่ยเทียบกับยิทเทรียม

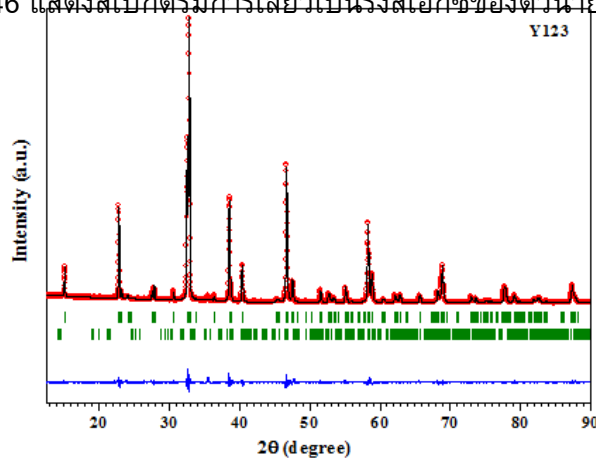
สูตรตัวนำวยดยั้ง	ยิทเทรียม	แบเรียม	คอปเปอร์	ออกซิเจน	ฟลูออรีน
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	1	7.11	6.32	24.77	-
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y-0.1}\text{F}_{0.1}$	1	1.90	2.91	6.10	-
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y-0.1}\text{F}_{0.2}$	1	1.64	2.33	4.64	0.19
$\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_y$	2	3.40	6.31	12.68	-
$\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_{y-0.1}\text{F}_{0.1}$	2	4.02	6.38	12.73	-
$\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_{y-0.2}\text{F}_{0.2}$	2	5.51	4.00	21.47	0.92

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง

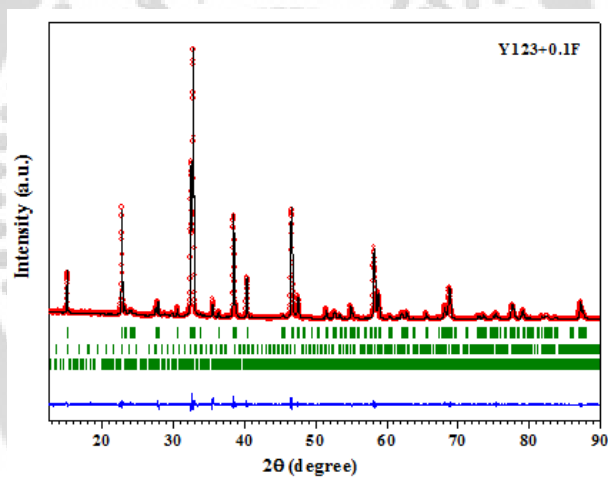
ในการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งจะใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Discovery Diffractometer โดยจะวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เริ่มวัดจากมุม 10 องศา ถึงมุม 90 องศา ด้วยอัตรา 0.02 องศาต่อวินาที ซึ่งจะได้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 6 สูตร ดังภาพประกอบ 38 จากนั้นนำค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ไปทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ โดยโปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับกราฟที่ได้จากการทดลองให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดดังภาพประกอบ 38 ถึง 43 ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ พบว่าตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรประกอบด้วยเฟสสภาพนำยวดยิ่งและสภาพไม่นำยวดยิ่ง มีโครงสร้างแบบอโรโมบิก มีค่าคงตัวแลตทิซแสดงดังตาราง 10



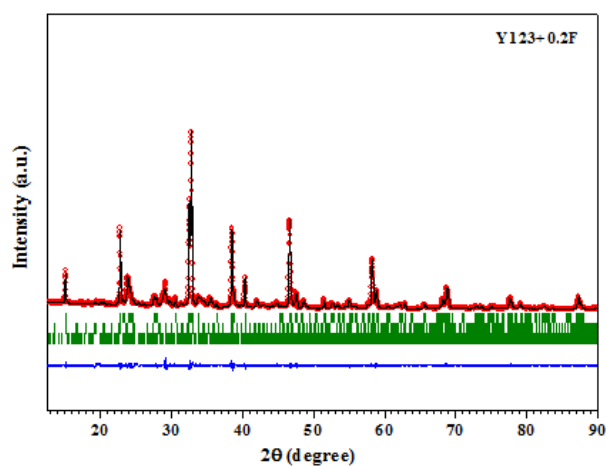
ภาพประกอบ 46 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 6 สูตร



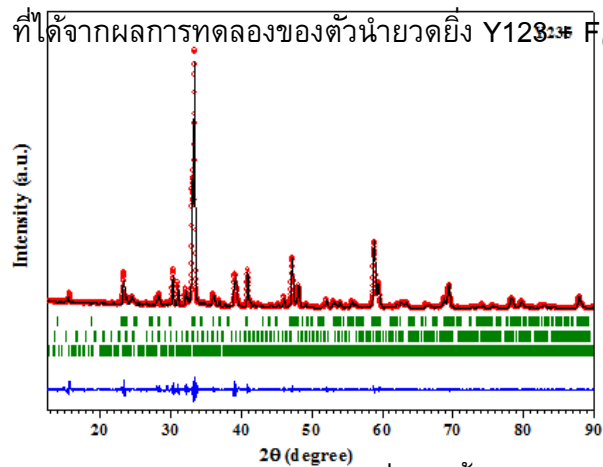
ภาพประกอบ 47 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการทดลองของตัวนำยวดยิ่ง Y123



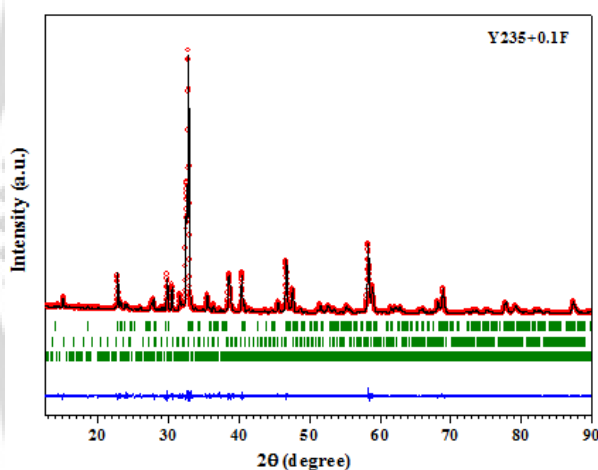
ภาพประกอบ 48 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการทดลองของตัวนำยวดยิ่ง Y123 + F_{0.1}



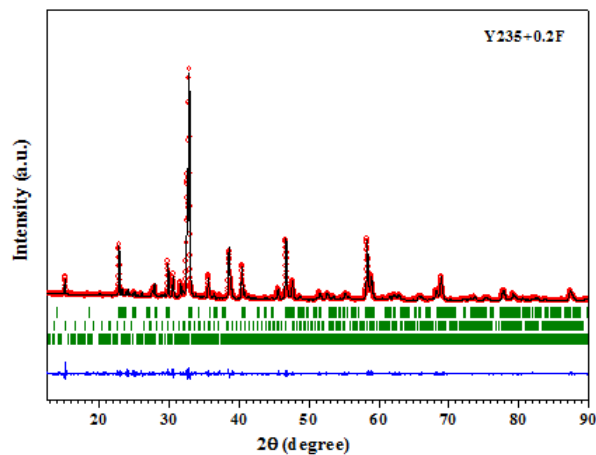
ภาพประกอบ 49 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟ
ที่ได้จากการทดลองของตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y}_{123-x}\text{F}_{0.2}$



ภาพประกอบ 50 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟ
ที่ได้จากการทดลองของตัวนำยวดยิ่ง Y_{235}



ภาพประกอบ 51 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟ
ที่ได้จากการทดลองของตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y}_{235} + \text{F}_{0.1}$



ภาพประกอบ 52 แสดงกราฟแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับกราฟ
ที่ได้จากการทดลองของตัวนำยวดยิ่ง $Y235 + F_{0.2}$



ตาราง 10 แสดงค่าคงตัวแลตทิซของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตร กลุ่มปริภูมิของสารที่มีสภาพนำยวดยิ่งและสภาพไม่นำยวดยิ่ง

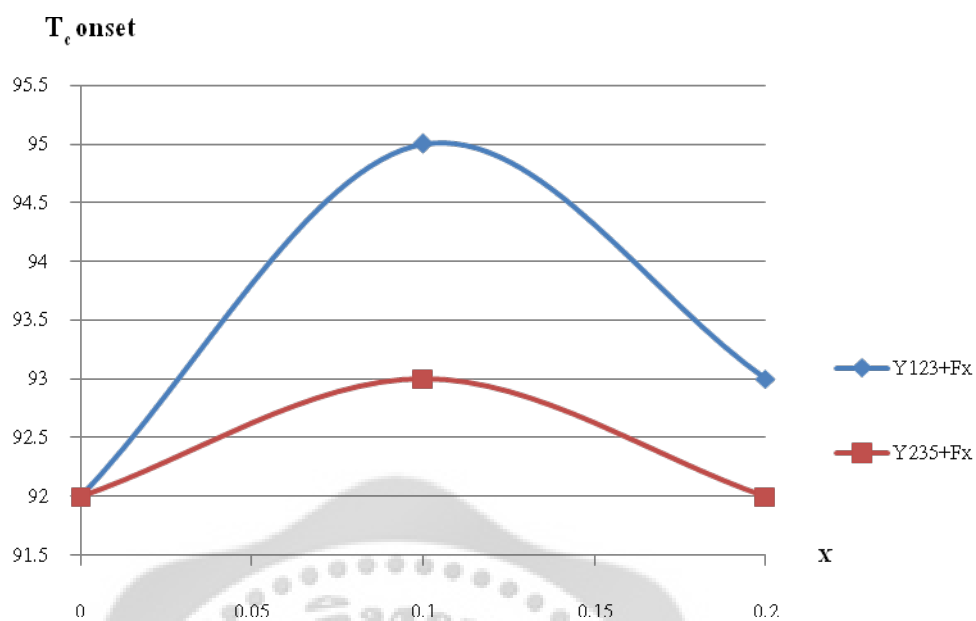
ตัวนำยวดยิ่ง	ค่าคงตัวแลตทิซของสารที่มีสภาพนำยวดยิ่ง			c/a	แอนไอโซโทรปิก	ค่าคงตัวแลตทิซของสารที่มีสภาพไม่นำยวดยิ่ง								
	Y123					Y211			BaCuO ₂			Ba ₂ Cu ₃ O ₆		
	Pmmm					Pbnm			Im-3m			Pccm		
	a (Å)	b (Å)	c (Å)			a (Å)	b (Å)	c (Å)	a (Å)	b (Å)	c (Å)	a (Å)	b (Å)	c (Å)
YBa ₂ Cu ₃ O _y														
YBa ₂ Cu ₃ O _{y-0.1} F _{0.1}	3.821	3.884	11.664	3.051	1.623	7.204	12.165	5.639	-	-	-	-	-	-
YBa ₂ Cu ₃ O _{y-0.1} F _{0.2}	3.817	3.887	11.686	3.061	1.801	-	-	-	18.335	18.335	18.335	13.053	20.649	11.431
Y ₂ Ba ₃ Cu ₅ O _y	3.818	3.887	11.682	3.059	1.799	-	-	-	18.378	18.378	18.378	13.058	20.644	11.434
Y ₂ Ba ₃ Cu ₅ O _{y-}	3.820	3.868	18.929	4.955	1.248	-	-	-	18.365	18.365	18.365	13.024	20.657	11.378
_{0.1} F _{0.1}	3.802	3.887	19.062	5.013	2.225	-	-	-	18.498	18.498	18.498	13.032	20.634	11.404
Y ₂ Ba ₃ Cu ₅ O _{y-}	3.825	3.883	19.057	4.981	1.492	-	-	-	18.477	18.477	18.477	13.017	20.630	11.391
_{0.2} F _{0.2}														

