



การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134  
เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์และโถรงบดสาร

COMPARISON OF THE PHYSICAL PROPERTIES  
OF Y134 SUPERCONDUCTOR DOPED MANGANESE OXIDE ( $Mn_3O_4$ )  
PREPARED BY BALL MILLING AND MORTAR

ปริวัตร คำทา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134  
เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์และโถรงบดสาร



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

COMPARISON OF THE PHYSICAL PROPERTIES  
OF Y134 SUPERCONDUCTOR DOPED MANGANESE OXIDE ( $Mn_3O_4$ )  
PREPARED BY BALL MILLING AND MORTAR



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements  
for MASTER OF EDUCATION (Physics)  
Faculty of Science Srinakharinwirot University  
2019  
Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134

เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์และโถรงบดสาร

ของ

ปริวัตร คำทา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรวิโรจน์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัตน์)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุรุจณี วิจารณ์)

ชื่อเรื่อง	การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ และโถรงบดสาร
ผู้วิจัย	ปริวัตร คำทา
ปริญญา	การศึกษามหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริธัญ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งชนิด Y134 ( $YBa_3Cu_4O_{9.5}$ ) เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $YBa_3Cu_4O_{9.5}(Mn_3O_4)_x$  โดย  $x=0, 0.005, 0.010$  และ  $0.015$ ) ด้วยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็งโดยใช้วิธีการบดด้วยโถรงบดสารและเครื่องบดบอลมิลล์และเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิวิกฤต ลักษณะโครงสร้างและอัตราส่วนของ  $Cu^{3+}$  ต่อ  $Cu^{2+}$  ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX พบว่าการบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ให้ตัวอย่างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า มีรูพรุนลดลง การกระจายตัวของสารตั้งต้นดีกว่าและอัตราส่วนของ  $Cu^{3+}$  ต่อ  $Cu^{2+}$  เฉลี่ยจากวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการบดด้วยโถรงบดสาร ทำให้ตัวอย่างกลุ่มนี้มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตและออนเซต ( $\Delta T_c$ ) น้อยกว่ากลุ่มที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร ซึ่งการบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์นี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพของการเจือสารแมงกานีสออกไซด์ ทำให้มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น โดยผลจากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า 4 ขั้วด้วยวิธีแวน เดอร์ พาว พบว่าตัวอย่างที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.015 โมลและเตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่ 98.7 K ในขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสารมีอุณหภูมิวิกฤตค่อนข้างคงที่ ผลจาก XRD พบว่าการเจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลักของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบออร์โทโรมบิก จึงสรุปได้ว่าโมเลกุลของแมงกานีสออกไซด์แทรกลงในช่องว่างระหว่างเกรนทำให้ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

คำสำคัญ : ตัวนำยวดยิ่ง, แมงกานีสออกไซด์, เครื่องบดบอลมิลล์, โถรงบดสาร



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดจนอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือในการวิจัย ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณ ด้วยความเคารพอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม และอาจารย์ ดร.สุรวุฒิ วิจารณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ แม้เป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพงศ์ เครือหงส์ คุณธัญนพ นิลกำจร คุณสมพร ตียะศรี และคุณวิรัช วงศ์ภักดี ที่ให้ความช่วยเหลือด้านวิธีการและอุปกรณ์ในการทำวิจัย สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณครอบครัวและเพื่อนทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ปรีวัตร คำทา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ .....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง .....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
ความสำคัญของการวิจัย .....	3
ขอบเขตของการวิจัย .....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	5
สมมติฐานในการวิจัย .....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
1. ความหมายและสมบัติของตัวนำวดยิ่ง .....	6
1.1 ความหมายของตัวนำวดยิ่ง .....	6
1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำวดยิ่ง .....	7
1.3 สมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำวดยิ่ง .....	8
2. การค้นพบและพัฒนาการของตัวนำวดยิ่ง.....	10
2.1 การค้นพบตัวนำวดยิ่งแบบดั้งเดิม .....	10



2.2 การค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง.....	11
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่ง .....	12
3.1 ทฤษฎีลอนดอน (The London Theory).....	12
3.2 ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว .....	13
3.3 ทฤษฎีบีซีเอส BCS.....	13
4. ความสำคัญและการประยุกต์ใช้ตัวนำยวดยิ่ง .....	14
5. การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง .....	16
5.1 การแคลซิเนชัน (Calcination).....	17
5.2 การซินเตอร์ริง (Sintering) .....	17
5.3 การอบอ่อน (Annealing).....	17
6. การบัดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	17
7. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง.....	22
7.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) .....	22
7.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX) .....	23
7.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว.....	23
7.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD).....	27
7.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนของ $\text{Cu}^{3+}$ ต่อ $\text{Cu}^{2+}$ ด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน.....	28
8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	30
8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่ง Y134.....	30
8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจือโลหะออกไซด์ในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง.....	31

8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบัดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
1. การวิเคราะห์สมการเคมีการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 .....	33
2. สารตั้งต้นที่ใช้ .....	35
3. การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างชนิด Y134.....	37
3.1 การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง Y 134 เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมโดย ใช้โถรงบดสาร .....	37
3.2 การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง Y 134 เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมโดย ใช้เครื่องบดบอลมิลล์ .....	39
4. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างชนิด Y134 .....	42
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	43
1. การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร .....	44
1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร..	44
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	45
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	46
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	50
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	51
1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร.....	52
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	53
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	54
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	58
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	59

1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมล ต่อตัวนำวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	60
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	61
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	62
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	66
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	67
1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมล ต่อตัวนำวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	68
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	69
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	70
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	74
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	75
2. การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	76
2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอล มิลล์.....	76
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	77
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	78
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	82
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	83
2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมล ต่อตัวนำวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	84
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	85
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	86
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	90

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	91
2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	92
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	93
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	94
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	98
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	99
2.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	100
ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM.....	101
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX .....	102
ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว .....	106
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD .....	107
3. การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง .....	108
3.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	108
3.2 ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง .....	109
3.3 อุณหภูมิวิกฤตและสภาพต้านทานของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง .....	111
3.4 โครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง .....	114
3.4 อัตราส่วนของ $Cu^{3+}$ ต่อ $Cu^{2+}$ ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	115
4. ผลของการเจือ $Mn_3O_4$ และวิธีการบดต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 .....	117
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	121
สรุปผลการวิจัย.....	122
อภิปรายผล .....	123
ข้อเสนอแนะ .....	124

บรรณานุกรม ..... 125

ประวัติผู้เขียน..... 128



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ปริมาณการเจือแมงกานีสออกไซด์.....	35
ตาราง 2 รายละเอียดสารตั้งต้น.....	35
ตาราง 3 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	44
ตาราง 4 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	46
ตาราง 5 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย โกร่งบดสาร.....	48
ตาราง 6 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย โกร่งบดสาร.....	49
ตาราง 7 แสดงคุณสมบัติวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	50
ตาราง 8 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	52
ตาราง 9 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	54
ตาราง 10 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	56
ตาราง 11 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	57
ตาราง 12 แสดงคุณสมบัติวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	58
ตาราง 13 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	60
ตาราง 14 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....	62

ตาราง 15 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	64
ตาราง 16 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	65
ตาราง 17 แสดงคุณสมบัติวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	66
ตาราง 18 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	68
ตาราง 19 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	70
ตาราง 20 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	72
ตาราง 21 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	73
ตาราง 22 แสดงคุณสมบัติวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....	74
ตาราง 23 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	76
ตาราง 24 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	78
ตาราง 25 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	80
ตาราง 26 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	81
ตาราง 27 แสดงคุณสมบัติวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	82
ตาราง 28 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	84





ตาราง 42 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำ ยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	106
ตาราง 43 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	108
ตาราง 44 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	109
ตาราง 45 แสดงผลต่างอัตราส่วนอะตอมของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมได้เทียบกับสมการเคมี.....	110
ตาราง 46 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง .....	112
ตาราง 47 แสดงอัตราส่วนของ $Cu^{3+}$ ต่อ $Cu^{2+}$ จากวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน.....	115
ตาราง 48 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนและเปอร์เซ็นต์ฟรอนต์ออกซิเจน.....	116



## สารบัญรูปภาพ

### หน้า

ภาพประกอบ 1 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท .....	1
ภาพประกอบ 2 การเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ .....	8
ภาพประกอบ 3 วงแหวนตัวนำยิ่งยวดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต .....	9
ภาพประกอบ 4 วงแหวนตัวนำยิ่งยวดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต .....	9
ภาพประกอบ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ .....	11
ภาพประกอบ 6 อันตรกิริยาดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนโดยอาศัยคลื่นแลตทิซที่เรียกว่าโฟนอน.....	14
ภาพประกอบ 7 อันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนของการเกิดสภาพนำยิ่งยวด .....	14
ภาพประกอบ 8 รถไฟฟ้าความเร็วสูงรุ่น MLX01รถทดสอบ .....	15
ภาพประกอบ 9 ภาพกะโหลกศีรษะมนุษย์ที่ถ่ายไว้โดย MRI .....	16
ภาพประกอบ 10 ระดับลูกบดที่เหมาะสมในหม้ออบบอิลมิลล์ .....	19
ภาพประกอบ 11 การเคลื่อนตัวของลูกบดในความเร็วรอบที่ต่างกัน .....	20
ภาพประกอบ 12 การทำงานของเครื่อง SEM .....	22
ภาพประกอบ 13 การทำงานของเครื่อง EDX.....	23
ภาพประกอบ 14 ตำแหน่งขั้วในการวัดความต้านทานไฟฟ้าแต่ละครั้งตามวิธีแวน เดอร์ พาว.....	24
ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q และ f.....	25
ภาพประกอบ 16 ชุดวัดความต้านทานแบบ 4 ขั้วตามวิธีแวน เดอร์ พาว.....	26
ภาพประกอบ 17 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึก.....	27
ภาพประกอบ 18 แสดงสารตั้งต้น อิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) และแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ตามลำดับจากซ้ายไปขวา.....	37
ภาพประกอบ 19 แผนภาพแสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 1,2 โดยวิธี กระบวนการเผาแบบผง .....	38
ภาพประกอบ 20 แสดงการเผาซินเตอร์ริงและการอบอ่อน.....	39

ภาพประกอบ 21 ผังงานกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งชนิด Y134..... 41

ภาพประกอบ 22 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ..... 44

ภาพประกอบ 23 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ..... 45

ภาพประกอบ 24 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ..... 45

ภาพประกอบ 25 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย  
โกร่งบดสาร ..... 46

ภาพประกอบ 26 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย  
โกร่งบดสาร ..... 47

ภาพประกอบ 27 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย  
โกร่งบดสาร ..... 47

ภาพประกอบ 28 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย  
โกร่งบดสาร ..... 47

ภาพประกอบ 29 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย  
โกร่งบดสาร ..... 48

ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้า ของตัวนำ  
ยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ..... 50

ภาพประกอบ 31 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร..... 51

ภาพประกอบ 32 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่  
เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ..... 52

ภาพประกอบ 33 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1  
โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร..... 53

ภาพประกอบ 34 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อ  
ตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ..... 53

ภาพประกอบ 35 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$   
0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร..... 54

ภาพประกอบ 36 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....55

ภาพประกอบ 37 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....55

ภาพประกอบ 38 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....55

ภาพประกอบ 39 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....56

ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....58

ภาพประกอบ 41 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....59

ภาพประกอบ 42 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....60

ภาพประกอบ 43 ผิวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....61

ภาพประกอบ 44 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....61

ภาพประกอบ 45 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....62

ภาพประกอบ 46 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....63

ภาพประกอบ 47 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....63

ภาพประกอบ 48 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....63

ภาพประกอบ 49 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....64

ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....66

ภาพประกอบ 51 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....67

ภาพประกอบ 52 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....68

ภาพประกอบ 53 ผิวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....69

ภาพประกอบ 54 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .....69

ภาพประกอบ 55 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....70

ภาพประกอบ 56 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....71

ภาพประกอบ 57 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....71

ภาพประกอบ 58 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....71

ภาพประกอบ 59 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร.....72

ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร .... 74

ภาพประกอบ 61 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ..... 75

ภาพประกอบ 62 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 76

ภาพประกอบ 63 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 77

ภาพประกอบ 64 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์... 77

ภาพประกอบ 65 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 78

ภาพประกอบ 66 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 79

ภาพประกอบ 67 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 79

ภาพประกอบ 68 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 79

ภาพประกอบ 69 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 80

ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้า ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 82

ภาพประกอบ 71 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์..... 83

ภาพประกอบ 72 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 84

ภาพประกอบ 73 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 85

ภาพประกอบ 74 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ..... 85







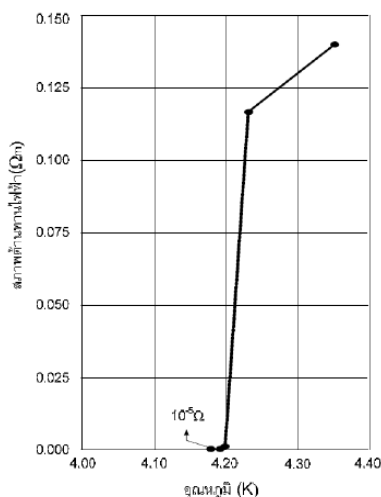
ภาพประกอบ 99 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	104
ภาพประกอบ 100 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	106
ภาพประกอบ 101 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ .....	107
ภาพประกอบ 102 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานกับอุณหภูมิ ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	111
ภาพประกอบ 103 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานกับอุณหภูมิ ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร .....	113
ภาพประกอบ 104 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานกับอุณหภูมิ ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	113
ภาพประกอบ 105 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	114
ภาพประกอบ 106 แสดงขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร.....	117
ภาพประกอบ 107 แสดงขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์... ..	117
ภาพประกอบ 108 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120 เคลวิน ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	118
ภาพประกอบ 109 แสดงผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตออฟเซต-ออนเซต ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง.....	119
ภาพประกอบ 110 แสดงอุณหภูมิวิกฤตออนเซตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร.....	120
ภาพประกอบ 111 แสดงอุณหภูมิวิกฤตออนเซตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์.....	120

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ภูมิหลัง

ในปี ค.ศ.1908 คาเมอริงค์ ออนเนส (พงษ์แก้ว, 2559, pp. 3-20) สามารถสร้างระบบที่มีอุณหภูมิต่ำได้โดยใช้ฮีเลียมเหลว ทำให้มีการศึกษาสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิเข้าใกล้ศูนย์เคลวิน จนถึงปี ค.ศ.1911 ออนเนสได้ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์พบว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 4.2 เคลวิน ความต้านทานไฟฟ้าของปรอทลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าเป็นศูนย์ ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท

ที่มา: จูดีพงศ์ เครือหงส์. (2556). หนึ่งศตวรรษของตัวนำยิ่งยวด. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 23, ฉบับที่ 2 (พ.ค.-ส.ค. 2556), หน้า 525-542.