$$\text{หมายเหตุ : แอนไอโซโทรปิก} = \frac{100(b-a)}{0.5(b+a)}$$

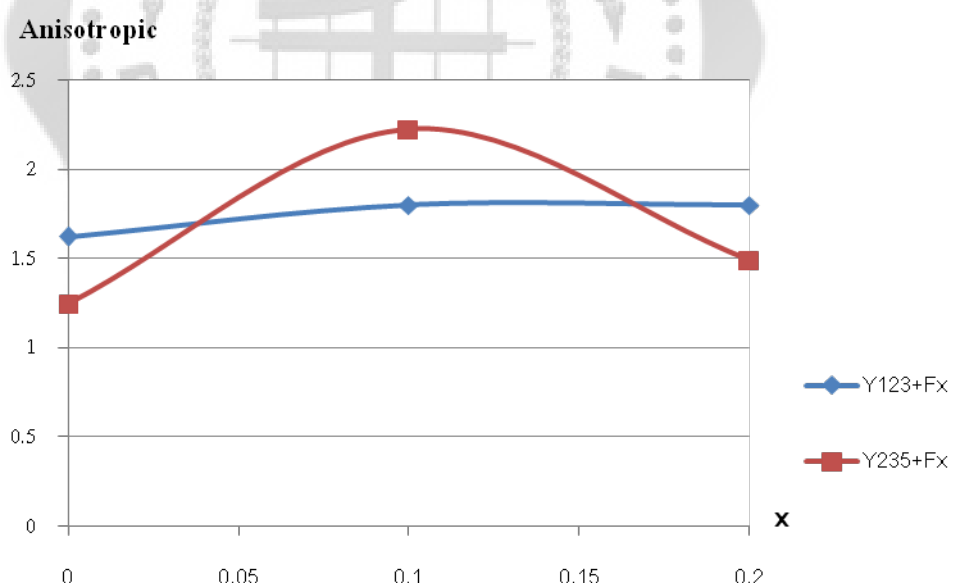
เมื่อ a คือ ขนาดแกน a ของสารที่มีสภาพนำยวดยิ่ง

b คือ ขนาดแกน b ของสารที่มีสภาพนำยวดยิ่ง

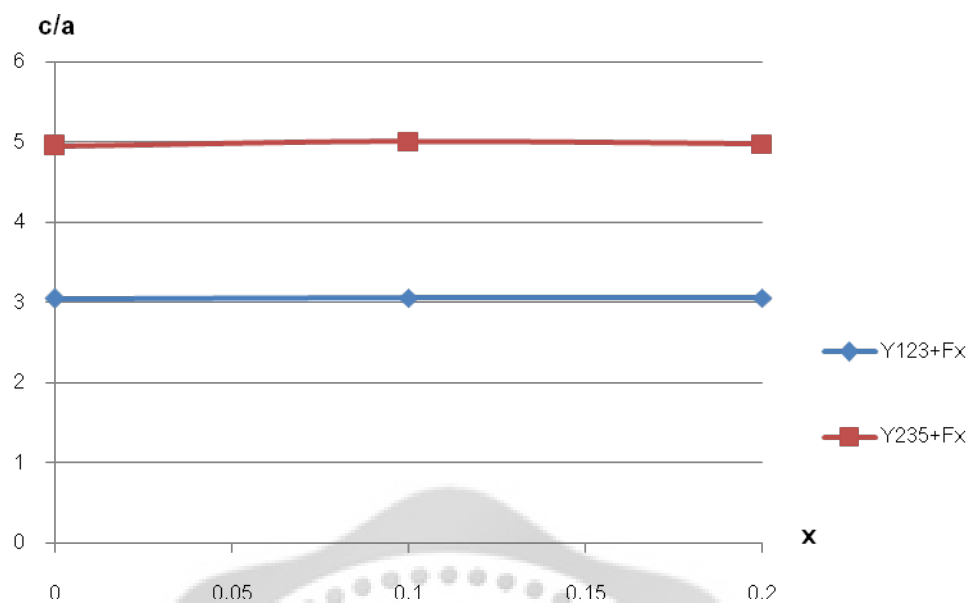




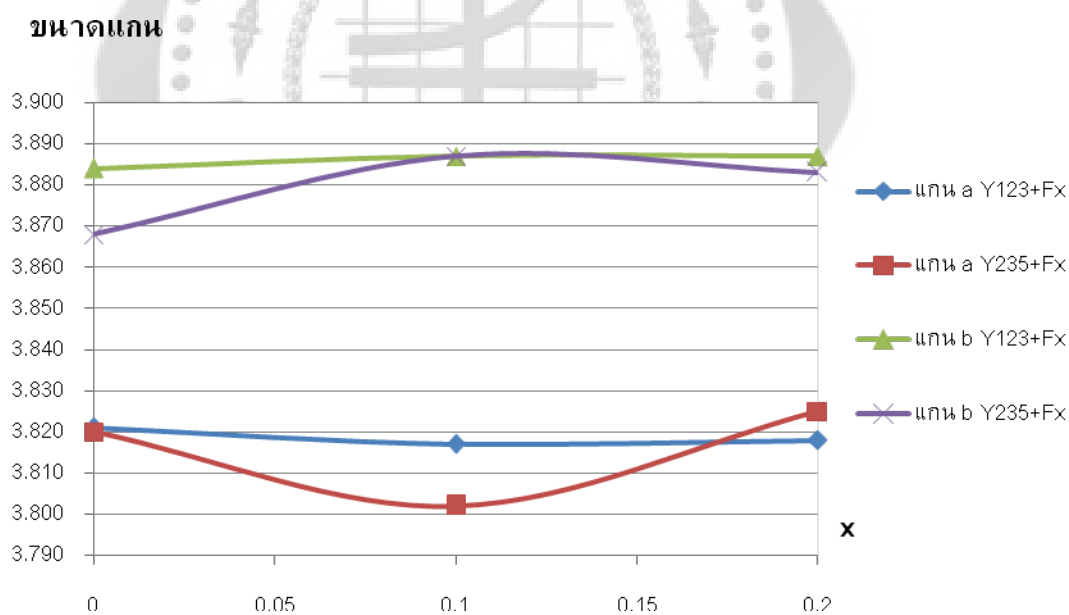
ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับ อุณหภูมิวิกฤต onset



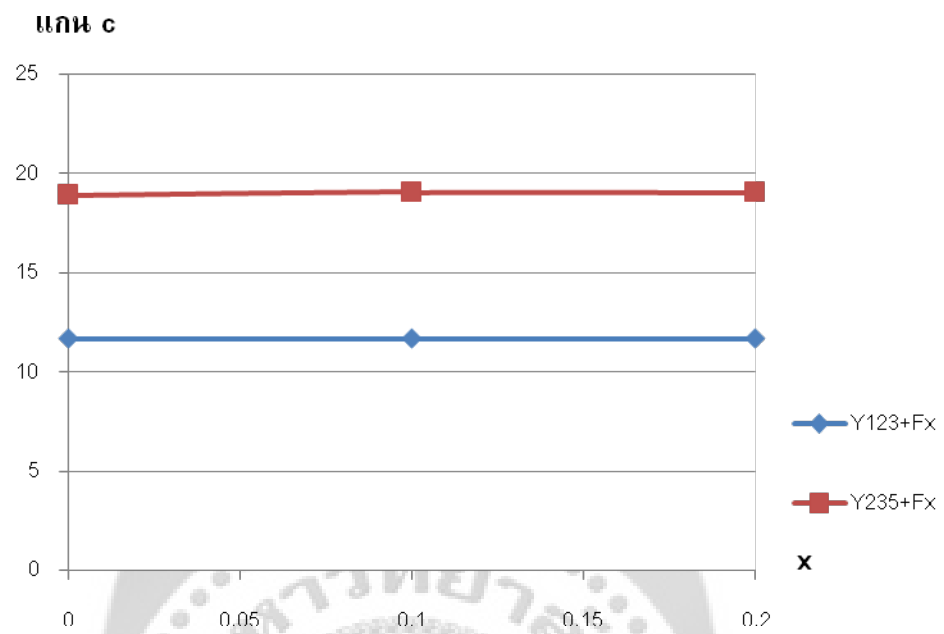
ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับ ค่าแอนไอโซโทรปิก



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับขนาดแกน c/a



ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับขนาดแกน a และแกน b



ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟลูออรีน (x) กับขนาดแกน c

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเจือฟลูออรีนในตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y235 โดยการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการเตรียมและวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y-x}\text{F}_x$ และ $\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_{y-x}\text{F}_x$ เจือด้วยฟลูออรีนที่ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากนั้นนำสารตัวอย่างแต่ละสูตรเข้าสู่กระบวนการเผาแบบผงที่อุณหภูมิ 810 องศาเซลเซียส และกระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนที่สองเป็นการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้

จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งด้วยการวัดแบบสี่ขั้ว ที่กระแสไฟฟ้าคงตัว 100 มิลลิแอมแปร์ ตัวนำยวดยิ่ง $\text{Y123}+\text{F}_x$ ที่ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตเท่ากับ 92 เคลวิน 95 เคลวิน 93 เคลวิน และ $\text{Y235}+\text{F}_x$ ที่ $x = 0, 0.1$ และ 0.2 มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตเท่ากับ 92 เคลวิน 93 เคลวิน 92 เคลวิน ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานพบว่า การเจือฟลูออรีนทำให้เกิดการปรับปรุงลักษณะสัณฐาน เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและความพรุนลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับตัวนำยวดยิ่งที่ไม่เจือด้วยฟลูออรีน จากการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณธาตุ พบว่าตัวนำยวดยิ่งที่ไม่เจือ Y123 ประกอบด้วยธาตุ Y: Ba: Cu = 1: 7.11: 6.32 และ Y235 ประกอบด้วยธาตุ Y: Ba: Cu = 2: 3.40: 6.31 ส่วนตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วยฟลูออรีนที่ $x = 0.1$ $\text{Y123}+\text{F}_{0.1}$ ประกอบด้วยธาตุ Y: Ba: Cu: F = 1: 1.90: 2.91: 0.00 และ $\text{Y235}+\text{F}_{0.1}$ ประกอบด้วยธาตุ Y: Ba: Cu: F = 2: 4.02: 6.38: 0.00 ที่ $x = 0.2$ $\text{Y123}+\text{F}_{0.2}$ ประกอบด้วยธาตุ Y: Ba: Cu: F = 1: 1.64: 2.33: 0.19 และ $\text{Y235}+\text{F}_{0.2}$ ประกอบด้วยธาตุ Y: Ba: Cu: F = 2: 5.51: 3.99 : 0.92

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพروف พบว่าตัวนำยวดยิ่งแต่ละสูตรมีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิกและมีค่าคงตัวแลตทิซแสดงดังตาราง 10 ตัวนำยวดยิ่งทั้งหมดประกอบด้วยเฟสสองเฟส คือ เฟสสภาพนำยวดยิ่งและเฟสสภาพไม่นำยวดยิ่ง โดยเฟสสภาพนำยวดยิ่งจะเกิดจากเฟส-Y123 และเฟสสภาพไม่นำยวดยิ่งจะเกิดจาก 3 เฟส ได้แก่ เฟส-Y211 เฟส- BaCuO_2 และ เฟส- $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดแบบสี่ขั้ว พบว่าตัวนำยวดยิ่งเจือฟลูออรีนที่ $x = 0.1$ มีอุณหภูมิวิกฤตตอนเซตสูงสุด โดยอุณหภูมิวิกฤตตอนเซตตัวนำยวดยิ่ง $Y_{123} + F_{0.1}$ เท่ากับ 95 เคลวิน และ $Y_{235} + F_{0.1}$ เท่ากับ 93 เคลวิน เมื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วยฟลูออรีนที่ $x = 0.1$ แสดงให้เห็นว่าผลของการเจือฟลูออรีนทำให้เกิดการปรับปรุงลักษณะสัณฐาน ทำให้เกรนมีขนาดใหญ่และรูพรุนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวนำยวดยิ่งที่ไม่เจือด้วยฟลูออรีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกริเวลและแอนเดอร์สัน (Grivel; & Anderson. 2013) ลักษณะสัณฐานที่ดีขึ้นนี้ส่งผลให้การนำไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งดีขึ้นทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าการเจือด้วยฟลูออรีนจะทำให้เกิดการปรับปรุงลักษณะสัณฐาน แต่การเจือฟลูออรีนที่ $x = 0.2$ ไม่ทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นปริมาณฟลูออรีนที่เจือในตัวนำยวดยิ่งต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์เฟสผสมของตัวนำยวดยิ่งด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ แสดงให้เห็นว่าตัวนำยวดยิ่งประกอบด้วยเฟสสภาพนำยวดยิ่งและเฟสสภาพไม่นำยวดยิ่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ โดยพบว่าบางตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ไม่พบ Y และบางตำแหน่งไม่พบ F (ในตัวนำยวดยิ่งที่เจือฟลูออรีน) และจากตาราง 21 เห็นได้ชัดว่าอัตราส่วนของปริมาณธาตุที่วัดได้ไม่ตรงกับสูตรของตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของธาตุที่ไม่สม่ำเสมอและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสาร จากตาราง 10 เมื่อเปรียบเทียบค่าคงตัวแลตทิซของตัวนำยวดยิ่ง Y_{123} และ Y_{235} พบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y_{235} มีขนาดแกน c ยาวกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y_{123} และหากเปรียบเทียบค่าคงตัวแลตทิซของตัวนำยวดยิ่ง Y_{235} กับตัวนำยวดยิ่ง Y_{2352} ของโทปาลและอัคโดเกน (Topal; & Akdogan. 2011) ที่มีสูตรทางเคมีใกล้เคียงกัน พบว่ามีขนาดแกน a และ แกน b ใกล้เคียงกัน แต่ตัวนำยวดยิ่ง Y_{235} มีขนาดแกน c : 18.929 อังสตรอม ซึ่งยาวกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y_{2352} ที่มีขนาดแกน c : 11.593 อังสตรอม จากกราฟ 53 54 และ 55 พบว่าการเจือฟลูออรีนไม่มีผลกับขนาดแกน c และอัตราส่วนระหว่าง c/a แต่ทำให้ขนาดของแกน a ลดลงและแกน b เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแอนไอโซโทรปิกเพิ่มขึ้น ตัวนำยวดยิ่งเจือฟลูออรีนที่ $x = 0.1$ ทั้งสองสูตรมีอุณหภูมิวิกฤตและค่าแอนไอโซโทรปิกสูงสุด สอดคล้องกับผลการทดลองของอาเหมดและคณะ (Ahmed; et al. 2005) ที่ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม $Y-Ba-Cu-O-Ge_x$ ($x = 0$ ถึง 1.13) การเจือ Ge ที่ $x = 0.2$ มีอุณหภูมิวิกฤตและมีค่าแอนไอโซโทรปิกสูงสุด

5.3 ข้อเสนอแนะ

ตัวนำยวดยิ่ง Y235 เป็นตัวนำยวดยิ่งสูตรใหม่ที่มีโครงสร้างคล้ายกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y358 ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง การเตรียมด้วยวิธีไม่บดเป็นอีกหนึ่งวิธีการเตรียมที่น่าสนใจ เพราะจะทำให้สารมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หรืออาจเปลี่ยนสารเจือเป็นธาตุอื่น ซึ่งอาจสามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งเพิ่มขึ้นได้





บรรณานุกรม

- จิตติพงษ์ เครือหงส์ และคณะ. (2550). การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-Cu-O. กรุงเทพฯ: วารสารคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. (2543). เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abrikosov, A.A. (1957). On the magnetic properties of superconductors of the second group. *Soviet Physics JETPS*: 1174.
- Aliabadi, A.; Farshchi, A.; & Akhavan, M. (2009). A New Y-based HTSC with T_c above 100 K. *Physica C*. 469: 2012–2014.
- ABO-ARAI, Ahmed.; & Ahmad Taher DAWOUD*, Mohamed. (2005). New Phase of YBaCuGeO Superconductors Identified from X-ray Diffraction and Infra-red Absorption Measurements. *Turk J Phys*. 29: 33-41.
- Anthony, R.; & West, D. (1999). *Basic Solid State Chemistry 2nd edition*. New York. John Wiley & Sons.
- Bednorz, J.G.; & Muller, K.A. (1986). Possible High T_c Superconductivity in the BaLaCuO System. *Zeitschrift fuer Physik B*. 64: 189-193.
- Bosi, S.; et al. (2010). *In2 Physics @ HSC Activity Manual*. Australia: PEARSON.
- Buckel, W. (1911). *Superconductivity Fundamental and Application*. New York: VCH Publisher Inc.
- Chu, C.W. (2012). A possible approach from BCS through HTS to RTS with three examples. *Physica C*. 482: 33-44.
- Fullprof. (2012). Retrieved November 15, 2012. From <http://www.mfu.ac.th/center/stic/images/articles/SEM/sem001.jpg>.
- Fullprof. (2012). Retrieved November 18, 2012. From <http://emuch.net/html/201011/2558663.html>
- Ginzburg, V.L.; & Landau, L.D. (1950). *Sov.Phys.Jetp*. 20: 1064.
- Goldstein, J. I.; & et al. (1981). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York: Plenum Press.

- Grivel, J-C.; & Andersen, N. H. (2013). Effect of CuF_2 on the Synthesis and Superconducting Properties of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ Bulk Ceramic Samples. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 26: 3049-3056.
- Kittel, C. (1997). *Introduction to Solid State Physics*. 7th edition. New York: John Wiley & Sons.
- Kresin, V. Z.; & Worf, S. A. (1990). Fundamentals of Superconductivity. New York: Plenum Publishing.
- Meissner, W.; & Ochsenfeld, R. (1933). Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*. 21: 787.
- Murakami, M. (1999). Melt Process High-Temperature Superconductors. *World Scientific Publishing*.
- Murase, S.; & et al. (2001). Critical Temperature Measurement Method of Composite Superconductors. *Physica C*. 357-360: 1197-1200.
- Ovshinsky, S.R.; & et al. (1987). Superconductivity in the fluorinated YBaCuO. *Physical Review Letters*. 58: 2579-2581.
- Rodriguez, J. (2000). An Introduction to the program Fullprof. Laboratory Leon Brillouin.
- Scanning Electron Microscope. (2012). Retrived November 18, 2012. From <http://emuch.net/html/201011/2558663.html>.
- Smits, F.M. (1958). The Bell System Technical Journal: 711-718.
- Srinivasan, K.; & et al. (2011). Fluorine doping effect in new superconducting $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_y$ compound. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 10. 14: 1277-1283.
- Sujinnapram, S.; et al. (2011). The XRD spectra of new YBaCuO superconductors. *Bulletin of Materials Science*. p.1055.
- Topal, U.; & Akdogan, M. (2011). Further Increase of T_c in Y-Ba-Cu-O Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 24: 1815-1820.
- Udomsamuthirun, P.; & et al. (2010). The New superconductors of YBaCuO Materials. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 23: 1377-1380.
- Wu, K.; et al. (1987). Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Phys. Rev. Lett*. 58: 908-910.
- Young, R.A. (2002). The Rietveld Method. Oxford University Press.
- X - ray Diffractrometer. (2013). Retrived January 5, 2013. From <http://www.xrpd.eu>.