ปรากฏการณ์ที่ความต้านทานไฟฟ้าลดลงเข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วดังกล่าวถูกเรียกว่า “สภาพนำยิ่งยวด” (Superconductivity) และวัสดุที่มีความต้านทานเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) ถูกเรียกว่า “ตัวนำยิ่งยวด” (Superconductor)

ตัวนำยิ่งยวดนี้มีสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต จึงเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและปรากฏการณ์ไมเนอร์ ซึ่งเป็นกรณีที่ตัวนำยิ่งยวดแสดงสมบัติการเป็นแม่เหล็ก

ไดอะที่สมบูรณ์ (Perfect Diamagnet) เมื่อวางไว้ในสนามแม่เหล็กภายนอก เป็นผลให้เส้นแรงแม่เหล็กถูกผลักออกจากตัวนำยวดยิ่งเกิดเป็นการยกตัวที่เรียกว่า “การยกตัวด้วยแม่เหล็ก” (Magnetic levitation) จากสมบัติพิเศษดังกล่าวทำให้ตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุที่ถูกพยายามนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงในอุปกรณ์ต่าง ๆ หรือแม้แต่รถไฟความเร็วสูงที่อาศัยการยกตัวด้วยแม่เหล็กในการลดแรงเสียดทานขณะเคลื่อนที่

ถึงแม้ว่าจะมีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (พงษ์แก้ว, 2559, pp. 75-86) ซึ่งมีความสูงเกินกว่า 35 เคลวิน ในกลุ่มสารที่มีโครงสร้างแบบเพอร์โรฟสไกต์ (Perovskites) ตั้งแต่ปี ค.ศ.1986 เป็นต้นมา แต่ก็ยังถือว่ามีอุณหภูมิวิกฤตที่ต่ำทำให้ยากต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีต่าง ๆ จึงมีความพยายามศึกษาพัฒนาตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง

สารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม YBaCuO ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ธาตุอิตเทรียม แบเรียม คอปเปอร์และออกซิเจน เป็นสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่มหนึ่งที่มีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจศึกษาสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 เป็นตัวนำยวดยิ่งชนิดหนึ่งในกลุ่มนี้ โดยมีอัตราส่วนโดยอะตอมของ Y:Ba:Cu เป็น 1:3:4 และมีอุณหภูมิวิกฤตเฉลี่ย (Chainok et al., 2014, pp. 220-223) อยู่ที่ 92.5 เคลวิน

การเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y134 แบบก้อน สามารถเตรียมได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพ คือ การเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีดังกล่าวในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง นอกจากนี้ในการพัฒนาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งมีหลายวิธีเช่นกัน ทั้งการปรับอุณหภูมิกระบวนการเผา การปรับอัตราส่วนของสารตั้งต้น การกำหนดอัตราส่วนการไหลของออกซิเจนขณะทำการเผา และหนึ่งในวิธีที่นิยมศึกษาคือการเจือด้วยธาตุและสารประกอบต่าง ๆ จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Salama, El-Hofy, Rammah, & Elkhatib, 2016) พบว่า มีการเจือตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y ด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) แล้วทำให้ตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาผลของการเจือแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวยังใช้สารเจือที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กในระดับนาโนเพราะสามารถแทรกกระหว่างเกรนของตัวนำยวดยิ่งได้ดี สอดคล้องกับการศึกษาผลของเครื่องบดบอลมิลล์ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง Y134 (Nilkamjon et al., 2017, pp. 67-69) ที่แสดงให้เห็นว่าการบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียกทำให้ได้สารที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็ก ผู้วิจัยจึงต้องการเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ระหว่างตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ความเข้มข้นต่าง ๆ และใช้วิธีการบด 2 แบบ คือ การบดด้วยโถรงบดสารแบบดั้งเดิมและการบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียก โดยสนใจ

ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ปริมาณธาตุ ออกซิเจนของตัวนำยวดยิ่ง โครงสร้างผลึกของสารและอัตราส่วนของ  $\text{Cu}^{3+}$  ต่อ  $\text{Cu}^{2+}$

### ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ที่เตรียมโดยใช้โถงบดสารและเครื่องบดบอลมิลล์
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ที่ความเข้มข้นขนาดต่าง ๆ

### ความสำคัญของการวิจัย

ได้ทราบกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{Mn}_2\text{O}_4$ ) ด้วยปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง และทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมขึ้น เป็นแนวทางให้ผู้สนใจศึกษาการเตรียมตัวนำยวดยิ่งด้วยปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง

### ขอบเขตของการวิจัย

#### เป้าหมายในการวิจัย

เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y134 และตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ความเข้มข้น 0.005 0.010 และ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล และวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมขึ้นด้วย

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- เครื่องสเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDX)
- ชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว
- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
- วิถีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

ดังนั้น ทำให้ทราบ

1. กระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์
2. สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ที่เตรียมโดยใช้โถงบดสารและเครื่องบดบอลมิลล์

3. สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ที่ความเข้มข้นขนาดต่าง ๆ

#### สถานที่ทำวิจัย

หน่วยวิจัยฟิสิกส์ประสานมิตร

ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร

#### ระยะเวลาในการทำวิจัย

1 ปีการศึกษา (ปีการศึกษา 2562)

#### ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรอิสระ แบ่งเป็นดังนี้

1.1 วิธีการอบ

1.1.1 การอบด้วยโถงอบสาร

1.1.2 การอบด้วยเครื่องอบบอลมิลล์

1.2 ขนาดความเข้มข้นของการเจือ  $Mn_3O_4$  ในสารตัวนำยวดยิ่ง Y134

1.2.1 ไม่เจือแมงกานีสออกไซด์

1.2.2 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมลเจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.005 โมล

1.2.3 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมลเจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.010 โมล

1.2.4 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมลเจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.015 โมล

2. ตัวแปรตาม ได้แก่ สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ประกอบด้วย

- ลักษณะพื้นผิว - ปริมาณธาตุ
- อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง - โครงสร้างผลึกของสาร
- อัตราส่วนของ  $Cu^{3+}$  ต่อ  $Cu^{2+}$

#### นิยามศัพท์เฉพาะ

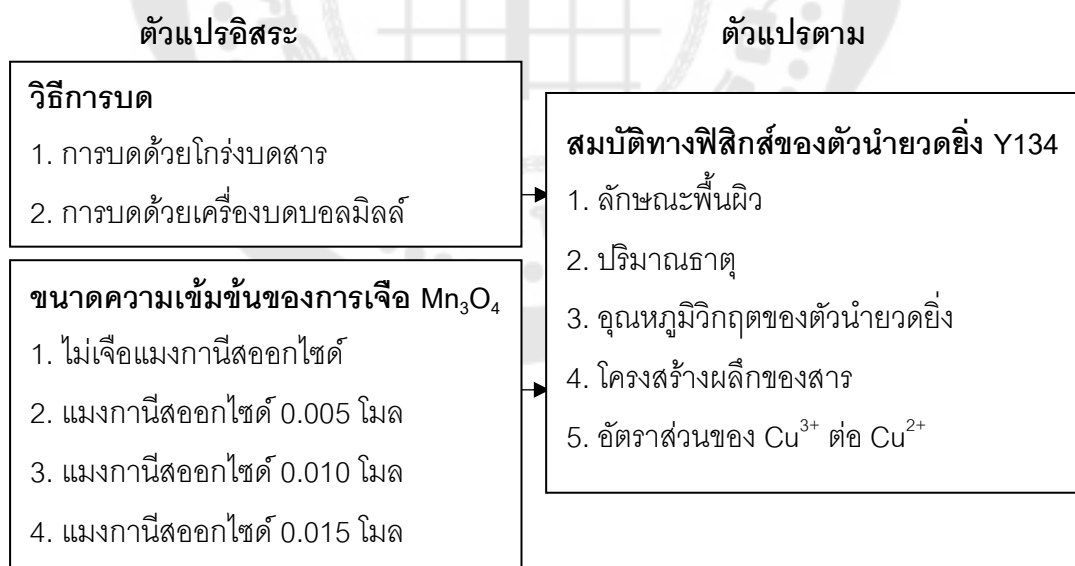
ตัวนำยวดยิ่ง Y134 หมายถึง ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม  $YBaCuO$  ที่มีสูตรทางเคมีเป็น  $YBa_3Cu_4O_{7-x}$  มีสารตั้งต้น ประกอบด้วย อิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) เตรียมด้วยกระบวนการปฏิบัติการสถานะของของแข็ง

วิธีการอบผสมด้วยโถงอบสาร หมายถึง กระบวนการอบสารตัวนำยวดยิ่งชนิดผงด้วยโถงอบสารอุณหภูมิงานละเอียด ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร ก่อนอัดขึ้นรูปและเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริง

วิธีการบดผสมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ หมายถึง กระบวนการบดสารตัวนำยวดยิ่งชนิดผง ด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ ชนิดลูกบดอลูมินา แบบเปียก โดยใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) เป็นตัวทำละลาย บดเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำมาให้ความร้อนจนเอทิลแอลกอฮอล์ระเหยจนหมดแล้วจึงร้อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร ก่อนอัดขึ้นรูปและเข้าสู่อุณหภูมิการซินเตอร์ริง

### กรอบแนวคิดในงานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่า ในการศึกษาพัฒนาตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO มีการเจือด้วยสารหลากหลายชนิด (Salama et al., 2016) ผลปรากฏว่าการเจือด้วยสารประกอบแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ชนิดผง ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ลงในสารตัวนำยวดยิ่ง Y123 สามารถทำให้สารตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาผลของการเจือแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่ความเข้มข้นขนาดต่าง ๆ ประกอบกับการเตรียมโดยใช้โถ้งบดสารและเครื่องบดบอลมิลล์ ซึ่งส่งผลต่อขนาดอนุภาคของสาร ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม YBaCuO เช่นเดียวกัน การวิจัยสามารถเขียนเป็นกรอบแนวคิดในงานวิจัยได้ดังนี้



### สมมติฐานในการวิจัย

1. วิธีการบดส่งผลให้สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 มีความแตกต่างกัน
2. ขนาดความเข้มข้นของการเจือ  $Mn_3O_4$  ในสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 ส่งผลให้สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 มีความแตกต่างกัน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลของการเจือเมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง Y134 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเอกสาร แนวคิด ทฤษฎี ตลอดจนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นกรอบในการศึกษาดังนี้

1. ความหมายและสมบัติของตัวนำยวดยิ่ง
2. การค้นพบและพัฒนาการของตัวนำยวดยิ่ง
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่ง
4. ความสำคัญและการประยุกต์ใช้ตัวนำยวดยิ่ง
5. การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
6. การวัดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียก
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. ความหมายและสมบัติของตัวนำยวดยิ่ง

##### 1.1 ความหมายของตัวนำยวดยิ่ง

ตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีผู้ให้ความหมายไว้หลายท่าน ได้แก่

จอห์น บาร์ดีน ลีออน นีล คูเปอร์ และจอห์น รอเบิร์ต ชริฟเฟอร์ (Bardeen, Cooper, & Schrieffer, 2002, pp. 1-2) ให้ความหมายของวัสดุตัวนำยวดยิ่งไว้ว่า เป็นวัสดุที่มีสภาพนำยวดยิ่งซึ่งเป็นผลเชิงควอนตัมที่แสดงผลในระดับมหภาค โดยความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริ (2559, p. 7) ได้ให้ความหมายของตัวนำยวดยิ่งไว้ว่า ตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุที่เมื่อลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหนึ่งที่ไม่เท่ากับศูนย์เคลวิน ความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด

คาร์สเทิน ทิม (Timm, 2012, p. 5) ได้ให้ความหมายของตัวนำยวดยิ่งไว้ว่าเป็นวัสดุที่แสดงสภาพนำยวดยิ่งคือไร้สภาพนำไฟฟ้าและผลึกเส้นสนามแม่เหล็กออกจากเนื้อวัสดุ

โดยสรุป ตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุเชิงควอนตัมที่แสดงสมบัติสภาพนำยวดยิ่งคือมีสภาพนำไฟฟ้าเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตค่าหนึ่งและมีสมบัติทางแม่เหล็กโดยไม่ยอมให้เส้นสนามแม่เหล็กพุ่งผ่านเนื้อวัสดุ

## 1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง

ในปี ค.ศ. 1908 (Vanderah, 1992) คาร์เมอริงเงอ ออนเนส (Kamerling Onnes) นักวิทยาศาสตร์ชาวเนเธอร์แลนด์ สามารถสังเคราะห์ฮีเลียมเหลวได้ ทำให้มีการศึกษาในระบบที่มีอุณหภูมิใกล้ศูนย์เคลวินมากขึ้น

ในปี ค.ศ. 1911 ออนเนส สนใจศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์เมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ศูนย์เคลวิน โดยการใส่ลงในไนโตรเจนเหลว พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 4.2 เคลวิน จึงถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ปรอทเปลี่ยนจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่ง จึงเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature,  $T_c$ ) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ปรอทไร้สภาพต้านทานไฟฟ้า ต่อจากนั้นมาจึงมีความสนใจทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะชนิดต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น ตะกั่ว (Pb) ดีบุก (Sn) ไนโอเบียม (Nb) โดยโลหะที่ทดลองเพิ่มเติมเหล่านี้ มีค่าอุณหภูมิวิกฤต เท่ากับ 3.69 7.26 และ 9.2 เคลวิน ตามลำดับ

การค้นพบตัวนำยวดยิ่งยุคแรกมีค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารค่อนข้างต่ำ โดยมักจะไม่เกิน 10 เคลวิน จึงเรียกตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ว่าตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductors) หรือตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional Superconductors)

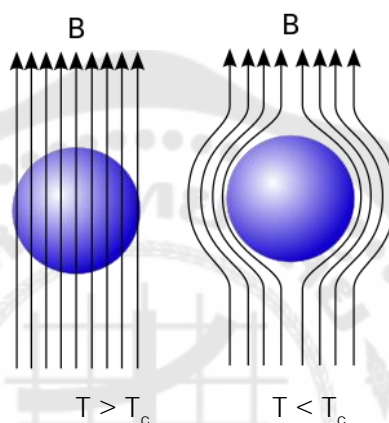
เมื่อตัวนำยวดยิ่งไร้สภาพต้านทานไฟฟ้า จะทำให้เมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่เข้าไปในตัวนำยวดยิ่งจะไม่มีกระแสสูญเสียดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไฟฟ้ายั่งยืน (Persistent Current) หรือกระแสไฟฟ้ายวดยิ่ง (Supercurrent)

จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้า พบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบวงแหวนของตัวนำยวดยิ่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำตนเอง ( $L$ ) เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากมีความต้านทานไฟฟ้าจะได้ค่าคงที่เวลา (Time Constant) มีสมการเป็น  $\tau = \frac{L}{R}$  และพบว่า ค่ากระแสนี้มีระยะเวลาประมาณ 100,000 ปี เมื่อนำมาหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่น้อยมากซึ่งเท่ากับ  $10^{-26} \Omega \cdot m$  ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้านี้มีค่าน้อยกว่าสถานะปกติ มากกว่า  $10^{18}$  เท่า ซึ่งปกติแล้วสภาพต้านทานไฟฟ้าของทองแดงถือว่าเป็นโลหะนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดชนิดหนึ่ง ณ อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ  $10^{-8} \Omega \cdot m$  ดังนั้นจึงถือเป็นข้อพิสูจน์ได้อย่างสมเหตุสมผลว่ามีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์จริงในตัวนำยวดยิ่ง นอกจากนี้กระแสนั่งยืนจะมีอยู่ได้เมื่อค่าของกระแสมีค่าที่ต่ำกว่าค่ากระแสค่าหนึ่งเท่านั้นและถ้ากระแสที่ไหลผ่านมีค่าสูงกว่าค่านี้แล้วจะทำให้สภาพนำยวดยิ่งถูกทำลายกลายเป็นตัวนำปกติได้ทันที เรียกกระแสที่ทำลายสภาพนำยวดยิ่งนี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical Current,  $J_c$ ) ค่ากระแสนี้มีค่าไม่เท่ากันขึ้นกับตัวนำยวดยิ่งแต่ละชนิด