ภาคผนวก ก

ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยดยั้งแต่ละสูตร

ตาราง 11 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
77	0.00107	0.04112	0.00077	0.02944	0.00092	0.03962
78	0.00130	0.04993	0.00110	0.04217	0.00111	0.04788
79	0.00081	0.03087	0.00102	0.03890	0.00069	0.02977
80	0.00111	0.04273	0.00040	0.01531	0.00071	0.03071
81	0.00068	0.02607	0.00034	0.01298	0.00124	0.05329
82	0.00087	0.03320	0.00062	0.02362	0.00124	0.05331
83	0.00105	0.04030	0.00043	0.01656	0.00090	0.03887
84	0.00074	0.02843	0.00074	0.02842	0.00101	0.04338
85	0.00099	0.03794	0.00047	0.01777	0.00107	0.04609
86	0.00105	0.04032	0.00065	0.02488	0.00101	0.04337
87	0.00074	0.02846	0.00059	0.02251	0.00090	0.03883
88	0.00099	0.03796	0.00065	0.02485	0.00098	0.04240
89	0.00080	0.03077	0.00065	0.02486	0.00086	0.03699
90	0.00087	0.03318	0.00329	0.12552	0.00339	0.14620
91	0.00661	0.25341	0.01076	0.41090	0.01132	0.48811
92	0.01695	0.64969	0.01929	0.73694	0.01626	0.70104
93	0.01909	0.73168	0.02004	0.76546	0.01751	0.75527
94	0.02034	0.77965	0.02088	0.79758	0.01827	0.78789
95	0.02089	0.80054	0.02142	0.81809	0.01866	0.80483
96	0.02026	0.77640	0.02141	0.81769	0.01912	0.82445
97	0.02160	0.82776	0.02247	0.85826	0.01934	0.83390
98	0.02090	0.80092	0.02258	0.86258	0.01962	0.84618
99	0.02167	0.83045	0.02230	0.85181	0.01968	0.84868
100	0.02222	0.85152	0.02287	0.87367	0.02006	0.86482
101	0.02128	0.81559	0.02359	0.90105	0.02033	0.87664
102	0.02216	0.84926	0.02357	0.90047	0.02030	0.87544
103	0.02298	0.88094	0.02329	0.88957	0.02071	0.89308
104	0.02248	0.86158	0.02378	0.90835	0.02107	0.90865
105	0.02339	0.89655	0.02386	0.91140	0.02091	0.90174

ตาราง 11 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123 (ต่อ)

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
106	0.02321	0.88982	0.02442	0.93266	0.02139	0.92259
107	0.02320	0.88914	0.02446	0.93441	0.02130	0.91839
108	0.02376	0.91080	0.02441	0.93234	0.02142	0.92369
109	0.02322	0.88984	0.02504	0.95658	0.02175	0.93785
110	0.02400	0.91994	0.02467	0.94244	0.02207	0.95189
111	0.02367	0.90744	0.02556	0.97657	0.02213	0.95433
112	0.02437	0.93392	0.02507	0.95780	0.02221	0.95759
113	0.02493	0.95560	0.02540	0.97043	0.02238	0.96505
114	0.02431	0.93189	0.02567	0.98068	0.02266	0.97723
115	0.02564	0.98287	0.02593	0.99053	0.02246	0.96843
116	0.02490	0.95456	0.02575	0.98358	0.02263	0.97581
117	0.02507	0.96093	0.02582	0.98643	0.02293	0.98871
118	0.02525	0.96784	0.02609	0.99655	0.02313	0.99733
119	0.02565	0.98322	0.02640	1.00855	0.02317	0.99920
120	0.02609	1.00000	0.02618	1.00000	0.02319	1.00000

ตาราง 12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
77	0.00093	0.05315	0.00104	0.05990	0.00060	0.03637
78	0.00044	0.02486	0.00101	0.05826	0.00042	0.02509
79	0.00106	0.06040	0.00066	0.03824	0.00023	0.01377
80	0.00088	0.04977	0.00057	0.03274	0.00031	0.01879
81	0.00088	0.04979	0.00041	0.02364	0.00046	0.02755
82	0.00094	0.05340	0.00047	0.02727	0.00046	0.02754
83	0.00056	0.03205	0.00056	0.03267	0.00048	0.02879
84	0.00031	0.01783	0.00056	0.03267	0.00050	0.03003
85	0.00025	0.01426	0.00041	0.02362	0.00031	0.01878
86	0.00069	0.03915	0.00066	0.03816	0.00046	0.02754
87	0.00056	0.03210	0.00044	0.02543	0.00037	0.02254
88	0.00063	0.03565	0.00041	0.02360	0.00039	0.02379
89	0.00056	0.03211	0.00069	0.03995	0.00046	0.02754
90	0.00113	0.06419	0.00066	0.03812	0.00075	0.04508
91	0.00131	0.07473	0.00097	0.05631	0.00073	0.04384
92	0.00138	0.07833	0.00094	0.05448	0.00098	0.05887
93	0.00907	0.51584	0.00138	0.07991	0.00148	0.08897
94	0.01372	0.78018	0.00804	0.46523	0.00894	0.53891
95	0.01358	0.77224	0.01326	0.76667	0.01332	0.80228
96	0.01466	0.83365	0.01377	0.79638	0.01354	0.81557
97	0.01461	0.83077	0.01399	0.80879	0.01378	0.83041
98	0.01468	0.83440	0.01436	0.83022	0.01429	0.86123
99	0.01510	0.85876	0.01445	0.83574	0.01468	0.88449
100	0.01526	0.86786	0.01466	0.84794	0.01433	0.86317
101	0.01541	0.87599	0.01469	0.84970	0.01460	0.87992
102	0.01520	0.86442	0.01490	0.86173	0.01481	0.89249
103	0.01565	0.88964	0.01494	0.86387	0.01489	0.89736
104	0.01598	0.90882	0.01551	0.89692	0.01505	0.90680
105	0.01537	0.87410	0.01546	0.89410	0.01518	0.91443

ตาราง 12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1} (ต่อ)

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
106	0.01583	0.90032	0.01565	0.90487	0.01508	0.90886
107	0.01573	0.89446	0.01570	0.90824	0.01551	0.93449
108	0.01556	0.88469	0.01580	0.91381	0.01565	0.94268
109	0.01646	0.93570	0.01576	0.91151	0.01575	0.94918
110	0.01552	0.88262	0.01580	0.91362	0.01581	0.95259
111	0.01672	0.95042	0.01613	0.93255	0.01591	0.95835
112	0.01701	0.96737	0.01607	0.92962	0.01619	0.97571
113	0.01646	0.93615	0.01585	0.91680	0.01616	0.97392
114	0.01673	0.95105	0.01604	0.92787	0.01601	0.96462
115	0.01670	0.94972	0.01623	0.93840	0.01607	0.96820
116	0.01674	0.95185	0.01647	0.95257	0.01633	0.98415
117	0.01696	0.96437	0.01638	0.94703	0.01632	0.98346
118	0.01712	0.97322	0.01654	0.95645	0.01655	0.99719
119	0.01683	0.95712	0.01674	0.96797	0.01638	0.98688
120	0.01759	1.00000	0.01729	1.00000	0.01660	1.00000

ตาราง 13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2}

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
77	0.00100	0.03102	0.00050	0.01612	0.00035	0.01128
78	0.00186	0.05812	0.00047	0.01505	0.00020	0.00628
79	0.00105	0.03284	0.00083	0.02667	0.00031	0.01010
80	0.00068	0.02124	0.00040	0.01284	0.00010	0.00336
81	0.00074	0.02315	0.00031	0.00990	0.00016	0.00512
82	0.00068	0.02115	0.00053	0.01707	0.00015	0.00473
83	0.00086	0.02694	0.00037	0.01201	0.00020	0.00630
84	0.00105	0.03267	0.00011	0.00354	0.00021	0.00668
85	0.00117	0.03648	0.00046	0.01501	0.00029	0.00944
86	0.00068	0.02113	0.00050	0.01601	0.00013	0.00415
87	0.00074	0.02303	0.00016	0.00529	0.00027	0.00876
88	0.00054	0.01683	0.00020	0.00644	0.00004	0.00121
89	0.00040	0.01237	0.00015	0.00470	0.00025	0.00809
90	0.00043	0.01349	0.00050	0.01600	0.00059	0.01888
91	0.00074	0.02302	0.00043	0.01401	0.00241	0.07750
92	0.00394	0.12291	0.00514	0.16610	0.01669	0.53659
93	0.02100	0.65445	0.02234	0.72145	0.02418	0.77732
94	0.02512	0.78309	0.02468	0.79707	0.02525	0.81182
95	0.02598	0.80993	0.02545	0.82202	0.02559	0.82284
96	0.02667	0.83142	0.02577	0.83212	0.02610	0.83916
97	0.02686	0.83715	0.02649	0.85535	0.02623	0.84323
98	0.02776	0.86547	0.02703	0.87291	0.02708	0.87062
99	0.02732	0.85176	0.02724	0.87974	0.02722	0.87517
100	0.02882	0.89845	0.02782	0.89849	0.02737	0.88002
101	0.02921	0.91043	0.02782	0.89837	0.02776	0.89249
102	0.02884	0.89908	0.02815	0.90896	0.02802	0.90088
103	0.02866	0.89323	0.02838	0.91663	0.02848	0.91558
104	0.02964	0.92406	0.02874	0.92815	0.02856	0.91840
105	0.02953	0.92034	0.02874	0.92813	0.02895	0.93074

ตาราง 13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2} (ต่อ)

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
106	0.02968	0.92516	0.02889	0.9330	0.02911	0.93586
107	0.03010	0.93829	0.02932	0.94686	0.02918	0.93816
108	0.03009	0.93797	0.02970	0.95920	0.02933	0.94317
109	0.03050	0.95065	0.02982	0.96293	0.02935	0.94357
110	0.03048	0.95008	0.03010	0.97219	0.02950	0.94859
111	0.03048	0.95017	0.03005	0.97044	0.02969	0.95452
112	0.03101	0.96657	0.03019	0.97503	0.02994	0.96284
113	0.03086	0.96210	0.03038	0.98125	0.02982	0.95893
114	0.03128	0.97514	0.03019	0.97506	0.03030	0.97429
115	0.03183	0.99228	0.03062	0.98900	0.03033	0.97511
116	0.03112	0.96995	0.03076	0.99331	0.03068	0.98660
117	0.03144	0.98013	0.03076	0.99339	0.03068	0.98638
118	0.03168	0.98745	0.03060	0.98834	0.03085	0.99185
119	0.03132	0.97632	0.03100	1.00098	0.03084	0.99150
120	0.03208	1.00000	0.03097	1.00000	0.03110	1.00000

ตาราง 14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
77	0.00119	0.00821	0.00125	0.00881	0.00037	0.00261
78	0.00143	0.00994	0.00071	0.00505	0.00052	0.00362
79	0.00162	0.01124	0.00043	0.00307	0.00033	0.00232
80	0.00094	0.00649	0.00037	0.00263	0.00044	0.00305
81	0.00106	0.00733	0.00043	0.00307	0.00039	0.00276
82	0.00106	0.00734	0.00034	0.00241	0.00006	0.00045
83	0.00030	0.00210	0.00056	0.00392	0.00006	0.00039
84	0.00030	0.00210	0.00037	0.00261	0.00019	0.00135
85	0.00106	0.00734	0.00068	0.00479	0.00019	0.00135
86	0.00081	0.00560	0.00034	0.00239	0.00015	0.00104
87	0.00143	0.00991	0.00037	0.00261	0.00091	0.00635
88	0.00131	0.00904	0.00037	0.00261	0.01093	0.07654
89	0.00068	0.00473	0.00317	0.02240	0.03661	0.25642
90	0.00112	0.00776	0.02926	0.20665	0.10258	0.71850
91	0.03041	0.21058	0.09122	0.64424	0.11847	0.82975
92	0.10668	0.73879	0.11774	0.83149	0.12118	0.84872
93	0.11987	0.83013	0.12118	0.85583	0.12355	0.86534
94	0.12333	0.85406	0.12368	0.87344	0.12535	0.87796
95	0.12440	0.86144	0.12524	0.88451	0.12682	0.88822
96	0.12687	0.87860	0.12657	0.89390	0.12824	0.89815
97	0.12968	0.89804	0.12799	0.90390	0.12925	0.90529
98	0.13022	0.90175	0.12934	0.91341	0.13030	0.91259
99	0.13152	0.91075	0.12998	0.91800	0.13102	0.91766
100	0.13244	0.91717	0.13056	0.92206	0.13185	0.92343
101	0.13307	0.92150	0.13149	0.92860	0.13257	0.92849
102	0.13400	0.92792	0.13275	0.93754	0.13303	0.93175
103	0.13565	0.93937	0.13324	0.94102	0.13399	0.93847
104	0.13521	0.93636	0.13391	0.94574	0.13439	0.94126
105	0.13613	0.94273	0.13420	0.94774	0.13505	0.94587

ตาราง 14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235 (ต่อ)

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
106	0.13633	0.94412	0.13503	0.95361	0.13563	0.94994
107	0.13786	0.95470	0.13526	0.95526	0.13631	0.95470
108	0.13815	0.95669	0.13604	0.96073	0.13682	0.95831
109	0.13899	0.96251	0.13677	0.96590	0.13688	0.95867
110	0.13999	0.96946	0.13684	0.96639	0.13789	0.96580
111	0.14094	0.97599	0.13716	0.96864	0.13813	0.96745
112	0.14108	0.97701	0.13854	0.97843	0.13911	0.97433
113	0.14142	0.97933	0.13860	0.97883	0.13907	0.97406
114	0.14211	0.98408	0.13876	0.98000	0.14001	0.98060
115	0.14319	0.99158	0.13936	0.98424	0.14038	0.98318
116	0.14295	0.98993	0.14009	0.98940	0.14094	0.98713
117	0.14336	0.99277	0.14067	0.99347	0.14152	0.99123
118	0.14533	1.00643	0.14104	0.99605	0.14185	0.99350
119	0.14467	1.00182	0.14146	0.99902	0.14204	0.99481
120	0.14440	1.00000	0.14160	1.00000	0.14278	1.00000

ตาราง 15 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.1}

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
77	0.00150	0.00506	0.00084	0.00255	0.05596	0.08464
78	0.00150	0.00505	0.00050	0.00153	0.05780	0.08743
79	0.00100	0.00337	0.00016	0.00048	0.07229	0.10935
80	0.00087	0.00294	0.00004	0.00012	0.07760	0.11737
81	0.00100	0.00336	0.00135	0.00413	0.09173	0.13874
82	0.00038	0.00127	0.00531	0.01622	0.10500	0.15881
83	0.00205	0.00692	0.01081	0.03304	0.12499	0.18906
84	0.00719	0.02427	0.01745	0.05333	0.14752	0.22313
85	0.01198	0.04042	0.02653	0.08109	0.16877	0.25528
86	0.02074	0.06998	0.03733	0.11411	0.18994	0.28730
87	0.03241	0.10936	0.05091	0.15560	0.21112	0.31933
88	0.04750	0.16028	0.06987	0.21353	0.24546	0.37128
89	0.06773	0.22852	0.09052	0.27665	0.30148	0.45601
90	0.09401	0.31721	0.12686	0.38774	0.39498	0.59743
91	0.13775	0.46480	0.18295	0.55914	0.51727	0.78240
92	0.19835	0.66926	0.25712	0.78583	0.58118	0.87907
93	0.24210	0.81687	0.29716	0.90822	0.59971	0.90710
94	0.25300	0.85365	0.30498	0.93213	0.60749	0.91887
95	0.25565	0.86259	0.30910	0.94470	0.61290	0.92706
96	0.25878	0.87317	0.31152	0.95211	0.61772	0.93435
97	0.26088	0.88024	0.31351	0.95820	0.62146	0.93999
98	0.26224	0.88482	0.31497	0.96264	0.62504	0.94541
99	0.26370	0.88977	0.31628	0.96667	0.62859	0.95079
100	0.26547	0.89574	0.31720	0.96947	0.63135	0.95496
101	0.26745	0.90241	0.31829	0.97281	0.63364	0.95842
102	0.26858	0.90622	0.31932	0.97594	0.63623	0.96233
103	0.27055	0.91286	0.32015	0.97849	0.63873	0.96612
104	0.27045	0.91253	0.32068	0.98011	0.64045	0.96872
105	0.27143	0.91585	0.32175	0.98338	0.64254	0.97188

ตาราง 15 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.1} (ต่อ)

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
106	0.27358	0.92310	0.32200	0.98414	0.64417	0.97435
107	0.27430	0.92551	0.32275	0.98644	0.64589	0.97695
108	0.27599	0.93123	0.32257	0.98589	0.64788	0.97996
109	0.27662	0.93336	0.32256	0.98584	0.64915	0.98188
110	0.27851	0.93972	0.32384	0.98975	0.65078	0.98434
111	0.28041	0.94614	0.32379	0.98961	0.65232	0.98668
112	0.28320	0.95556	0.32395	0.99011	0.65370	0.98876
113	0.28336	0.95611	0.32447	0.99170	0.65317	0.98796
114	0.28721	0.96908	0.32476	0.99257	0.65337	0.98826
115	0.29042	0.97991	0.32507	0.99353	0.65576	0.99188
116	0.29126	0.98275	0.32502	0.99338	0.65760	0.99467
117	0.29296	0.98848	0.32554	0.99495	0.65892	0.99666
118	0.29417	0.99257	0.32609	0.99664	0.65978	0.99797
119	0.29594	0.99853	0.32673	0.99859	0.66060	0.99920
120	0.29637	1.00000	0.32719	1.00000	0.66113	1.00000

ตาราง 16 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2}

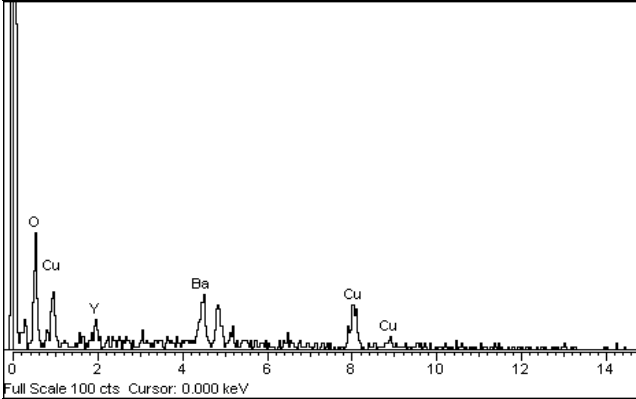
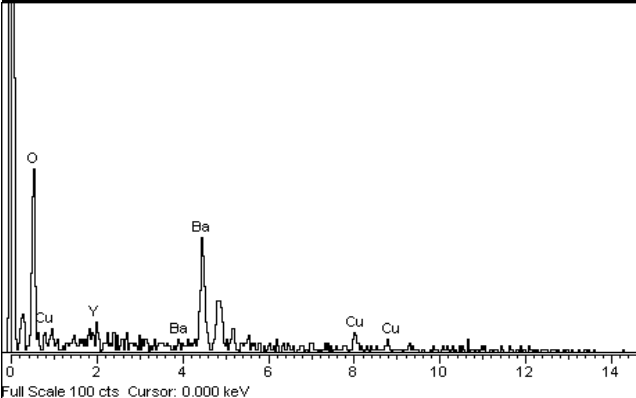
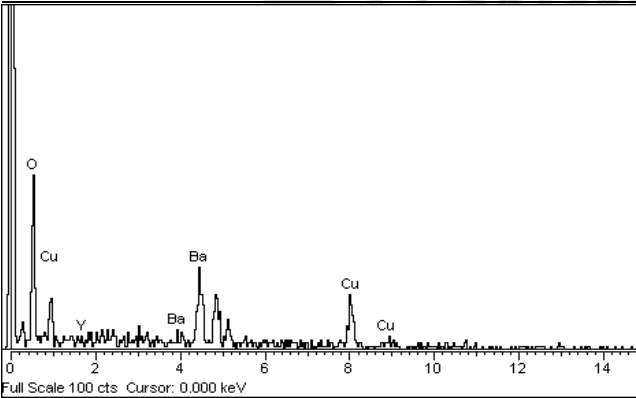
อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
77	0.00112	0.02513	0.00066	0.01445	0.00093	0.02025
78	0.00081	0.01814	0.00066	0.01455	0.00061	0.01314
79	0.00131	0.02939	0.00104	0.02289	0.00086	0.01857
80	0.00118	0.02660	0.00119	0.02630	0.00100	0.02175
81	0.00188	0.04214	0.00110	0.02424	0.00100	0.02174
82	0.00069	0.01543	0.00123	0.02703	0.00115	0.02491
83	0.00112	0.02525	0.00116	0.02562	0.00096	0.02084
84	0.00174	0.03918	0.00119	0.02632	0.00134	0.02899
85	0.00093	0.02099	0.00101	0.02217	0.00092	0.01993
86	0.00100	0.02242	0.00101	0.02220	0.00079	0.01721
87	0.00125	0.02803	0.00060	0.01318	0.00084	0.01812
88	0.00112	0.02524	0.00302	0.06655	0.00402	0.08701
89	0.00512	0.11495	0.00821	0.18105	0.01023	0.22162
90	0.01218	0.27351	0.01679	0.37040	0.01999	0.43308
91	0.02433	0.54643	0.02890	0.63750	0.03564	0.77209
92	0.03503	0.78656	0.03792	0.83666	0.03974	0.86095
93	0.03746	0.84117	0.03946	0.87065	0.04110	0.89049
94	0.03941	0.88496	0.04070	0.89781	0.04195	0.90889
95	0.03927	0.88192	0.04098	0.90405	0.04207	0.91141
96	0.03916	0.87927	0.04092	0.90268	0.04272	0.92552
97	0.04057	0.91102	0.04175	0.92114	0.04307	0.93306
98	0.03970	0.89146	0.04191	0.92450	0.04336	0.93949
99	0.04054	0.91026	0.04216	0.93009	0.04323	0.93662
100	0.04167	0.93559	0.04221	0.93115	0.04368	0.94626
101	0.04053	0.91011	0.04257	0.93923	0.04355	0.94353
102	0.04146	0.93107	0.04278	0.94374	0.04409	0.95525
103	0.04179	0.93830	0.04309	0.95063	0.04374	0.94774
104	0.04130	0.92737	0.04320	0.95303	0.04423	0.95833
105	0.04204	0.94411	0.04327	0.95464	0.04406	0.95457