### 1.3 สมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง

ในปี ค.ศ. 1933 ไมส์เนอร์และโอเซนฟีลด์ (Meissner & Ochsenfeld, 1933, pp. 787-788) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ทำการทดลองและพบว่าเมื่อตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต แล้วให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับตัวนำยวดยิ่งนี้ ตัวนำยวดยิ่งจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อได้เลยและยังผลักสนามแม่เหล็กออกอีกด้วย จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์และโอเซนฟีลด์ ต่อมาเรียกสั้น ๆ ว่าปรากฏการณ์ไมส์เนอร์



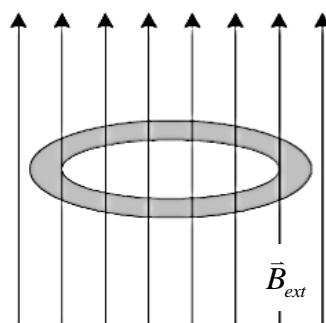
ภาพประกอบ 2 การเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ที่มา: Piotr Jaworski. (2005). File:EfektMeisnera.svg. สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม 2559. จาก: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EfektMeisnera.svg>

ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์เป็นปรากฏการณ์ที่นิยมใช้ในการทดสอบว่าสารมีสภาพนำยวดยิ่งซึ่งเกิดขึ้น จากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปในขณะที่สารมีสภาพนำยวดยิ่ง สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผิวของตัวนำยวดยิ่งและกระแสไฟฟ้างดล่าวจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไปจึงทำให้สนามแม่เหล็กภายในของสารนั้นมีค่าเป็นศูนย์

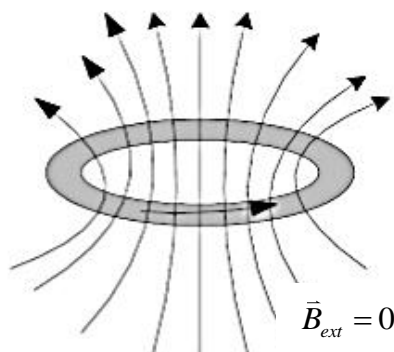
จากปรากฏการณ์ข้างต้นจึงจัดว่าตัวนำยวดยิ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอะแบบสมบูรณ์ (Perfect Diamagnetic) การค้นหาสมบัติยังคงมีอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1955 เดเวอร์และแฟร์แบงก์ (Deaver & Fairbank, 1961, pp. 43-46) ได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่งอีกประการหนึ่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟลักซ์แม่เหล็กแบบ ควอนไทด์เซชัน (Flux Quantization) โดยการนำตัวนำยว

ยิ่งมาทำเป็นรูปวงแหวนและให้สนามแม่เหล็กเข้าไป ตัวนำขดยิ่งมีคุณสมบัติสูงกว่าคุณสมบัติขดขนาบแม่เหล็กจะสามารถพุ่งผ่านตัวนำขดยิ่งได้และถ้าลดคุณสมบัติของวงแหวนให้ต่ำกว่าคุณสมบัติขดขนาบแล้วให้สนามแม่เหล็กเข้าไปอีกครั้ง สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลวนในวงแหวนและจะสร้างสนามแม่เหล็กพุ่งผ่านตรงช่องว่างของวงแหวน



ภาพประกอบ 3 วงแหวนตัวนำขดยิ่งเมื่อคุณสมบัติสูงกว่าคุณสมบัติขดขนาบ

ที่มา: ลีตีพงศ์ เครือหงส์. (2556, พฤษภาคม). หนึ่งศตวรรษของตัวนำขดยิ่ง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(2): 529.



ภาพประกอบ 4 วงแหวนตัวนำขดยิ่งเมื่อคุณสมบัติต่ำกว่าคุณสมบัติขดขนาบ

ที่มา: ลีตีพงศ์ เครือหงส์. (2556, พฤษภาคม). หนึ่งศตวรรษของตัวนำขดยิ่ง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(2): 529.

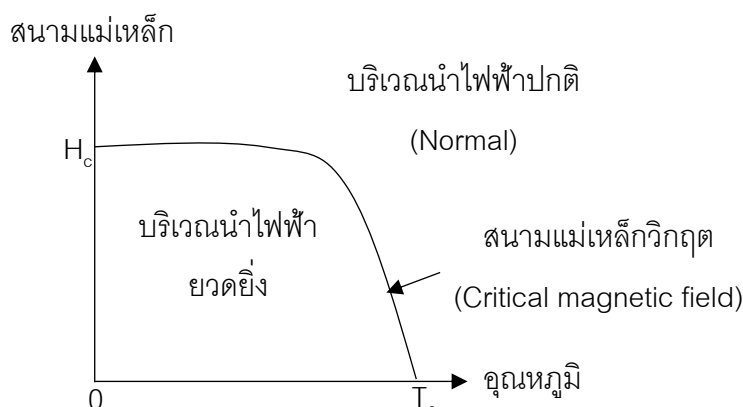
## 2. การค้นพบและพัฒนาการของตัวนำยวดยิ่ง

### 2.1 การค้นพบตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม

ในปี ค.ศ. 1911 นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ คาร์เมอริงค์ ออนเนส (Buckel, 1991, p. 3) เขาได้นำปรอทไปทำการทดลองเพื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งออนเนสคิดว่าปรอทเป็นโลหะที่มีความบริสุทธิ์สูงสุดในขณะนั้นและความต้านทานจะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ที่จุดเดือดของฮีเลียมเหลวซึ่งจะพบตำแหน่งที่มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ได้ แต่ผลการทดลองพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์ลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงและเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 4.2 เคลวิน ความต้านทานไฟฟ้าของปรอทจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่การทดลองไม่ได้มีการลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ตามที่คาดไว้เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า  $10^{-6}$  เท่าของความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวินและต่อมาออนเนส พบว่า การเกิดความต้านทานเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดนั้นสามารถเกิดกับโลหะหลายชนิดโดยไม่ขึ้นกับความบริสุทธิ์ของสาร จึงเรียกปรากฏการณ์ที่สารไร้ความต้านทานนี้ว่า “สภาพนำยวดยิ่ง” (Superconductivity) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งว่า “อุณหภูมิวิกฤติ” (Critical Temperature,  $T_c$ )

ในปี ค.ศ. 1913 ออนเนสได้ทำการทดลองซึ่งพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำยวดยิ่งได้ ถ้าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าต่ำกว่าค่า ๆ หนึ่ง และเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าสูงกว่าค่านี้อันแล้ว วัสดุจะกลายเป็นตัวนำปกติ เรียกความหนาแน่นกระแสนั้นว่า “ความหนาแน่นกระแสวิกฤติ” (Critical Current Density,  $J_c$ ) ซึ่งปริมาณความหนาแน่นกระแสวิกฤตินี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยความหนาแน่นกระแสวิกฤติจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

ในปี ค.ศ. 1914 ออนเนส พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้ เช่นเดียวกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวิกฤติ เรียกสนามแม่เหล็กนี้ว่า “สนามแม่เหล็กวิกฤติ” (Critical Magnetic Field,  $H_c$ ) นั่นคือถ้าสนามแม่เหล็กมีความเข้มมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤติแล้วตัวนำยวดยิ่งจะกลายเป็นตัวนำปกติ ผลที่ได้จากการทดลองสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤติกับอุณหภูมิได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ

ในปี ค.ศ. 1916 ซิลส์บี (Silsbee) ศึกษาสภาพนำยวดยิ่ง (Sacchetti, 2000, pp. 2617-2627) ในลวดตัวนำยวดยิ่งกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและได้อธิบายว่า “กระแสวิกฤตเหนี่ยวนำคือปัจจัยที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ผิวของลวด” ดังนั้น ปัจจัยที่ทำลายสภาพนำยวดยิ่งคือ อุณหภูมิ ความหนาแน่นกระแส และสนามแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 1933 ไมส์เนอร์และอชเซนฟีลด์ (Meissner & Ochsenfeld, 1933, pp. 787-788) พบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่ง คือเมื่อทำให้ตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต พบว่าตัวนำยวดยิ่งจะเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่งและหากใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อตัวนำได้เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผิวของตัวนำยวดยิ่งและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นทำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไปเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) แต่ในทางกลับกันถ้าตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ตัวนำยวดยิ่งจะกลายเป็นสภาพเป็นตัวนำปกติ สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อผิวตัวนำยวดยิ่งได้

## 2.2 การค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง

ในปี ค.ศ. 1986 เบททอสและมุลเลอร์ (Muller & Bednorz, 1987, p. 1133) ได้ทำการวิจัยซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวค้นพบสภาพนำยวดยิ่งของสารกลุ่มใหม่ที่มีองค์ประกอบของคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบเรียกว่า คิวเพรท (Cuprate) และเป็นสารตัวแรกที่เป็นสารประกอบของ  $\text{La}_2\text{BaCuO}_4$  ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทเซรามิกคือที่อุณหภูมิห้องสารจะมีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่หากลดอุณหภูมิลงจนต่ำกว่า 30 เคลวิน สารจะเกิดการเปลี่ยนสภาพ

เป็นตัวนำยวดยิ่งได้ การค้นพบของเบททอนสและมุลเลอร์ทำให้กลุ่มนักฟิสิกส์คาดการณ์ว่าจะต้องค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิห้องและการค้นพบของเบททอนสและมุลเลอร์ครั้งนี้ทำให้กลุ่มนักฟิสิกส์มีความเข้าใจในแนวเดียวกันว่าตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตไม่เกิน 35 เคลวิน เป็นตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional Superconductors) และเรียกตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 35 เคลวินว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductors)

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1911 ซึ่งเป็นปีของการค้นพบเป็นต้นมา การค้นคว้าวิจัยหาตัวนำยวดยิ่งชนิดหนึ่งที่อุณหภูมิวิกฤตสูงนั้นได้พัฒนาไปอย่างเชื่องช้า จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1973 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบโลหะผสมระหว่างไนโอเบียมและเจอร์มาเนียม ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต 23.2 เคลวิน แต่ไม่ประสบความสำเร็จจึงทำให้เชื่อว่าตัวนำยวดยิ่งในธรรมชาติน่าจะมีอุณหภูมิวิกฤตที่จำกัดประมาณ 35 เคลวิน และเรียกตัวนำชนิดนี้ว่า ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductors)

### 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่ง

จากการค้นพบตัวนำยวดยิ่ง นักฟิสิกส์ทฤษฎีจึงได้สร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งซึ่งมีทฤษฎีที่สำคัญ 3 ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีลอนดอน (The London Theory) ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว (The Ginzburg-Landau Theory) และทฤษฎีบีซีเอส (The BCS Theory)

#### 3.1 ทฤษฎีลอนดอน (The London Theory)

ในปี ค.ศ. 1935 พี่น้องตระกูลลอนดอน (Timm, 2012, pp. 23-27) เป็นผู้นำเสนอทฤษฎีที่สามารถอธิบายตัวนำยวดยิ่งโดยสามารถอธิบายปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างชัดเจนและได้นำสมการแมกเวลล์ (Maxwell Equation) มาประยุกต์ในระบบตัวนำยวดยิ่งโดยกำหนดให้การนำไฟฟ้าในตัวนำยวดยิ่งเกิดจากอิเล็กตรอนยวดยิ่ง (Super Electron) ที่มีสมบัติเป็นแบบของไหลอุดมคติ (Ideal Fluid) กล่าวคือ ของไหลที่ไม่มีความหนืดและไม่ถูกอัด โดยลอนดอนได้กำหนดค่าคงตัว  $\lambda_L$  ต่อมาถูกเรียกว่า ความลึกซึมซาบได้ของลอนดอน (London Penetration Depth) ซึ่งค่านี้ก็คือ ระยะที่สนามแม่เหล็กทะลุเข้าไปในเนื้อของ ตัวนำยวดยิ่งและเป็นพารามิเตอร์แบบปรากฏการณ์ (Phenomenological Parameter) ในปัจจุบันได้นำค่า  $\lambda_L$  มาใช้ในทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว และประยุกต์ใช้ในการกำหนดสมบัติและการจำแนกประเภทของตัวนำยวดยิ่งให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

### 3.2 ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว

เนื่องจากทฤษฎีของลอนดอนยังคงเป็นทฤษฎี อย่างกว้างๆ ซึ่งต่อมากินซ์เบิร์กและแลนดาว (Tesanovic, 1999, pp. 6449-6474) ได้นำแนวคิดของลอนดอนมาประยุกต์ โดยกำหนดให้ระบบของตัวนำยวดยิ่งมีตัวแปรของความเป็นระเบียบ เพื่อใช้ในการอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กและเป็นทฤษฎีแบบมหภาค (Macroscopic Theory) จึงได้ละเว้นการพิจารณาอันตรกิริยาของอิเล็กตรอน แต่จะดูผลของปรากฏการณ์ที่เกิดแบบกว้างๆ ซึ่งจากทฤษฎีนี้สามารถแบ่งตัวนำยวดยิ่งออกเป็นสองประเภทและใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวอาพันธ์ (Coherence Length :  $\xi$ ) และความลึกซาบซึมได้ของลอนดอน  $\lambda_L$  โดยพวกเขาได้กำหนด พารามิเตอร์  $\kappa$  ขึ้นมา ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวอาพันธ์และความลึกซาบซึมได้ของลอนดอน สามารถเขียนเป็นอัตราส่วนได้เป็น  $\kappa = \frac{\lambda}{\xi}$  จากสมการนี้สามารถแบ่งชนิดของตัวนำยวดยิ่งโดยค่า  $\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}}$  เป็นตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 1 และ  $\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}$  เป็นตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ 2

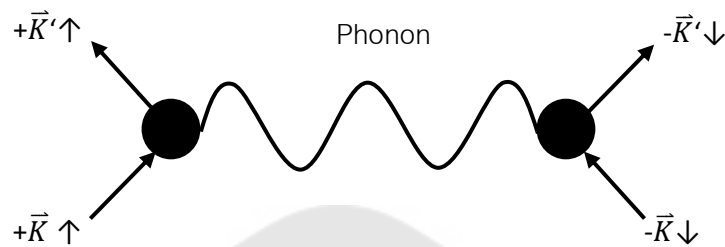
### 3.3 ทฤษฎีบีซีเอส BCS

ทฤษฎีบีซีเอส BCS เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายกลไกการเกิดและสมบัติต่าง ๆ ของตัวนำยวดยิ่งได้ดีที่สุดจนกระทั่งในปัจจุบันแม้ว่าในปัจจุบันมีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่ไม่สามารถใช้ทฤษฎี BCS อธิบายได้แต่ก็ยังไม่มียุทธวิธีหรือแบบจำลองอะไรที่ได้รับการยอมรับมากกว่าทฤษฎี BCS

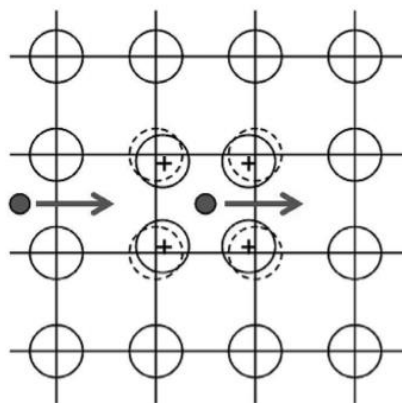
ทฤษฎี BCS เสนอโดยจอห์น บาร์ดีน (John Bardeen), ลีออน นีล คูเปอร์ (Leon Neil Cooper) และจอห์น รอเบิร์ต ชริฟเฟอร์ (John Robert Schrieffer) ในปี ค.ศ.1957 (Bardeen et al., 2002, pp. 3-11) ว่าการเกิดสภาพนำยวดยิ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนสองตัวดึงดูดกันภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม โดยอันตรกิริยาแบบดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนสองตัวภายใต้ตัวนำยวดยิ่งนี้อาศัยโฟนอนเป็นสื่อกลางในการจับคู่ ทั้งนี้อิเล็กตรอนที่จะสามารถจับคู่กันได้จะต้องมีโมเมนตัมและมีสปินตรงกันข้าม และมีพลังงานอยู่ในบริเวณผิวเฟอร์มิ ( $E_F$ )

อันตรกิริยาทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไประหว่างกลุ่มไอออนที่มีประจุบวก และอิเล็กตรอนตัวนี้จะดึงดูดไอออนบวกในบริเวณรอบ ๆ ให้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ ทำให้บริเวณรอบอิเล็กตรอนนี้มีความหนาแน่นของไอออนบวกเพิ่มขึ้น ทำให้มีผลกระทบต่ออิเล็กตรอนอีกตัวที่อยู่ใกล้บริเวณนั้น โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกกลุ่มไอออนบวกดึงดูดให้เข้ามาใกล้ ทำให้ดูเหมือนอิเล็กตรอนตัวแรกดึงดูดอิเล็กตรอนตัวถัดมา จึงเสมือนว่าอิเล็กตรอนมีแรงดึงดูดระหว่างกันเกิดขึ้น จากการจับคู่ของอิเล็กตรอนทั้งสองด้วยอันตรกิริยาดึงดูด แต่ทั้งนี้อันตรกิริยาแบบดึงดูดมีค่าสูงกว่าอันตรกิริยาผลักแบบคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนที่มาจับคู่กันในบริเวณ

ใกล้ผิวเฟอร์มิ (Fermi Surface) เรียกอิเล็กตรอนที่เกิดการจับคู่กันว่า คู่คูเปอร์ (Cooper Pairs) ดังแสดงในภาพประกอบ 6 คู่คูเปอร์นี้จะสามารถเกิดขึ้นได้ต้องประกอบด้วยอิเล็กตรอนสองตัวที่มีขนาดโมเมนตัมเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม และมีสปินตรงกันข้ามกัน



ภาพประกอบ 6 อันตรกิริยาดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนโดยอาศัยคลื่นแลตทิซที่เรียกว่าโฟนอน



ภาพประกอบ 7 อันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนของการเกิดสภาพนำยวดยิ่ง

ที่มา: ลีตีฟงส์ เครือหงส์. (2556, พฤษภาคม). หนึ่งศตวรรษของตัวนำยวดยิ่ง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(2): 536.