ตาราง 16 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2} (ต่อ)

อุณหภูมิ (เคลวิน)	50 mA		100 mA		150 mA	
	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized	$\rho(\text{m}\Omega\text{-m})$	Normalized
106	0.04177	0.93786	0.04317	0.95245	0.04454	0.96502
107	0.04248	0.95382	0.04378	0.96596	0.04480	0.97059
108	0.04233	0.95057	0.04349	0.95956	0.04471	0.96876
109	0.04291	0.96353	0.04403	0.97128	0.04539	0.98336
110	0.04353	0.97757	0.04410	0.97282	0.04479	0.97030
111	0.04211	0.94562	0.04412	0.97333	0.04562	0.98845
112	0.04291	0.96347	0.04469	0.98585	0.04556	0.98704
113	0.04330	0.97228	0.04439	0.97942	0.04551	0.98594
114	0.04269	0.95870	0.04467	0.98557	0.04579	0.99205
115	0.04384	0.98450	0.04448	0.98129	0.04553	0.98645
116	0.04434	0.99570	0.04507	0.99443	0.04568	0.98962
117	0.04335	0.97344	0.04524	0.99799	0.04594	0.99528
118	0.04435	0.99584	0.04480	0.98833	0.04596	0.99573
119	0.04367	0.98073	0.04485	0.98952	0.04615	0.99992
120	0.04453	1.00000	0.04533	1.00000	0.04616	1.00000



ตาราง 17 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123

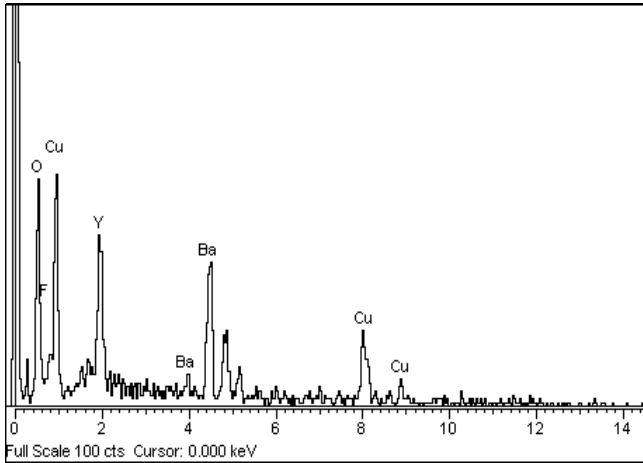
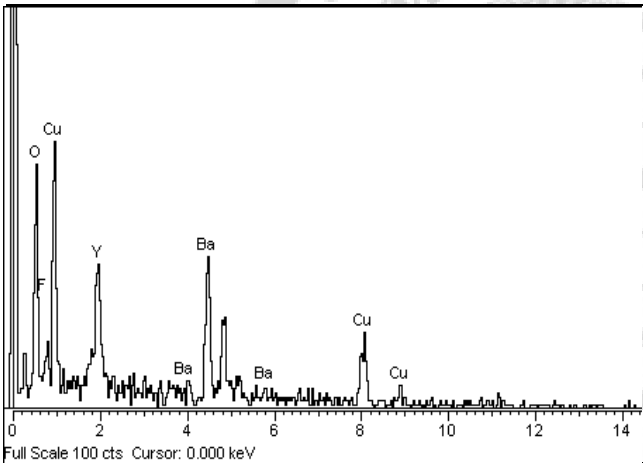
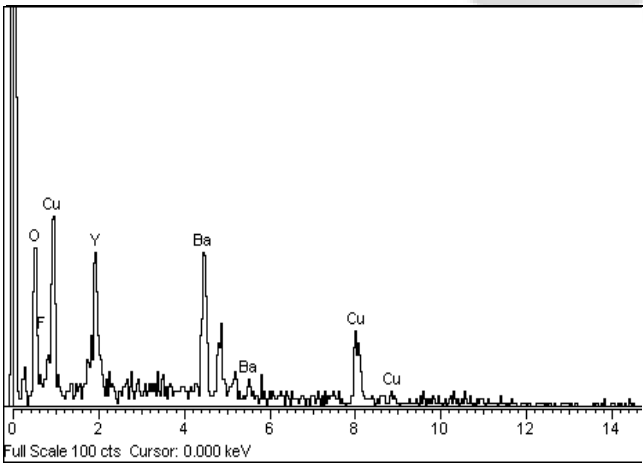
Y123 ตำแหน่งที่ 1				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	21.26	63.18	24.77
	Cu L	21.56	16.13	6.32
	Y L	4.78	2.55	1
	Ba L	52.41	18.14	7.11
	Totals	100.00		
Y123 ตำแหน่งที่ 2				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	22.87	65.84	65.84
	Cu L	7.72	5.60	5.60
	Y L	0.00	0.00	0.00
	Ba L	66.87	22.42	22.42
	Totals	100.00		
Y123 ตำแหน่งที่ 3				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	24.29	67.39	67.39
	Cu L	21.73	15.17	15.17
	Y L	0.00	0.00	0.00
	Ba L	53.98	17.44	17.44
	Totals	100.00		

ตาราง 17 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123 (ต่อ)

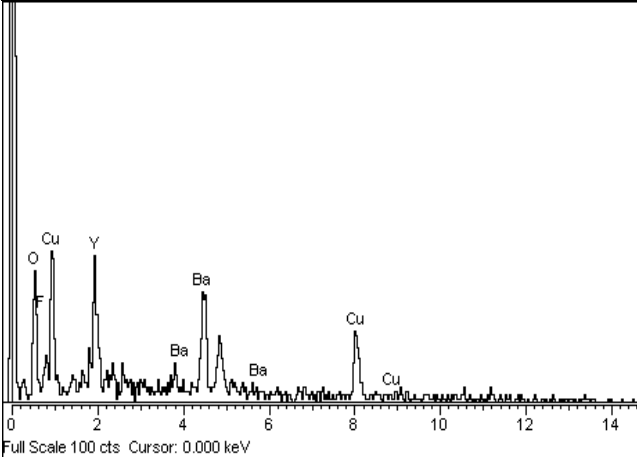
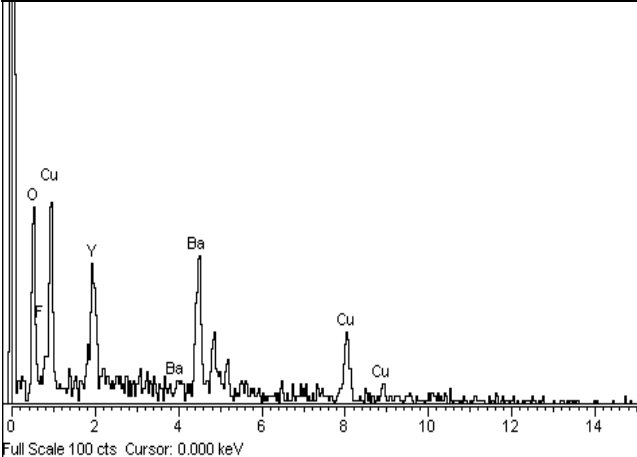
Y123 ตำแหน่งที่ 4				
	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	24.82	67.17	67.17
	Cu L	24.91	16.97	16.97
	Y L	0.00	0.00	0.00
	Ba L	50.28	15.85	15.85
Totals		100.00		

Y123 ตำแหน่งที่ 5				
	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	25.23	70.19	70.19
	Cu L	14.82	10.38	10.38
	Y L	0.00	0.00	0.00
	Ba L	59.94	19.42	19.42
Totals		100.00		

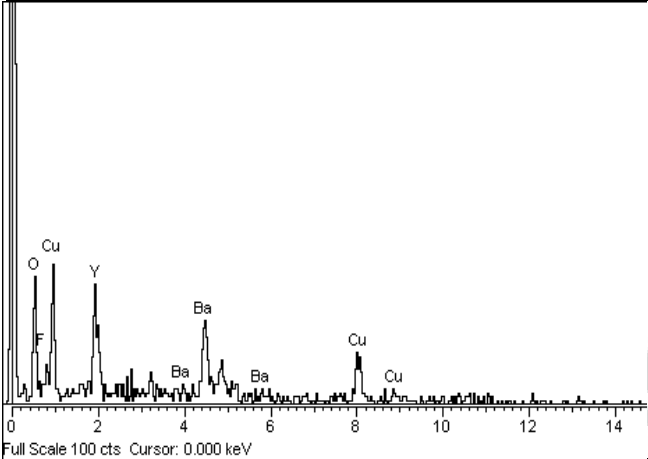
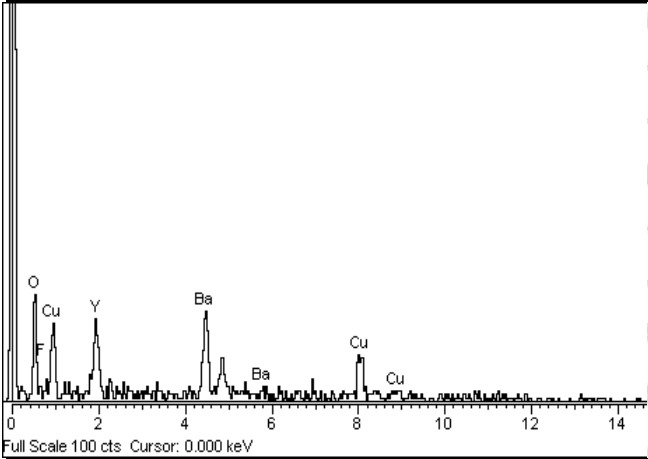
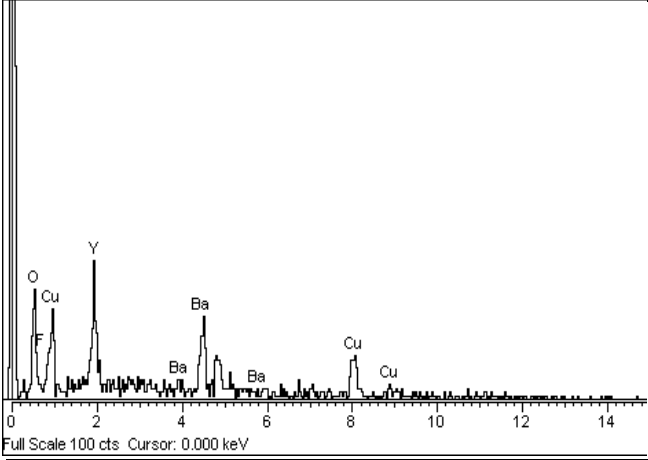
ตาราง 18 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1}

Y123+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 1				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	15.66	51.73	5.41
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	27.85	23.16	2.42
	Y L	16.09	9.56	1
	Ba L	40.40	15.55	1.62
Totals		100.00		
Y123+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 2				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	17.49	54.26	8.01
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	32.24	25.18	3.71
	Y L	12.13	6.77	1
	Ba L	38.14	13.78	2.03
Totals		100.00		
Y123+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 3				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	12.26	44.97	4.30
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	27.86	25.74	2.46
	Y L	15.81	10.44	1
	Ba L	44.08	18.84	1.80
Totals		100.00		

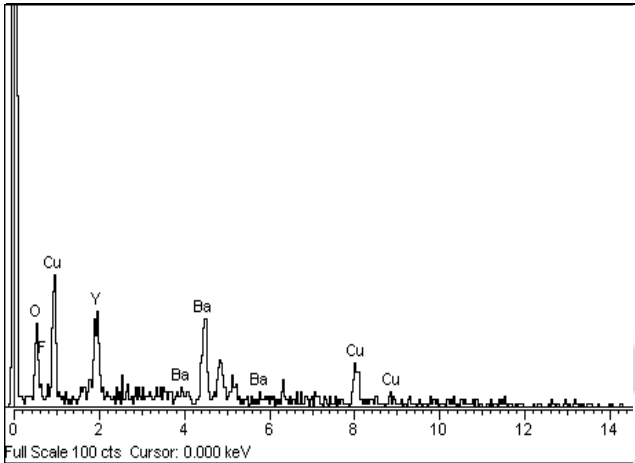
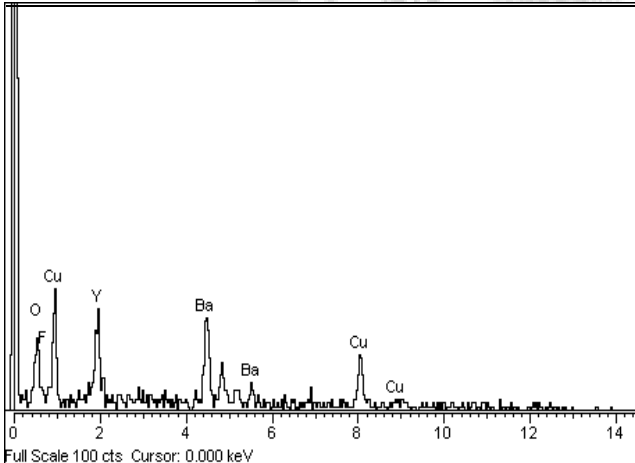
ตาราง 18 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.1} (ต่อ)

Y123+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 4				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	14.70	50.06	5.76
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	28.28	24.25	2.79
	Y L	14.18	8.69	1
	Ba L	42.84	17.00	1.95
	Totals	100.00		
Y123+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 5				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	16.27	52.82	7.03
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	29.31	23.95	3.18
	Y L	12.86	7.51	1
	Ba L	41.56	15.72	2.09
	Totals	100.00		

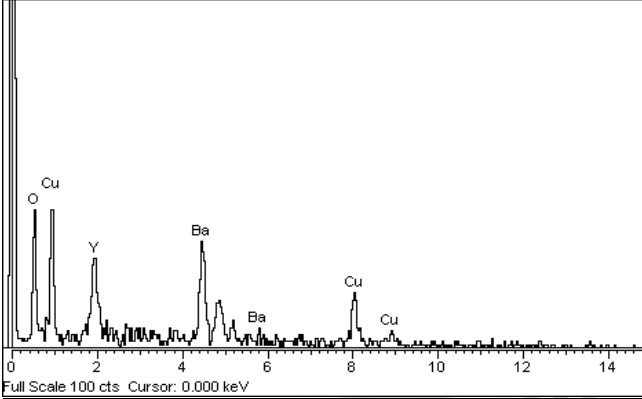
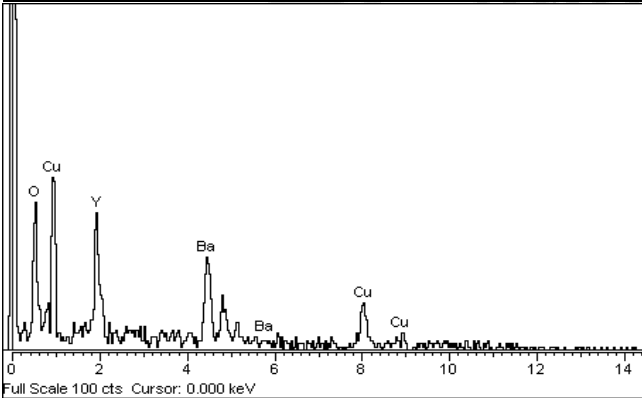
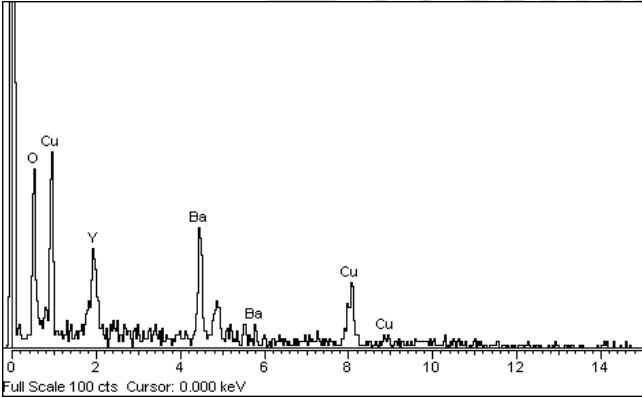
ตาราง 19 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2}

Y123+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 1				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	18.06	55.44	5.65
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	28.41	21.96	2.24
	Y L	17.74	9.80	1
	Ba L	35.79	12.80	1.30
Totals		100.00		
Y123+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 2				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	16.92	51.53	6.17
	F K	3.02	7.76	0.93
	Cu L	22.73	17.43	2.08
	Y L	15.21	8.34	1
	Ba L	42.12	14.95	1.79
Totals		100.00		
Y123+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 3				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	15.78	53.21	4.52
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	21.32	18.10	1.60
	Y L	18.64	11.31	1
	Ba L	44.26	17.38	1.53
Totals		100.00		

ตาราง 19 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y123+F_{0.2} (ต่อ)

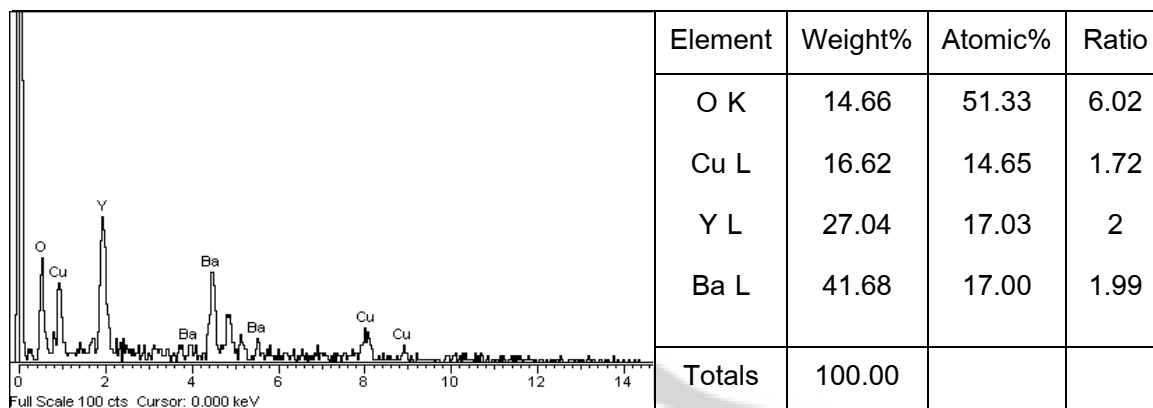
Y123+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 4				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	11.49	42.30	4.26
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	32.57	30.20	3.04
	Y L	14.97	9.92	1
	Ba L	40.97	17.58	1.77
Totals		100.00		
Y123+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 5				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	7.59	32.21	2.62
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	31.02	33.13	2.69
	Y L	16.09	12.28	1
	Ba L	45.29	22.38	1.82
Totals		100.00		

ตาราง 20 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235

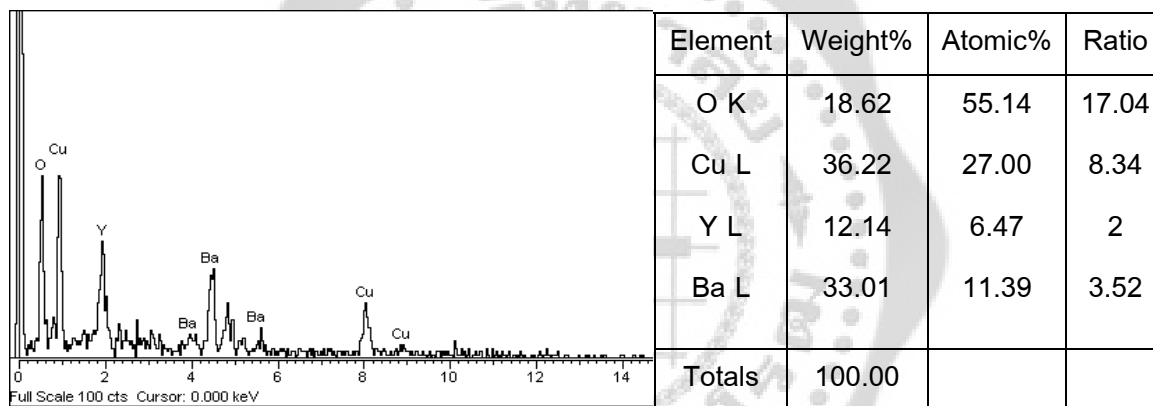
Y235 ตำแหน่งที่ 1				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	15.24	51.01	13.12
	Cu L	29.19	24.59	6.32
	Y L	12.90	7.77	2
	Ba L	42.67	16.63	4.28
	Totals	100.00		
Y235 ตำแหน่งที่ 2				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	14.57	48.20	8.61
	Cu L	33.39	27.81	4.97
	Y L	18.80	11.19	2
	Ba L	33.24	12.81	2.28
	Totals	100.00		
Y235 ตำแหน่งที่ 3				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	16.52	52.07	18.63
	Cu L	35.89	28.48	10.18
	Y L	9.86	5.59	2
	Ba L	37.72	13.85	4.95
	Totals	100.00		