#### 4. ความสำคัญและการประยุกต์ใช้ตัวนำยวดยิ่ง

ตัวนำยวดยิ่งได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยมีองค์ประกอบสำคัญของการประยุกต์ใช้งานตัวนำยวดยิ่งก็คือตัวนำยวดยิ่งนั้นจะต้องมีอุณหภูมิที่สูงพอประมาณ รวมถึงต้องมีกระแสไฟฟ้าวิกฤตและสนามแม่เหล็กที่สูงด้วย เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานในส่วน

ใหญ่จะเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อาทิ ด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน ด้านการแพทย์ ด้านการขนส่งและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และในหัวข้อนี้จะขอยกตัวอย่างกรณีศึกษา ดังนี้

#### 4.1 รถไฟฟ้าแม่เหล็กความเร็วสูง (Maglev Trains)

Magnetic Levitation เป็นยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง เช่น รถไฟ สามารถถูกทำให้ลอยตัวอยู่บนสนามแม่เหล็กแรงสูงที่ผลิตจากสารตัวนำยิ่งยวดได้ หมดปัญหาการเสียดสีระหว่างรางและตัวรถลงได้ ในแม่เหล็กธรรมดาไม่เพียงแต่จะสิ้นเปลืองพลังงานไปเนื่องจากความร้อนยังมีขนาดใหญ่กว่าแม่เหล็กที่ทำจากสารตัวนำยิ่งยวดอีกด้วย

Maglev Technology นี้ได้กำเนิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1990 โดยโครงการของรัฐบาลญี่ปุ่น และกระทรวงคมนาคมโดยสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1997 เส้นแรกชื่อว่า Yamanashi Maglev Test Line ดังแสดงในภาพประกอบที่ 8 ซึ่งมีความสามารถเร่งความเร็วได้ถึง 343 ไมล์ต่อชั่วโมง



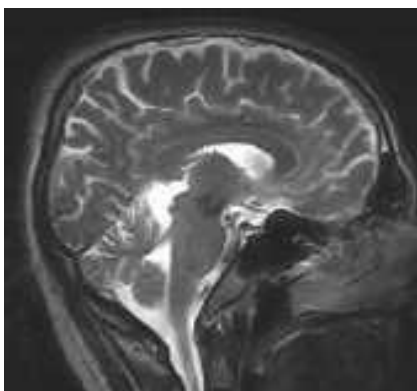
ภาพประกอบ 8 รถไฟฟ้าความเร็วสูงรุ่น MLX01รถทดสอบ

ที่มา: สมพงษ์ เมษานิมิตต์; และ สมคิด รักชาติ. (2559). Superconductor. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2562. จาก: <http://elec.chandra.ac.th>

#### 4.2 เครื่องตรวจเอกซเรย์ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI)

การใช้สารตัวนำยิ่งยวดในด้านการแพทย์แทนการผ่าตัด โดยการใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงที่ผลิตจากสารตัวนำยิ่งยวดผ่านเข้าไปยังร่างกายคนไข้แทนอะตอมของไฮโดรเจนที่มีในน้ำและโมเลกุลของไขมันในร่างกายจะซึมซับพลังงานจากสนามแม่เหล็กและปลดปล่อยคลื่นความถี่ออกมาความถี่หนึ่งดังภาพประกอบที่ 9 ซึ่งสามารถตรวจจับได้และแสดงผลเป็นกราฟด้วยคอมพิวเตอร์





ภาพประกอบ 9 ภาพกะโหลกศีรษะมนุษย์ที่ถ่ายไว้โดย MRI

ที่มา: สมพงษ์ เมฆานิมิตต์; และ สมคิด รักชาติ. (2562). Superconductor. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2562. จาก: <http://elec.chandra.ac.th>

#### 4.3 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กสควิด (SQUID Magnetometers)

SQUID ย่อมาจาก Superconducting Quantum Interference Device เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้เร็วถึงแสนล้านครั้ง ในสนามแม่เหล็กที่อ่อนกว่าสนามแม่เหล็กที่สามารถทำให้เข็มทิศหักเหได้ โดยเทคโนโลยีนี้จะทำให้การตรวจสอบร่างกายมนุษย์ไม่จำเป็นต้องผ่านสนามแม่เหล็กแรงสูงเช่นที่ใช้ในเครื่อง MRI

#### 4.4 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor)

มอเตอร์ใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามหลักการของฟาราเดย์ ดังนั้น มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงก็มีกำลังสูงด้วย แต่อย่างไรก็ดีการใช้ทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่สามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงมากได้ เนื่องจากสูญเสียพลังงานจากความต้านทานของสายไฟ การใช้มอเตอร์ที่ทำจากตัวนำยิ่งยวดจึงจะมีการประหยัดพลังงานได้มากขึ้น

### 5. การเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดชั้นสูงด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

การเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดชั้นเซรามิก ใช้รูปแบบการเตรียมสารลักษณะเดียวกับการเตรียมเซรามิกทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการให้ความร้อนสำคัญ 3 กระบวนการ (พงษ์แก้ว, 2559, pp. 143-148) ได้แก่

- 5.1 การเผาแบบผงหรือการแคลซิเนชัน (Calcination)
- 5.2 การเผาขึ้นรูปหรือการซินเตอร์ริง (Sintering)
- 5.3 การอบอ่อน (Annealing)

### 5.1 การแคลซิเนชัน (Calcination)

เมื่อผสมสารตั้งต้นจนเข้ากันแล้ว จะนำมาผ่านกระบวนการเผาแบบผงหรือการแคลซิเนชันซึ่งเป็นการให้ความร้อนในบรรยากาศปกติเพื่อทำให้สารเกิดการแยกส่วน (Decomposition) เกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase Transition) และทำให้สารบางส่วนที่ไม่ต้องการระเหยออกจากโครงสร้าง การแคลซิเนชันจะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารแต่ต้องมากพอให้เกิดการแยกส่วนหรือการเปลี่ยนเฟส โดยปกติสำหรับการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO มักให้อุณหภูมิที่ 950 °C โดยสารตัวนำยวดยิ่งชนิดผง จะผ่านการแคลซิเนชันสองครั้งเพื่อให้มั่นใจว่าสารส่วนใหญ่เกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

### 5.2 การซินเตอร์ริง (Sintering)

หลังจากสารตัวนำยวดยิ่งชนิดผงผ่านการแคลซิเนชันสองครั้งแล้ว สารตัวนำยวดยิ่งจะถูกนำมาอัดเป็นก้อนและนำไปเผาด้วยกระบวนการซินเตอร์ริง ซึ่งเป็นการให้ความร้อนหรือความดันแก่วัสดุ เพื่อทำให้เกิดความแกร่งมากยิ่งขึ้นโดยที่วัสดุไม่เกิดการหลอม การซินเตอร์ริงนี้จะทำให้อนุภาคเกิดการสร้างพันธะเชื่อมต่อกัน รวมถึงทำให้รูพรุนระหว่างอนุภาคลดลง ในสารตัวนำยวดยิ่งชนิดเซรามิกเมื่อผ่านการซินเตอร์ริงแล้วจะพบว่า เกรนของสารจะอยู่แนบชิดกันมากขึ้นและเนื้อของวัสดุจะมีความแข็งแรงมากขึ้นไม่แตกหักง่าย โดยปกติสารตัวนำยวดยิ่งชนิด YBaCuO จะใช้อุณหภูมิการซินเตอร์ริงอยู่ที่ 950 °C เช่นเดียวกับการแคลซิเนชัน

### 5.3 การอบอ่อน (Annealing)

หลังจากการซินเตอร์ริง อุณหภูมิจะถูกลดลงอย่างช้า ๆ และเข้าสู่กระบวนการอบอ่อนซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุเพื่อกระตุ้นให้เกิดสมบัติทางฟิสิกส์หรือสมบัติทางเคมี การให้ความร้อนจะใช้อุณหภูมิต่ำสำหรับตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO จะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 300 – 500 °C โดยจะทำให้เกิดสมบัติต่าง ๆ เช่น เกิดเกรนมากขึ้น แตกหักยากขึ้น มีผลึกชัดเจน และมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

## 6. การบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

เครื่องบดบอลมิลล์ (Ball Mill) หรืออาจเรียกว่า เครื่องบดแบบลูกบอล (พิมพ์เพ็ญ, 2556) เป็นเครื่องมือลดขนาด (Size Reduction) ที่ใช้บดของแข็งชนิดหนึ่งประกอบด้วยภาชนะปิด หรือหม้อบด (Shell Liner) หมุนอย่างช้า ๆ ในแนวนอน ภายในมีลูกบดเป็นบอลโลหะ การบดเกิดจากการกระทบของลูกบอลกับวัสดุที่ต้องการบด เมื่อหม้อบดเริ่มหมุนตัวลูกบดจะเคลื่อนที่ขึ้นไปตามผนังของหม้อบด จนถึงจุดจุดหนึ่งแล้วจะตกลงมาการบดจะเกิดจากแรง 2 แรงด้วยกันคือ

- แรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) ซึ่งจะทำให้วัสดุและลูกบดตกลงตัวเกาะติดกับผนังหม้อบด รวมกับแรงดึงดูดของโลกจะทำให้ตกลงมาตรงส่วนล่างของหม้อบด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระแทก (Shear Impact)
- การกระแทกกันของลูกบดภายในหม้อบด เครื่องบดบอลมิลล์ที่ใช้สำหรับบดวัสดุบดให้มีความละเอียดนั้นสามารถแบ่งอย่างกว้างๆได้เป็นสองประเภทคือแบบ Batch Mill และแบบ Continuous Mill

Batch Mill เป็นการบดโดยใช้เครื่องบดบอลมิลล์ โดยการเติมวัตถุดิบและตัวกลาง เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ โพลีเอทิลีนและสารเติมต่าง ๆ เช่น ตัวช่วยการกระจายลอยตัว (Deflocculant) ลงไปในเครื่องบดบอลมิลล์ ทำการปิดฝาและจึงเริ่มดำเนินการบด จนกระทั่งได้ความละเอียดหรือเวลาตามที่ต้องการจึงทำการถ่ายออกมา

การบดโดยใช้ Batch Mill นั้น สามารถบดได้ทั้งแบบแห้งและแบบเปียก โดยวัตถุดิบที่ต้องการบดนั้น สามารถบดแยกส่วนระหว่างพวกวัตถุดิบที่มีความแข็งมาก (Hard Material) อย่างเดียว แล้วจึงนำไปผสมรวมกันกับพวกวัตถุดิบที่ไม่แข็ง แต่มีการจับตัวกันอย่างอ่อนๆ (Soft Material) ให้ครบสูตรต่อไป

สำหรับในการบดแห้งโดยใช้เครื่องบดบอลมิลล์นั้น มักจะเป็นการบดวัตถุดิบ เช่น หินปูน (Limestone) หินฟ้าม้า (Feldspar) ทราวยหรือควอทซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นต้น เพื่อให้มีความละเอียดสูงสำหรับนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการทำเซรามิก

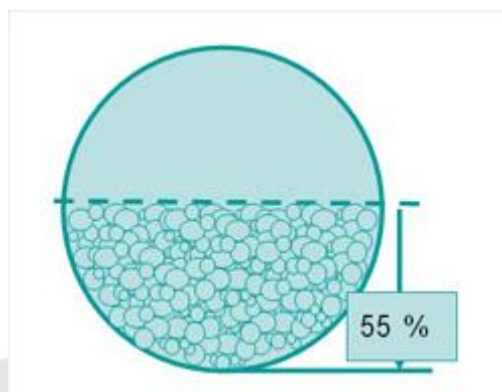
ในการบดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้น มีปัจจัยที่จะต้องควบคุมดังต่อไปนี้

- 6.1 ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด
- 6.2 ชนิดของลูกบด (Type of Grinding Media)
- 6.3 ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่เติมลงในหม้อบด
- 6.4 ชนิดของตัวกรูหม้อบด (Liner)
- 6.5 ความเร็วในการหมุนของหม้อบด (Critical Speed)
- 6.6 ปริมาณของวัตถุดิบที่เติม
- 6.7 ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ และความแข็ง (Hardness) ของวัตถุดิบ
- 6.8 วิธีการเติมวัตถุดิบและตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพ (Additive)

#### 6.1 ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบดแบบ Batch Mill

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุดนั้น การเติมลูกบดลงในหม้อบดบอลมิลล์นั้น จะเติมอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 – 55 ของปริมาตรภายในทั้งหมดของหม้อบด ซึ่งจากการ

ทดสอบ พบว่า ช่วงของการเติมลูกบดในช่วงนี้จะช่วยให้เวลาในการบดน้อยที่สุด และค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) จะดีที่สุด



ภาพประกอบ 10 ระดับลูกบดที่เหมาะสมในหม้อบดบอลมิลล์

ที่มา: คชินท์ สายอินทวงศ์. (2551). การบดละเอียด(Grinding or Milling). สืบค้นเมื่อ 21 มีนาคม 2562. จาก: [http://www.thaiceramicsociety.com/pc\\_pre\\_grindmore.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php)

## 6.2 ชนิดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบด

การเลือกใส่ลูกบดชนิดต่าง ๆ กันนั้น ขึ้นอยู่กับมลทินที่สึกออกมา ซึ่งสามารถปนไปกับเนื้อสารที่ต้องการบดได้ ปกตินิยมใส่ลูกบดชนิดอลูมิน่าเพราะมีการกร่อนได้ยาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่แกร่ง ผ่านกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูง นอกจากนี้ยังมีความถ่วงจำเพาะสูง ทำให้มีแรงบดได้มาก

## 6.3 ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่ใช้เติมลงในหม้อบด

ขนาดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อบดที่ใช้งาน ขนาดของวัตถุดิบที่เติมลงไป ในหม้อบดและความละเอียดของสิ่งที่ต้องการบด โดยลูกบดขนาดใหญ่จะทำหน้าที่บดย่อยวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงและลูกบดขนาดเล็กจะเป็นตัวทำให้วัตถุดิบเล็กลงได้ตามต้องการ ลูกบดขนาดเล็กนั้นจะบดวัตถุดิบให้มีขนาดการกระจายตัวของอนุภาคได้แคบกว่า ลูกบดขนาดใหญ่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า การเติมลูกบดที่มีขนาดแตกต่างกันลงในหม้อบดนั้นจะช่วยให้การเรียงตัวของลูกบดดีขึ้น นั่นคือมีช่องว่างลดลง ทำให้สามารถเติมวัตถุดิบลงในหม้อบดได้มากขึ้น นอกจากนี้การเติมลูกบดหลายขนาดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบดให้ดีขึ้นด้วย

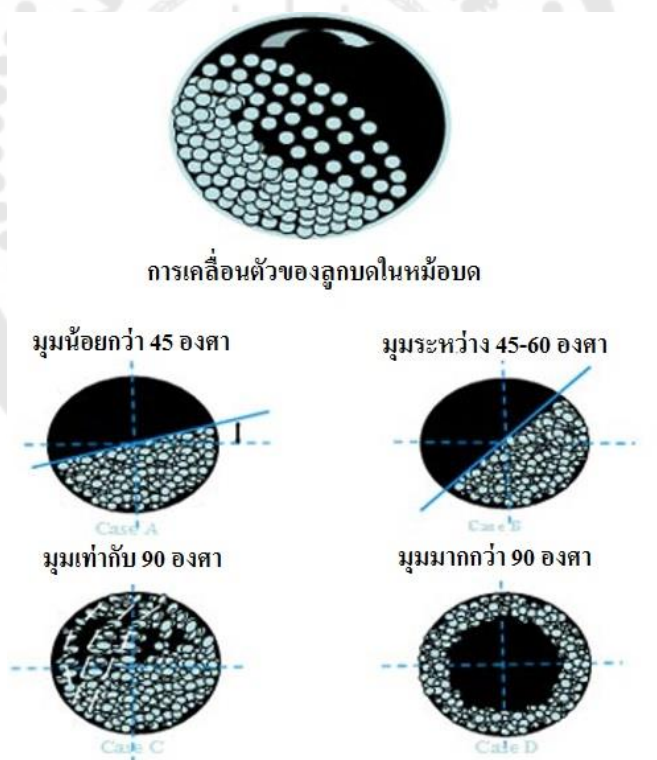
#### 6.4 ชนิดของตัวกรูหม้อบด (Liner)

ตัวกรูหม้อบดนั้น ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ตัวชั้นของหม้อบด ซึ่งทำมาจากโลหะ เช่น เหล็ก เกิดการกร่อนขณะทำการบด เพราะจะทำให้เกิดการเจือปนของโลหะปนลงไปในสิ่งที่เราจะบดได้ นอกจากนี้ตัวกรูหม้อบดยังทำหน้าที่รับแรงกระแทกของลูกบดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบดด้วย

#### 6.5 ความเร็วในการหมุนหม้อบด (Critical Speed)

ในการบดนั้นจะอยู่ภายใต้แรงสามชนิด ที่จะต้องมีความสัมพันธ์กัน สอดคล้องกัน เพื่อส่งเสริมให้การบดมีประสิทธิภาพสูงสุด แรงทั้งสามชนิดนี้ คือ

1. แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Force)
2. แรงสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Force)
3. แรงเสียดทานระหว่างวัตถุ (Frictional Force)



ภาพประกอบ 11 การเคลื่อนตัวของลูกบดในความเร็วรอบที่ต่างกัน

ที่มา: คชินท์ สายอินทวงศ์. (2551). การบดละเอียด(Grinding or Milling). สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2562. จาก: [http://www.thaiceramicsociety.com/pc\\_pre\\_grindmore.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php)

## 6.6 ปริมาณของวัตถุที่เติม

จากการคำนวณปริมาตรที่เหลือของหม้ออบ หลังจากเติมลูกบดลงไปแล้วนั้น จะเหลือปริมาตร หรือช่องว่างอยู่อีกร้อยละ 67 ของปริมาตรหม้ออบ การคำนวณปริมาตรวัตถุบดและตัวกลาง ที่เติมลงไปนั้นจะต้องเว้นช่องว่างของปริมาตรหม้ออบเอาไว้อีกร้อยละ 25 ด้วยเหตุผลที่ว่าจะต้องเหลือช่องว่างที่ให้โอกาสวัตถุบด และลูกบดมีการเคลื่อนที่ได้ และมีช่องของการตกกระทบซึ่งกันและกัน อีกเหตุผลที่สำคัญก็คือ ในการเติมวัตถุบดลงไปในหม้ออบนั้น วัตถุบดทั้งหมดไม่ว่าจะมีขนาดใหญ่หรือเล็ก จะไม่สามารถแทรกผ่านไปตามช่องว่างระหว่างลูกบดที่มีอยู่ในหม้ออบได้ ดังนั้น ร้อยละ 22 ที่เป็นช่องว่างของลูกบดจะแทบไม่มีวัตถุบดแทรกเข้าไปได้เลย จนกว่าจะเริ่มหมุนหม้ออบให้มีการเคลื่อนตัวของลูกบดและวัตถุบด จนกระทั่งวัตถุบดและตัวกลางสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างของลูกบดได้

## 6.7 ความสม่ำเสมอของวัตถุบดและความแข็ง (Hardness) ของวัตถุบด

วัตถุบดที่เติมลงในหม้ออบควรมีขนาดหลังจากผ่านกระบวนการบดหยาบมาแล้วใกล้เคียงกัน ไม่ควรมีขนาดใหญ่มากเกินไปจนเข้ามามีด้วย เพราะจะทำให้การบดมีประสิทธิภาพด้อยลง โดยลูกบดต้องทำหน้าที่บดย่อย วัตถุบดที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงก่อน และในแต่ละครั้งที่ผลิตก็ควรมีขนาดของวัตถุบดที่สม่ำเสมอกันด้วย โดยขนาดที่ใหญ่ที่สุดของวัตถุบดนั้นไม่ควรเกิน 5 มิลลิเมตร

สำหรับความแข็งของวัตถุบดนั้น วัตถุบดที่ใช้ในการผลิตแต่ละตัวควรมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน ไม่ควรที่จะแตกต่างกันมาก เพราะจะทำให้เกิดความแตกต่างของความละเอียดในวัตถุบดแต่ละตัว ซึ่งถ้าควบคุมความละเอียด โดยใช้การตรวจเช็คร้อยละของกากที่ค้างบนตะแกรง (% Residue) วัตถุบดที่มีความแข็งมาก ก็จะไม่ถูกบดจนละเอียดและจะยังคงค้างอยู่บนตะแกรงในขณะที่วัตถุบดที่อ่อนกว่าจะถูกบดจนละเอียดเกินไป ซึ่งจะทำให้ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) มีค่ากว้างมาก ซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อคุณสมบัติหลังเผาของผลิตภัณฑ์ได้

## 6.8 วิธีการเติมวัตถุบดและตัวช่วยปรับปรุงการไหลตัว

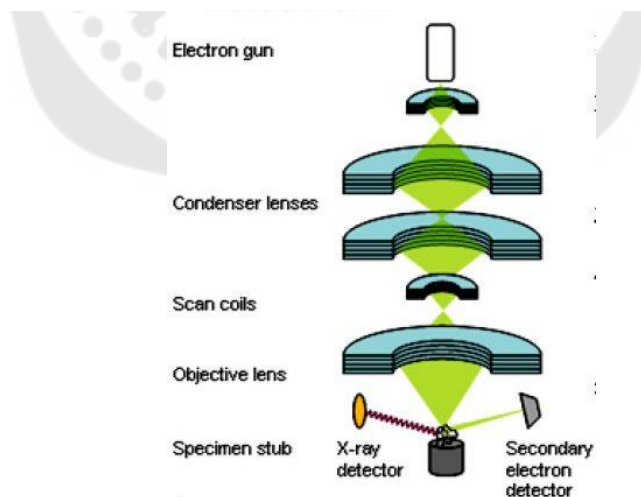
การเติมวัตถุบดที่เหมาะสมในการบดแบบเปียกคือเติมน้ำลงไปบางส่วนก่อนเพื่อให้ น้ำเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างของลูกบดแล้วจึงเติมวัตถุบดลงไปจนครบสูตรแล้วจึงเติมน้ำที่เหลือลงไป จะช่วยให้สามารถเติมวัตถุบดได้ในปริมาณที่มากขึ้น หลังจากนั้นปิดฝาหม้ออบแล้วทำการหมุนหม้ออบประมาณครึ่งชั่วโมงแล้วจึงทำการเติมสารช่วยกระจายลอยตัวลงไป วิธีนี้จะช่วยให้สารช่วยกระจายลอยตัวมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้เต็มที่ และจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบดได้ (คชินท์, 2551)

## 7. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำวดยิ่ง

### 7.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องบาง การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตีพิมพ์

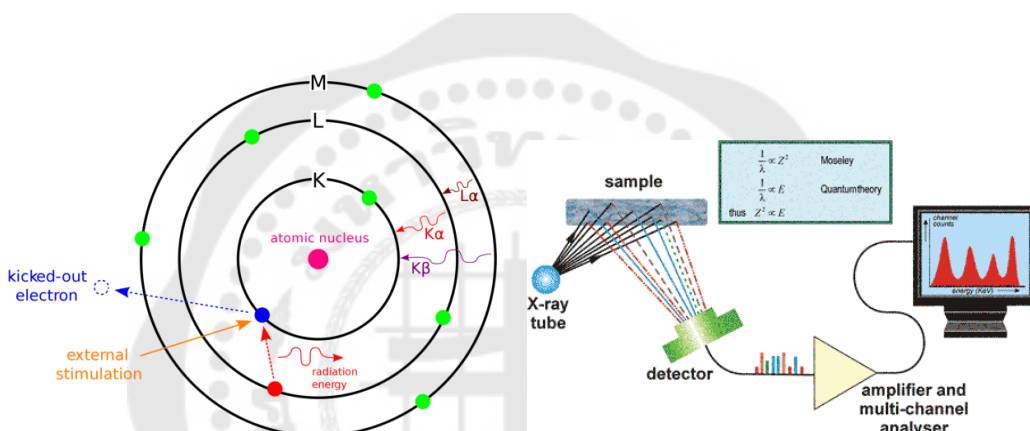


ภาพประกอบ 12 การทำงานของเครื่อง SEM

ที่มา: สมศักดิ์ เสนาใหญ่. (2557). กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. สืบค้นเมื่อ 22 มีนาคม 2562, จาก <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewgroup/426>

## 7.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องสเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX)

EDX เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารโดยยิงรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-Ray Beam) ไปยังบริเวณที่ต้องการศึกษา รังสีเอกซ์ปฐมภูมินี้จะทะลุเข้าไปชนอิเล็กตรอนวงในชั้น  $K$  ให้หลุดออกทำให้อิเล็กตรอนวงนอกชั้น  $L$  และชั้น  $M$  ซึ่งมีระดับพลังงานที่สูงกว่าเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนวงในที่หลุดออก แล้วปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-Ray Beam) รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนี้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด โดยใน ส่วนที่ใช้งานเครื่อง EDX เป็นเครื่องมือที่ใช้แหล่งกำเนิดร่วมกับเครื่อง SEM



ภาพประกอบ 13 การทำงานของเครื่อง EDX

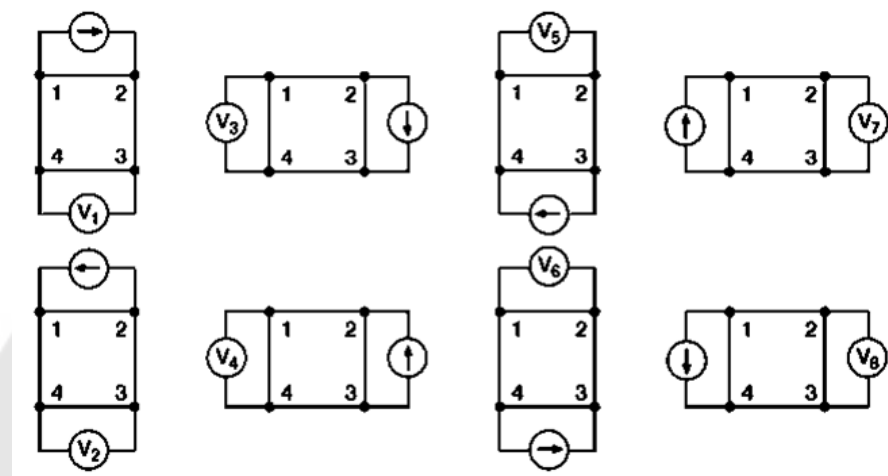
ที่มา: Science pole. (2560). Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy. สืบค้นเมื่อ 22 มีนาคม 2562, จาก <http://sciencepole.com/energy-dispersive-x-ray-spectroscopy/>

## 7.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการวัดแบบ 4 ขั้ว เพื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นการวัดเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของตัวนำยิ่งยวด โดยเริ่มจากการนำสารที่ได้จากกระบวนการเผาครั้งสุดท้ายไปทำขั้ว 4 ขั้ว ด้วยกาวเงิน (Silver Paint) ที่มีสมบัติช่วยในการนำไฟฟ้า ซึ่ง 2 ขั้วจะต่อกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงตัว อีก 2 ขั้วจะใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยจะทำก่อนการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวด



การจัดวางตำแหน่งขั้วต่าง ๆ โดยเลือกรูปแบบ 4 ขั้วสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Schroder, 2006, pp. 2-21) หรือที่เรียกว่าวิธีแวน เดอร์ พาว (the Van Der Pauw method) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำมาก่อน วิธีนี้ใช้สำหรับการวัดสี่ขั้วที่ขั้วทั้งสี่สัมผัสกับระนาบของผิวที่เรียบและตัวอย่างมีความหนา เทคนิคนี้จะให้ผลการวัดที่ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของตัวอย่าง โดยไม่มีผลจากการจัดวางตำแหน่งของขั้ว วิธีนี้ผลการวัดจะเกิดจากการวัดแปดครั้งที่เปลี่ยนตำแหน่งของขั้วต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 ตำแหน่งขั้วในการวัดความต้านทานไฟฟ้าแต่ละครั้งตามวิธีแวน เดอร์ พาว

ที่มา: Tektronix. (2016). Van Der Pauw and Hall Voltage Measurements with the 4200A-SCS Parameter Analyzer. Retrieved from [https://download.tek.com/document/1KW-60641-0\\_vanderPauw\\_4200A-SCS\\_AN.pdf](https://download.tek.com/document/1KW-60641-0_vanderPauw_4200A-SCS_AN.pdf)

การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดตามวิธีแวน เดอร์ พาว จะเกิดจากการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้า  $\rho_A$  และ  $\rho_B$  ดังสมการ

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A t_s \frac{(V_1 - V_2 + V_3 - V_4)}{4I} \quad (2.1)$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B t_s \frac{(V_5 - V_6 + V_7 - V_8)}{4I} \quad (2.2)$$

โดย	$\rho_A$ และ $\rho_B$	คือ สภาพต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร
	$t$	คือ ความหนาของตัวอย่างมีหน่วยเป็นเมตร
	$V_1$ ถึง $V_8$	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้แต่ละครั้งมีหน่วยเป็นโวลต์
	$I$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างมีหน่วยเป็นแอมแปร์
	$f_A$ และ $f_B$	คือ ค่าปรับความสมมาตรที่สัมพันธ์กับค่า $Q$ ตามฟังก์ชัน