ตาราง 20 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235 (ต่อ)

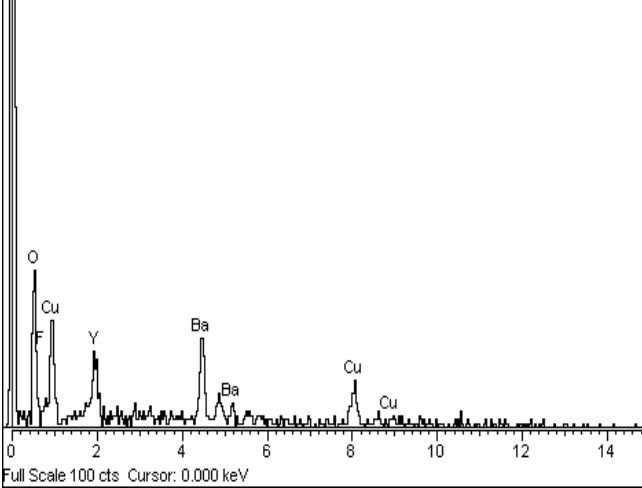
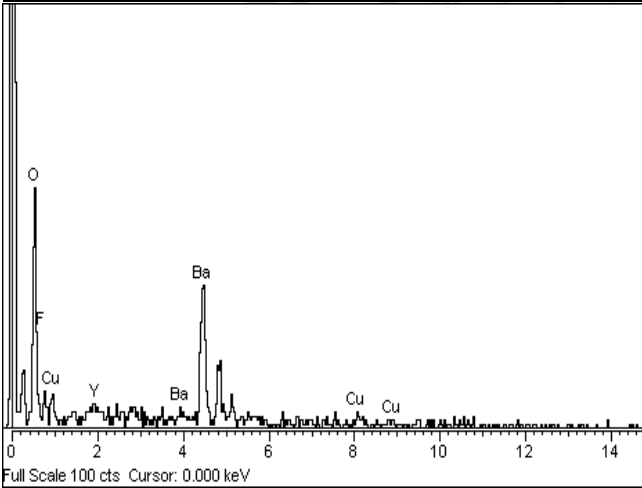
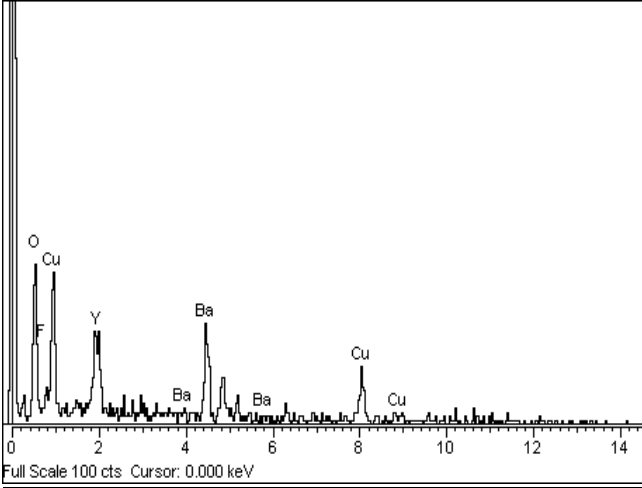
Y235 ตำแหน่งที่ 4



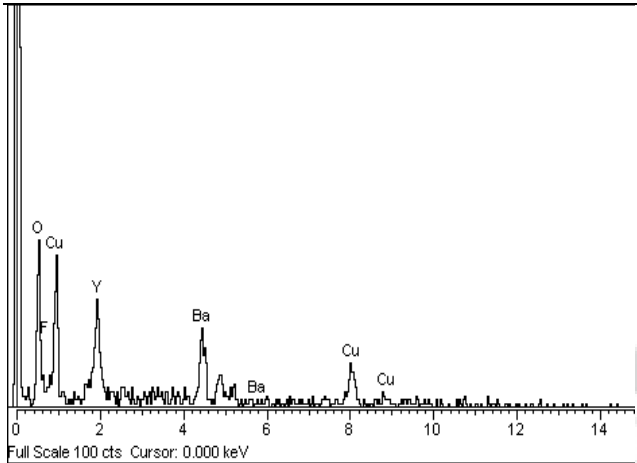
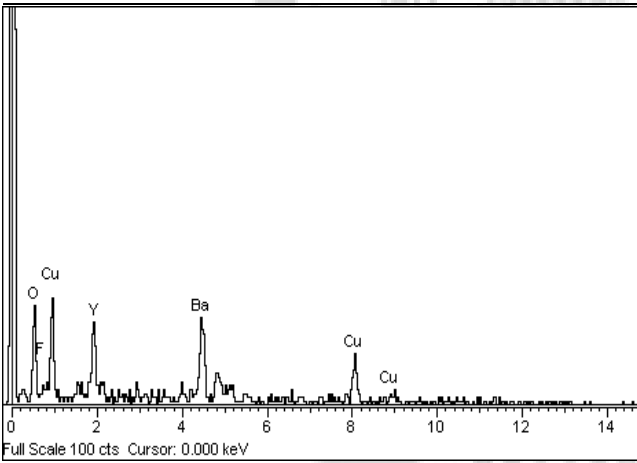
Y235 ตำแหน่งที่ 5



ตาราง 21 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.1}

Y235+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 1				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	21.25	61.33	18.03
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	25.05	18.21	5.35
	Y L	13.08	6.80	2
	Ba L	40.62	13.66	4.01
Totals		100.00		
Y235+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 2				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	23.37	69.21	69.21
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	10.86	8.10	8.10
	Y L	0.00	0.00	0.00
	Ba L	65.77	22.69	22.69
Totals		100.00		
Y235+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 3				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	18.15	55.78	16.55
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	30.13	23.32	6.91
	Y L	12.18	6.74	2
	Ba L	39.54	14.16	4.20
Totals		100.00		

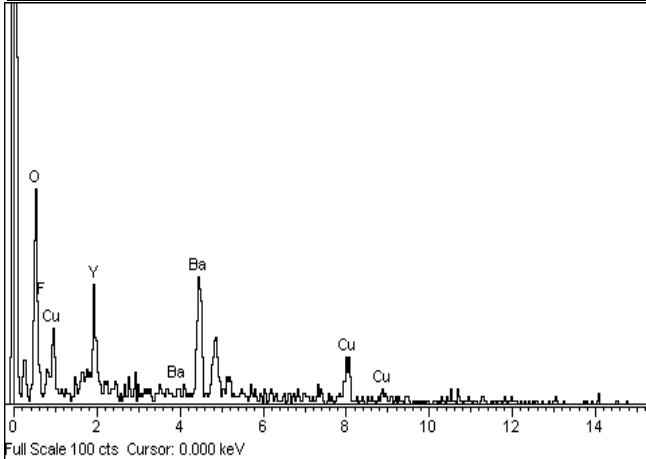
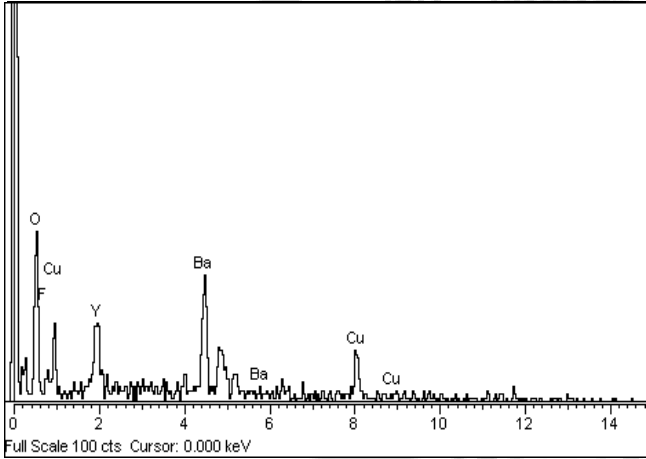
ตาราง 21 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.1} (ต่อ)

Y235+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 4				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	20.27	57.98	15.00
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	32.88	23.68	6.12
	Y L	15.02	7.73	2
	Ba L	31.83	10.61	2.74
	Totals	100.00		
Y235+F _{0.1} ตำแหน่งที่ 5				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	14.43	49.66	14.08
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	29.13	25.24	7.16
	Y L	11.39	7.05	2
	Ba L	45.04	18.05	5.12
	Totals	100.00		

ตาราง 22 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2}

Y235+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 1				
	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	25.96	67.79	24.74
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	21.98	14.45	5.27
	Y L	11.65	5.48	2
	Ba L	40.40	12.29	4.48
	Totals	100.00		
Y235+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 2				
	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	20.31	57.55	32.79
	F K	3.37	8.05	4.58
	Cu L	20.82	14.85	8.46
	Y L	6.87	3.51	2
	Ba L	48.62	16.05	9.14
	Totals	100.00		
Y235+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 3				
	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	19.05	58.89	15.29
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	22.11	17.20	4.46
	Y L	13.84	7.70	2
	Ba L	45.00	16.21	4.21
	Totals	100.00		

ตาราง 22 แสดงปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของตัวนำยวดยิ่ง Y235+F_{0.2} (ต่อ)

Y235+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 4				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	20.80	63.82	16.32
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	12.33	9.53	2.43
	Y L	14.16	7.82	2
	Ba L	52.71	18.84	4.81
	Totals	100.00		
Y235+F _{0.2} ตำแหน่งที่ 5				
 Full Scale 100 cts Cursor: 0.000 keV	Element	Weight%	Atomic%	Ratio
	O K	21.00	62.90	18.20
	F K	0.00	0.00	0.00
	Cu L	17.55	13.24	3.83
	Y L	12.82	6.91	2
	Ba L	48.62	16.96	4.90
	Totals	100.00		

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ สกุล	นายธนระชต์ คันทักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	19 พฤศจิกายน 2532
สถานที่เกิด	อ.ศรีสงคราม จ.นครพนม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	641 หมู่ 7 ต.ศรีสงคราม อ.ศรีสงคราม จ.นครพนม 48150

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2548	มัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนสหราษฎร์รังสฤษดิ์
พ.ศ.2551	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล
พ.ศ.2555	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ.2557	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