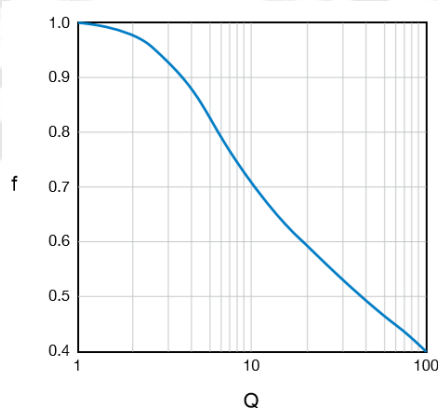
$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{0.693} \cosh^{-1} \left( \frac{e^{0.693/f}}{2} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่

$$Q_A = \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_4} \quad (2.4)$$

$$Q_B = \frac{V_5 - V_6}{V_7 - V_8} \quad (2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับ  $f$  และค่า  $Q$  จะได้ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Q$  และ  $f$

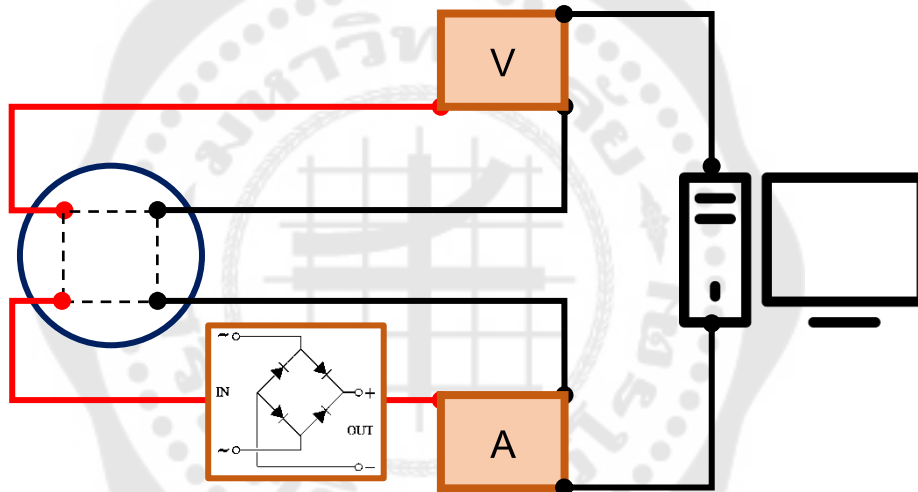
ที่มา: Tektronix. (2016). Van Der Pauw and Hall Voltage Measurements with the 4200A-SCS Parameter Analyzer. Retrieved from [https://download.tek.com/document/1KW-60641-0\\_vanderPauw\\_4200A-SCS\\_AN.pdf](https://download.tek.com/document/1KW-60641-0_vanderPauw_4200A-SCS_AN.pdf)

แสดงให้เห็นว่าค่าปรับจะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อตัวอย่างมีความสมมาตร

เมื่อได้สภาพต้านทานไฟฟ้า  $\rho_A$  และ  $\rho_B$  ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสุทธิเป็นค่าเฉลี่ยของสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งสอง ดังสมการ

$$\rho_{AVG} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \quad (2.6)$$

สำหรับเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว มีการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 ชุดวัดความต้านทานแบบ 4 ขั้วตามวิธีแวน เดอร์ พาว

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างตัวนำยวดยิ่งด้วยวิธีแวน เดอร์ พาว ประกอบด้วย

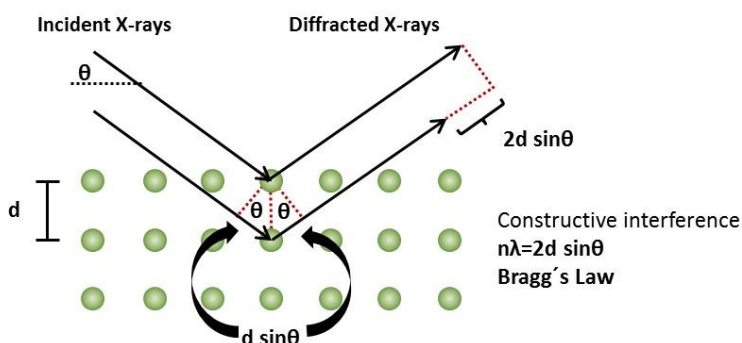
- 1) สายโคแอกเชียลเบอร์ TSLE156277
- 2) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
- 3) สายเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล NI USB-TC01
- 4) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงตัวยี่ห้อ MASTECH รุ่น HY3005
- 5) มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 8845A
- 6) มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 8846A
- 7) คอมพิวเตอร์

## 7.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกที่พบภายในสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดมุมของรังสีที่เลี้ยวเบนไปต่าง ๆ กันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูลเนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารโดยใช้วิธี X-ray Diffraction จะใช้รังสีเอกซ์แบบเฉพาะ (Characteristic Spectrum) ที่เกิดจากเป้าทองแดง ค่าความยาวคลื่นรังสีเอกซ์  $K_{\alpha}$  เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม

$K_{\alpha}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับชั้น พลังงาน  $L$  ไปยังระดับชั้นพลังงาน  $K$  สำหรับการวัดรูปแบบของการเลี้ยวเบนใช้ สมการตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) พิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอมที่ขนานกัน เหมือนกับกฎการสะท้อน คือภายใต้เงื่อนไขเฉพาะบางอย่าง จะมีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนในทิศทางที่ทำมุมกับระนาบเท่ากับมุมตกกระทบ



ภาพประกอบ 17 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึก

พิจารณาภาพภาคตัดขวางของผลึกขยายให้เห็นการเรียงกันของอะตอมบนชุดระนาบ ซึ่งมีระยะระหว่างระนาบเป็น  $d$  ชุดระนาบประกอบด้วยระนาบจำนวนมาก ซึ่งขนานและมีระยะห่างที่เท่ากัน ให้รังสีเอกซ์ขนานมีความยาวคลื่น  $\lambda$  มุมตกกระทบขนาด  $\theta$  เทียบกับระนาบเป็นไปตามสมการ (Kittel, 2005, p. 25)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.7)$$

เมื่อ	$n$	คือ จำนวนเต็มของการแทรกสอดแบบเสริมกัน ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )
	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	$d$	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึกมีหน่วยเป็นอังสตรอม
	$\theta$	คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับระนาบของผลึก

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณ หรือหาองค์ประกอบตัวอย่างที่มีโครงสร้างแบบไร้ระเบียบได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

### 7.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนของ $\text{Cu}^{3+}$ ต่อ $\text{Cu}^{2+}$ ด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

งานวิจัยนี้ใช้ผงบดละเอียดของสารตัวอย่างมาทำการไทเทรต โดยใช้เทคนิคไอโอโดเมตริกไทเทรชัน ในการหาปริมาณทองแดง ทำให้ทราบอัตราส่วนของ  $\text{Cu}^{3+}$  ต่อ  $\text{Cu}^{2+}$  ในโครงสร้างการหาปริมาณทองแดงในตัวนำยวดยิ่งมีวิธีการ (Choy et al., 1989; Ha et al., 2001) ดังนี้

#### การไทเทรตตอน A

- 1) ชั่งผงละเอียดของสารตัวนำยวดยิ่ง ประมาณ 150 มิลลิกรัม แล้วบันทึกมวล
- 2) นำผงสารตัวนำยวดยิ่งใส่บีกเกอร์และเติมสารละลายกรดเปอร์คลอริก ( $\text{HClO}_4$ ) เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (ทำในตู้ดูดควัน)
- 3) นำสารละลายไปต้ม เป็นเวลา 10 นาที แล้วตั้งสารละลายไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 4) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้น 15% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารตลอดระยะเวลาการไทเทรต
- 5) ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อน ๆ จากนั้นเติมน้ำแข็ง 3 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม
- 6) ไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป แล้วบันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

### การไทเทรตตอน B

- 1) ชั่งผงละเอียดของสารตัวนำวอดยี่ง ประมาณ 150 มิลลิกรัม แล้วบันทึกมวล จากนั้นนำใส่ขวดปริมาตรทรงกรวย
- 2) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้น 10% ปริมาณ 15 มิลลิลิตร
- 3) นำแก๊สไนโตรเจนผ่านพาสเจอร์รี่เปต จุ่มลงในสารละลายให้เกิดเป็นฟองอากาศ เพื่อเป็นตัวนำออกซิเจนออกจากสารละลาย เป็นเวลา 10 นาที
- 4) กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสาร พร้อมหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 3.5 โมลาร์ ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ช้า ๆ โดยใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 5 นาที
- 5) กวนสารละลายต่ออีก 10 นาที จนเกิดตะกอนสีขาวจืดหยุด
- 6) ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อน ๆ จากนั้นเติมน้ำแข็ง 3 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม
- 7) ไทเทรตช้า ๆ จนสีน้ำเงินจางหายไป แล้วบันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )
- 8) ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง นำผลที่บันทึกได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ปริมาณทองแดง โดยคำนวณจากสมการ คือ

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

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

โดยที่

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

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

$n_{\text{A}}(\text{I}_2)$  คือ จำนวนโมลของ  $\text{I}_2$  ที่ได้จากการไทเทรตกับ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ในการไทเทรตตอน A

$n_{\text{B}}(\text{I}_2)$  คือ จำนวนโมลของ  $\text{I}_2$  ที่ได้จากการไทเทรตกับ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ในการไทเทรตตอน B

$m_{\text{A}}$  คือ มวลของสารตัวนำวอดยี่งในการไทเทรตตอน A

$m_{\text{B}}$  คือ มวลของสารตัวนำวอดยี่งในการไทเทรตตอน B

## 8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่ง Y134

ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงในกลุ่ม YBaCuO ที่ได้รับการพัฒนาปรับปรุงสูตรและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์มาอย่างต่อเนื่อง ดังงานวิจัยต่อไปนี้

งานวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y134 และเปรียบเทียบกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 (Chainok et al., 2014, pp. 220-223) ได้ทำการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งชนิด Y123 ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ) และตัวนำยวดยิ่ง Y134 ( $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$ ) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งและกระบวนการหลอมเหลว จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่าทุกตัวอย่างของตัวนำยวดยิ่งมีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก จากการวัดสภาพต้านทานแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีค่า 96 K ต่ำกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 ซึ่งอยู่ที่ 97 K ในกรณีที่เตรียมด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง แต่กรณีของกระบวนการหลอมเหลวอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีค่า 93 K สูงกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 ซึ่งอยู่ที่ 91 K อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมได้ทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่อง EDX พบว่าตัวอย่างที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีรูพรุนมากและขนาดเกรนชัดเจนและใหญ่กว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 และสังเกตได้ชัดว่ารูพรุนลดลงเมื่อใช้กระบวนการหลอมเหลว การตรวจวัดด้วยสเปกตรัม FTIR พบว่ามีสายคาร์บอนติดค้างอยู่ในทุกตัวอย่าง

งานวิจัยเรื่อง สมบัติบางประการของตัวนำยวดยิ่ง  $\text{YBa}_m\text{Cu}_{1+m}\text{O}_y$  ( $m=2,3,4,5$ ) ของ (Chainok et al., 2015) ได้ทำการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ), Y134 ( $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_{9-x}$ ), Y145 ( $\text{YBa}_4\text{Cu}_5\text{O}_{11-x}$ ) และ Y156 ( $\text{YBa}_5\text{Cu}_6\text{O}_{13-x}$ ) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นประกอบด้วย  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  และ  $\text{CuO}$  โดยใช้อุณหภูมิการเผาแบบผงที่  $950^\circ\text{C}$  ใช้อุณหภูมิการซินเตอร์ริงที่  $950^\circ\text{C}$  และ  $980^\circ\text{C}$  ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดแบบสี่ขั้วพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y123, Y134, Y145 และ Y156 อยู่ที่ 97, 93, 91, 85 K ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากเครื่อง XRD พบว่าเป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิกที่มีอัตราส่วน  $c/a$  ที่ 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 สำหรับ Y123, Y134, Y145 และ Y156 ตามลำดับ และการไต่อัตรอัตราส่วน  $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$  และความจุออกซิเจน พบว่ามีค่า (0.28, 6.83), (0.19, 8.81), (0.13, 10.79) และ (0.16, 12.92) สำหรับตัวนำยวดยิ่ง Y123, Y134, Y145 และ Y156 ตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิการซินเตอร์ริงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความจุออกซิเจนและอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งมีค่าลดลง

## 8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจือโลหะออกไซด์ในตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิสูง

การเจือสารลงในตัวนำยิ่งยวด เป็นวิธีหนึ่งในการวิจัยและพัฒนาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยิ่งยวด โดยเฉพาะตัวนำยิ่งยวดในกลุ่ม YBaCuO ดังงานวิจัยต่อไปนี้

การศึกษาผลของการเจืออนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ ชนิด Magnetic และ Nonmagnetic ที่มีต่ออุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดชนิด YBaCuO (Salama, El-Hofy, Rammah, & Elkhatib, 2015) โดยการสังเคราะห์ ตัวนำยิ่งยวดชนิด Y123 ที่เจือด้วย  $Mn_3O_4$ ,  $Co_3O_4$ ,  $Cr_2O_3$ , CuO และ  $SnO_2$  ปริมาณ 0.2 wt% ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง การศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างที่เตรียมขึ้น ด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน XRD กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและส่องผ่าน ผลการวิเคราะห์จาก XRD และ SEM แสดงให้เห็นว่า ไม่มีตัวอย่างใดที่มีอนุภาคนาโนแทรกในโครงสร้างของ YBaCuO บริเวณกึ่งกลางผิวหน้า สำหรับการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตพบว่า การเจือด้วยโลหะออกไซด์ชนิด Nonmagnetic ( $SnO_2$ , CuO) ทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนการเจือด้วย  $Cr_2O_3$  ( $3.8 \mu B$ ) และ  $Co_3O_4$  ( $3.02 \mu B$ ) ทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การเจือด้วยโลหะออกไซด์ชนิด Magnetic ที่มีโมเมนต์แม่เหล็กสูงคือ  $Mn_3O_4$  ( $5.27 \mu B$ ) ทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษาอิทธิพลของการเจืออนุภาคนาโนของโลหะแม่เหล็กออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำยิ่งยวด YBaCuO (Salama et al., 2016) โดยการเตรียมตัวนำยิ่งยวด YBaCuO + X โดย X คือ  $Cr_2O_3$ ,  $Co_3O_4$  และ  $Mn_3O_4$  ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 โดยมวล ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ผ่านกระบวนการบด การเผาแบบผง การผสมด้วยอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ การอัดก้อน การเผาซินเตอร์ริงและกระบวนการอบอ่อน จากนั้นวัดสมบัติทางฟิสิกส์ ซึ่งประกอบไปด้วย การศึกษาโครงสร้างของสาร ด้วยเครื่อง XRD การศึกษาขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การตรวจสอบปริมาณสารประกอบด้วยเครื่อง EDX การศึกษาอุณหภูมิวิกฤต ด้วยการวัดความต้านทานแบบ 4 ขั้วในสภาพสุญญากาศ ผลการวิจัยพบว่า การศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพบว่าขนาดของอนุภาคนาโนที่ได้อยู่ระหว่าง 75 ถึง 82 นาโนเมตร การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD พบว่าโครงสร้างของตัวนำยิ่งยวดเป็นโครงสร้าง Perovskite ชนิด Orthorhombic Pmmm  $a_0 = 3.823 \text{ \AA}$ ,  $b_0 = 3.885 \text{ \AA}$ ,  $c_0 = 11.7 \text{ \AA}$  พบว่า ความเข้มข้นในการเจือที่มากจะทำให้อนุภาคนาโนผสมลงไปโครงสร้างมากขึ้น การศึกษาขนาดของเกรน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ขนาดของเกรนเฉลี่ยตามความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลง มีขนาดเท่ากัน มีขนาดประมาณ 1 ถึง 4 ไมโครเมตร



และอนุภาคนาโนของโลหะที่เจือลงไปจะอยู่ระหว่างโครงสร้างหรือเคลือบเกรนของตัวนำยวดยิ่ง และการหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ด้วยการวัดความต้านทานแบบ 4 ขั้วในสภาพสุญญากาศ พบว่าการเจือด้วยโลหะออกไซด์มีผลต่ออุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง โดยตัวนำยวดยิ่งที่น่าสนใจคือการเจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ พบว่า การเจือด้วยอัตราส่วนเล็กน้อย 0.1%, 0.2% ทำให้อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งมีค่าสูงขึ้นที่ 119 เคลวินและ 112 เคลวิน และ 0.5% ที่ 100 เคลวิน ในขณะที่การเจือด้วยความเข้มข้นอื่น หรือการเจือด้วยโลหะออกไซด์ชนิดอื่นทำให้อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งมีค่าลดลง

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เจือโลหะในสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 คือ งานวิจัยเรื่อง ผลของการเจือไทเทเนียมในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง Y134 และ Y257 (Kruaehong, Sujinnapram, Udomsamuthirun, Nilkamjon, & Ratreng, 2018) งานวิจัยนี้เป็นการเจือไทเทเนียมหลังกระบวนการเผาแบบผงด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยประกอบด้วยเฟสที่เป็นตัวนำยวดยิ่งซึ่งเป็นออร์โทโรอมบิคกับหมู่ Pmmm และเฟสที่ไม่เป็นตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งการเจือไทเทเนียมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์ c ในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง

### 8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบัดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

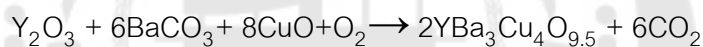
ในงานวิจัยผลของการบัดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 (Nilkamjon et al., 2017, pp. 67-69) เป็นการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยใช้การบัดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียกที่ใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายและการบัดแบบแห้ง ผลการวิจัยพบว่า การบัดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียกให้ตัวนำยวดยิ่งที่มีขนาดเกรนเล็กที่สุด เมื่อเทียบกับการบัดแบบแห้งและการบัดด้วยโถรงบดสาร

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาผลของการเจือแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยิ่งยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ Y134 ผู้วิจัยสนใจเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ระหว่างตัวนำยิ่งยวด Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ความเข้มข้นแตกต่างกันและใช้วิธีการผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งมีวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

#### 1. การวิเคราะห์สมการเคมีการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด Y134

การเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด Y134 หรือ  $YBa_3Cu_4O_{7-x}$  เป็นตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม YBaCuO โดยใช้สารตั้งต้น ประกอบด้วย อิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันโดยใช้อัตราส่วนโดยอะตอม Y:Ba:Cu เป็น 1:3:4 โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้



จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้น สามารถคำนวณหาสัดส่วนของมวลในหน่วยกรัมได้ดังนี้

1.1 อิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) 1 โมเลกุล ประกอบด้วย ธาตุอิตเทรียมจำนวน 2 อะตอมและธาตุออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม โดยมวลอะตอมอิตเทรียมเท่ากับ 88.906 u และมวลอะตอมออกซิเจนเท่ากับ 15.999 u ดังนั้น การเตรียมสารอิตเทรียมออกไซด์  $Y_2O_3$  ต้องใช้

$$\text{อิตเทรียม} : Y_2 = 2 \times 88.906 = 177.812 \text{ u}$$

$$\text{ออกซิเจน} : O_3 = 3 \times 15.999 = 47.997 \text{ u}$$

ดังนั้น มวลโมเลกุลของอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) มีค่าเท่ากับ  $177.812 + 47.997 = 225.809 \text{ u}$

1.2 แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) 1 โมเลกุล ประกอบด้วย ธาตุแบเรียมจำนวน 1 อะตอม ธาตุคาร์บอนจำนวน 1 อะตอมและธาตุออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม โดยมวลอะตอมแบเรียมเท่ากับ 137.330 u มวลอะตอมคาร์บอนเท่ากับ 12.011 u และมวลอะตอมออกซิเจนเท่ากับ 15.999 u ดังนั้น การเตรียมสารแบเรียมคาร์บอเนต ( $Ba_2CO_3$ ) จะต้องใช้

$$\text{แบเรียม} : Ba = 1 \times 137.327 = 137.327 \text{ u}$$

$$\text{คาร์บอน} : C = 1 \times 12.011 = 12.011 \text{ u}$$

$$\text{ออกซิเจน} : O_3 = 3 \times 15.999 = 47.997 \text{ u}$$

ดังนั้น มวลโมเลกุลของ  $\text{Ba}_2\text{CO}_3$  มีค่าเท่ากับ  $137.327 + 12.011 + 47.997 = 197.335 \text{ u}$

1.3 คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) 1 โมเลกุล ประกอบด้วย ธาตุคอปเปอร์จำนวน 1 อะตอมและธาตุออกซิเจนจำนวน 1 อะตอม โดยมวลอะตอมคอปเปอร์เท่ากับ  $63.546 \text{ u}$  และมวลอะตอมออกซิเจนเท่ากับ  $15.999 \text{ u}$  ดังนั้น การเตรียมสารคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) จะต้องใช้

$$\text{คอปเปอร์} : \text{Cu} = 1 \times 63.546 = 63.546 \text{ u}$$

$$\text{ออกซิเจน} : \text{O} = 1 \times 15.999 = 15.999 \text{ u}$$

ดังนั้น มวลโมเลกุลของ ( $\text{CuO}$ ) มีค่าเท่ากับ  $63.546 + 15.999 = 79.545 \text{ u}$

โดยสัดส่วนมวลโมเลกุลจากปฏิกิริยาเคมี คือ

$$\text{ยิตเรียมออกไซด์} : \text{Y}_2\text{O}_3 = 1 \times 225.809 = 225.809 \text{ u}$$

$$\text{แบเรียมคาร์บอเนต} : \text{BaCO}_3 = 6 \times 197.335 = 1,184.010 \text{ u}$$

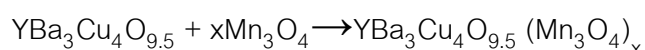
$$\text{คอปเปอร์ออกไซด์} : \text{CuO} = 8 \times 79.545 = 636.360 \text{ u}$$

$$\text{ซึ่งจะได้สาร Y134 จำนวน } 2 \times 907.062 = 1,814.124 \text{ u}$$

การเตรียมสาร Y134 ปริมาณ 1,814.124 กรัม จะต้องใช้  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ปริมาณ 225.809 กรัม  $\text{BaCO}_3$  ปริมาณ 1,184.010 กรัม  $\text{CuO}$  ปริมาณ 636.360 กรัม สำหรับการเตรียมสาร Y134 ปริมาณ 40 กรัม เพื่อแบ่งเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง 4 ก้อน จะต้องใช้  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ปริมาณ 4.979 กรัม  $\text{BaCO}_3$  ปริมาณ 26.126 กรัมและ  $\text{CuO}$  ปริมาณ 14.031 กรัม

ขั้นตอนการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างชนิด Y134 ประกอบด้วย การผสมสารตั้งต้นด้วยโกรกบดสาร การเผาแคลไซต์ที่  $950^\circ\text{C}$  เพื่อให้เกิดโครงสร้าง แล้วนำมาบดผสมกับสารแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) ด้วยวิธีการบดผสมด้วยโกรกบดสารและการบดผสมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียก อัดขึ้นรูปและเผาด้วยกระบวนการซินเตอร์ที่  $950^\circ\text{C}$  แล้วต่อด้วยการอบอ่อนที่  $550^\circ\text{C}$  จึงได้ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ )

ในขั้นตอนการเจือตัวนำยวดยิ่ง Y134 ด้วยสารแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) ผู้วิจัยแบ่งเป็นสัดส่วนแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) ปริมาณ 0.000 0.005 0.010 และ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 ปริมาณ 1 โมล ดังสมการเคมี



โดย  $x$  คือจำนวนโมลของสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ประกอบด้วย 0.000 0.005 0.010 และ 0.015 โมล

การเจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่มีมวลโมเลกุลเป็น 228.81 u ปริมาณ 0.000 0.005 0.010 และ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 ปริมาณ 1 โมล ลงในตัวนำยวดยิ่งมวล 8 กรัม จะต้องใช้สารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ดังตาราง 1


ตาราง 1 ปริมาณการเจือแมงกานีสออกไซด์

ความเข้มข้นการเจือ (mol)	ปริมาณสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 (กรัม)	ปริมาณแมงกานีสออกไซด์ (กรัม)
0.000	8.000	0.000
0.005	8.000	0.010
0.010	8.000	0.020
0.015	8.000	0.030




## 2. สารตั้งต้นที่ใช้

การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 ใช้สารตั้งต้น ประกอบด้วย อิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) และแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) โดยมีรายละเอียดดังตาราง 2

ตาราง 2 รายละเอียดสารตั้งต้น

ชื่อสาร	สูตรทางเคมี	ความบริสุทธิ์	ภาพบรรจุภัณฑ์
อิตเทรียมออกไซด์ (Yttrium(III) oxide)	$Y_2O_3$	99.99%	

ตาราง 2 (ต่อ)

ชื่อสาร	สูตรทางเคมี	ความบริสุทธิ์	ภาพบรรจุภัณฑ์
แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate)	$\text{BaCO}_3$	$\geq 99.0\%$	
คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper(II) oxide)	$\text{CuO}$	$\geq 99.0\%$	
แมงกานีสออกไซด์ (Manganese(II,III) oxide)	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	97%	

### 3. การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างชนิด Y134

การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่าง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ผู้วิจัยแบ่งการเตรียมเป็นสองกลุ่มที่ใช้วิธีการบดผสมแตกต่างกัน ได้แก่ สารตัวนำยวดยิ่งที่ผ่านการบดผสมด้วยโถรงบดสารและสารตัวนำยวดยิ่งที่ผ่านการบดผสมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียก ซึ่งในแต่ละกลุ่มของสารตัวอย่างประกอบไปด้วยสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 และสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ความเข้มข้น 0.005 0.010 และ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 ปริมาณ 1 โมล ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

#### 3.1 การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง Y 134 เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมโดยใช้โถรงบดสาร

1) เตรียมสารตั้งต้นประกอบด้วยอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) และแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ )



ภาพประกอบ 18 แสดงสารตั้งต้น อิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) และแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ตามลำดับจากซ้ายไปขวา

2) ตวงสารอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) ตามสมการการคำนวณข้างต้น ประกอบด้วยสารอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ )

จำนวน 4.979 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) จำนวน 26.126 กรัมและคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) จำนวน 14.031 กรัม โดยเครื่องชั่งยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA413

3) นำสารอิตเทรียมออกไซด์ ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) มาผสมในโถรงบดสารอลูมินาและทำการบดจนเป็นสารเนื้อเดียวกัน

4) เมื่อสารผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำมาทำการสังเคราะห์สารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ผ่านการเผาแบบผง (Calcinations) โดยเริ่มต้นกระบวนการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 950 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส อีกครั้งดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 19 แผนภาพแสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 1,2 โดยวิธี กระบวนการเผาแบบผง

5) นำสารที่ผ่านกระบวนการเผาผงครั้งที่ 1 มาบดให้ละเอียดอีกครั้งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร

6) นำสารที่ได้ไปเผาด้วยกระบวนการเผาแบบผงเหมือนตามข้อ 4) อีกครั้ง

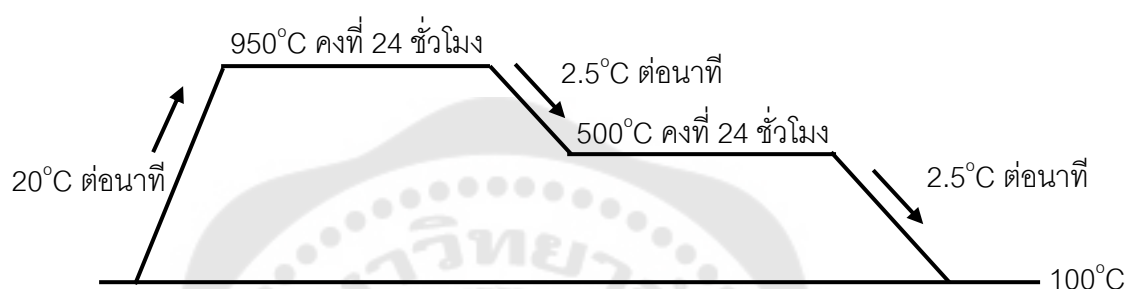
7) นำสารที่ได้มาแบ่งเป็น 4 ชุด ชุดละ 8 กรัม และเจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) ตามสัดส่วน 0.000 0.005 0.010 และ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 ปริมาณ 1 โมล ดังตาราง 1

8) นำสารมาบดผสมด้วยโถรงบดสารอลูมินา แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร

9) นำผงสารที่ได้มาขึ้นรูปด้วยแรงขนาด 15,000 นิวตันต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 30 นาที จนได้สารตัวนำยวดยิ่ง Y134 ทั้ง 4 ก้อน

10) นำก้อนสารที่ได้มาวัดขนาด ชั่งน้ำหนักและนำมาเผาด้วยกระบวนการซินเตอร์ริงและการอบอ่อน เพื่อเพิ่มความแกร่งให้วัสดุ เริ่มต้นกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ

100 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสแล้วคงที่ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพร้อมทำการเจือแก๊สออกซิเจนไปในโครงสร้างของสารด้วย จากนั้นลดอุณหภูมิอีกครั้ง ด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กระบวนการเผาเป็นไปดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 20 แสดงการเผาซินเตอร์ริงและการอบอ่อน

11) นำก้อนสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่าง Y134 ที่เตรียมโดยใช้โถรงบดสาร เก็บรักษาไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการนำไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์

### 3.2 การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง Y 134 เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมโดยใช้เครื่องบดบอลมิลล์

- 1) เตรียมสารตั้งต้นประกอบด้วยอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) และแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ )
- 2) ตวงสารอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) ตามสมการการคำนวณข้างต้น ประกอบด้วยสารอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) จำนวน 4.979 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) จำนวน 26.126 กรัมและคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) จำนวน 14.031 กรัม โดยเครื่องชั่งยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA413
- 3) นำสารอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) มาผสมในโถรงบดสารอลูมินาและทำการบดจนเป็นสารเนื้อเดียวกัน
- 4) เมื่อสารผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำมาทำการสังเคราะห์สารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ผ่านการเผาแบบผง (Calcinations) โดยเริ่มต้นกระบวนการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิ



เท่ากับ 950 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

5) นำสารที่ผ่านกระบวนการเผาผงครั้งที่ 1 มาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร

6) นำสารที่ได้ไปเผาด้วยกระบวนการเผาแบบผงเหมือนตามข้อ 4) อีกครั้ง

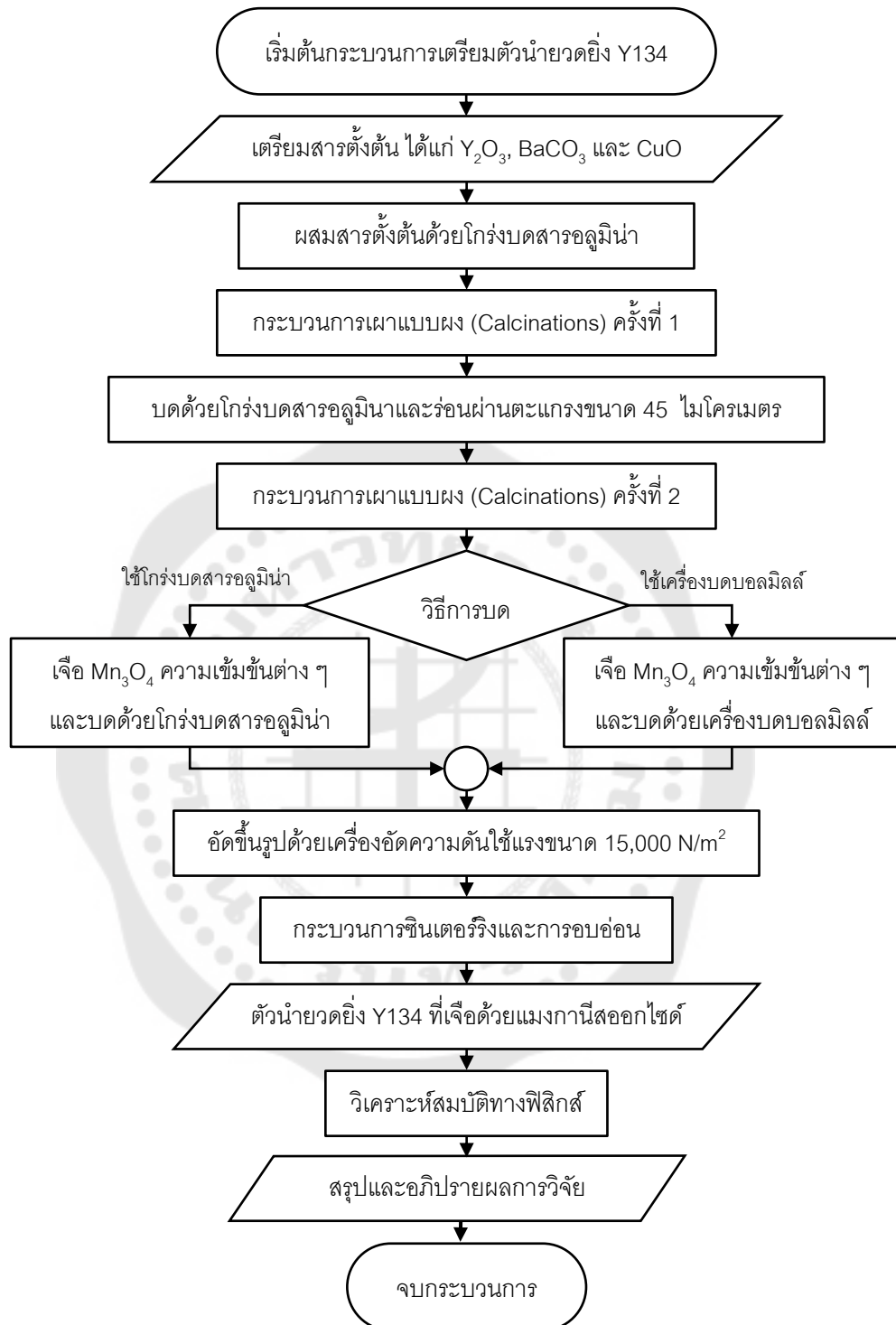
7) นำสารที่ได้มาแบ่งเป็น 4 ชุด ชุดละ 8 กรัม และเจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ตามสัดส่วน 0.000 0.005 0.010 และ 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 ปริมาณ 1 โมล ดังตาราง 1

8) นำสารมาบดผสมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แบบเปียก โดยใช้ลูกบดชนิดอลูมินา เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แยกสารและให้ความร้อนจนแอลกอฮอล์ระเหยหมด แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร

9) นำผงสารที่ได้มาขึ้นรูปด้วยแรงขนาด 15,000 นิวตันต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 30 นาที จนได้สารตัวนำยวดยิ่ง Y134 ทั้ง 4 ก้อน

10) นำก้อนสารที่ได้มาวัดขนาด ชั่งน้ำหนักและนำมาเผาด้วยกระบวนการซินเตอร์ริง และการอบอ่อน เพื่อเพิ่มความแกร่งให้วัสดุ

11) นำก้อนสารตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่าง Y134 ที่เตรียมโดยใช้เครื่องบดบอลมิลล์ เก็บรักษาไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการนำไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์



ภาพประกอบ 21 ผังงานกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งชนิด Y134

#### 4. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างชนิด Y134

การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่าง ประกอบด้วย

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ตามวิธีแวน เดอร์ พาว (Van Der Pauw method)

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

4.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนของ  $\text{Cu}^{3+}$  ต่อ  $\text{Cu}^{2+}$  ด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

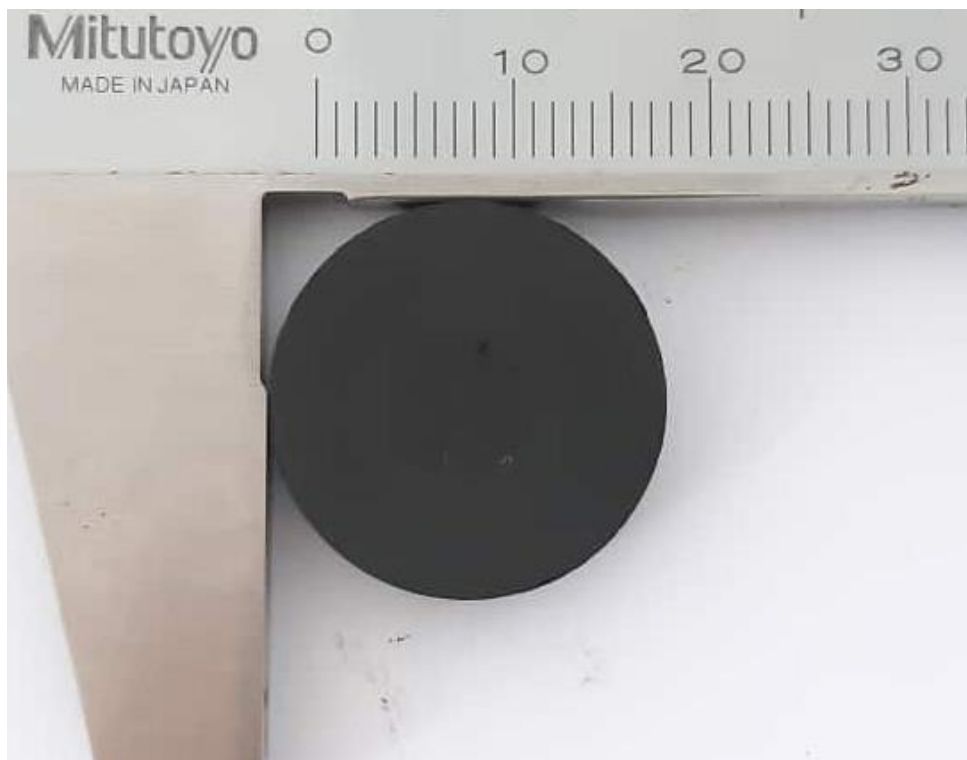
การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่าง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์และโถรงบดสาร ประกอบด้วยตัวนำยวดยิ่งแบบก้อน จำนวน 8 ตัวอย่างคือ ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่าง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร จำนวน 4 ตัวอย่างและตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่าง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยผ่านการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ มวล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของตัวอย่าง และวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ 5 ประการ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ซึ่งแสดงให้เห็นขนาดเกรนและความพรุนบริเวณผิวหน้าของตัวอย่าง การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX) บ่งบอกถึงอัตราส่วนและการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง การวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ตามวิธีแวน เดอร์ พาว (Van Der Pauw method) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) และการวิเคราะห์อัตราส่วนของ  $Cu^{3+}$  ต่อ  $Cu^{2+}$  ด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

ในการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งนี้ได้แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน เพื่อความละเอียดและสะดวกต่อการศึกษา ประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร
2. การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์
3. การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

## 1. การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

### 1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

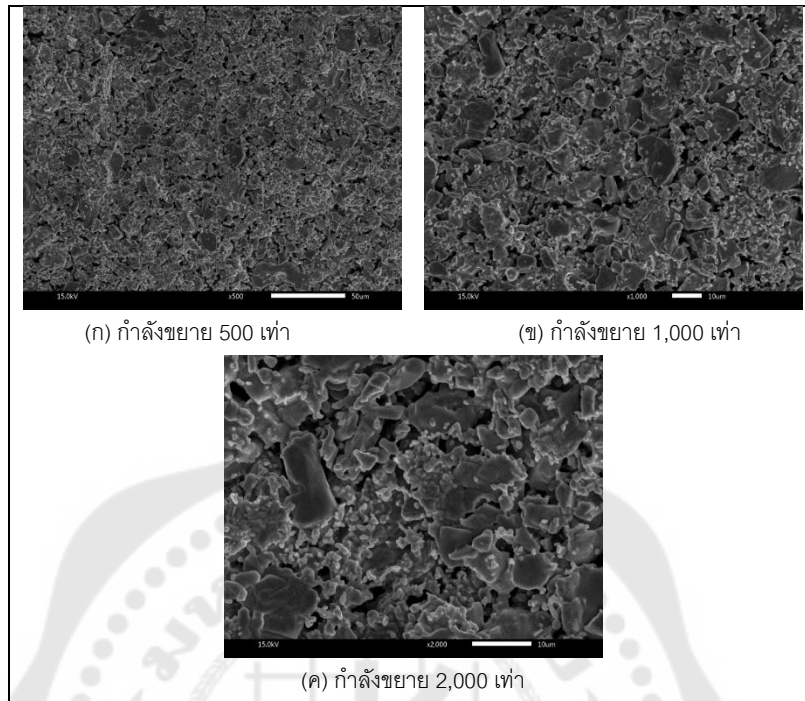


ภาพประกอบ 22 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

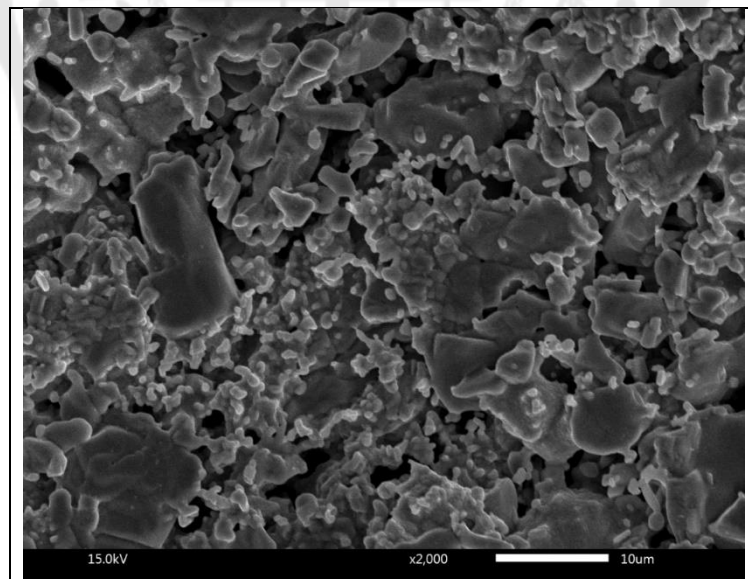
### ตาราง 3 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	8.198
การเจือ $Mn_3O_4$ (กรัม)	0.000
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	2.010
ความหนา (เซนติเมตร)	0.590

### ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 23 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร



ภาพประกอบ 24 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

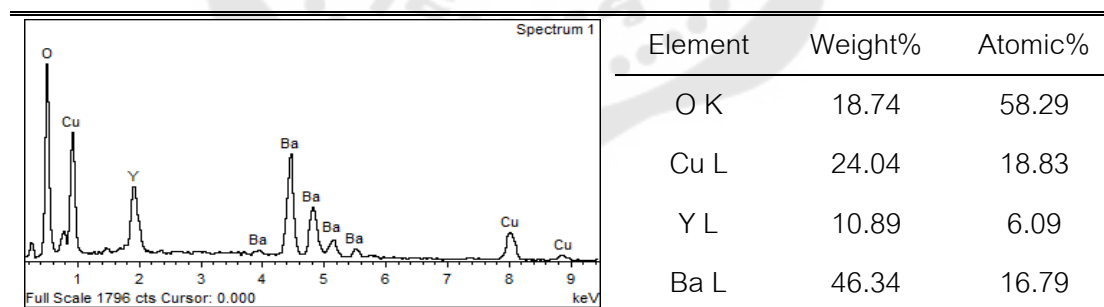
ตาราง 4 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$4.346 \pm 2.959 \mu\text{m}$
รูปทรงของเกรน	รูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	มีรูพรุนมาก รูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ $28.389 \mu\text{m}^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	ขนาดเกรนมีความแตกต่างกันมาก

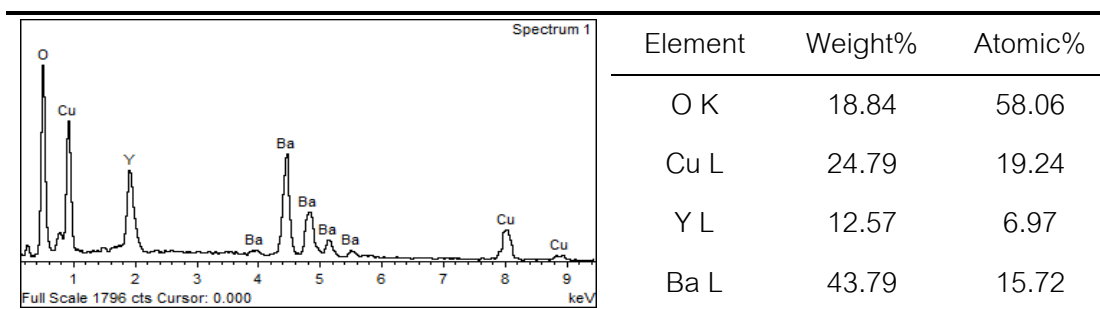
จากตารางที่ 4 พบว่า เกรนของผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาด 4.346 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 2.959 ไมโครเมตร แสดงถึง ความไม่สม่ำเสมอของขนาดเกรน สอดคล้องกับภาพประกอบ 24 จะพบว่าขนาดเกรนมีความแตกต่างกันมาก ระหว่างพื้นผิวมีรูพรุนมาก โดยรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ประมาณ 28.389 ตารางไมโครเมตร

#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

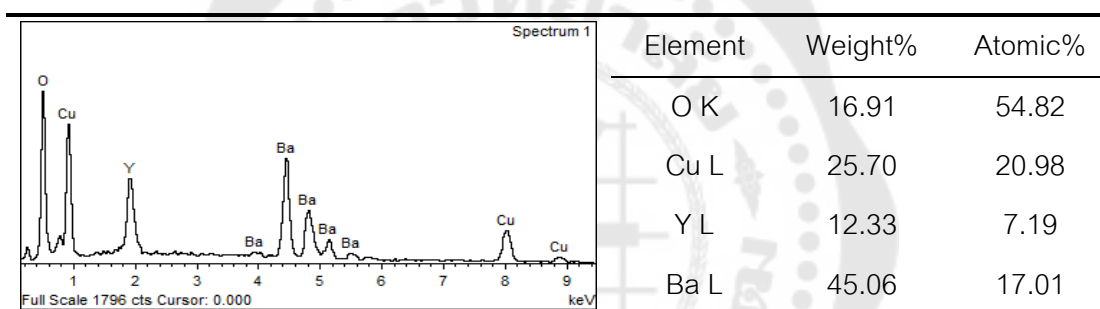
ในการวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งที่เตรียมได้ โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุทั้ง 5 ตำแหน่งและกราฟประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร แสดงดังภาพประกอบ 25-29



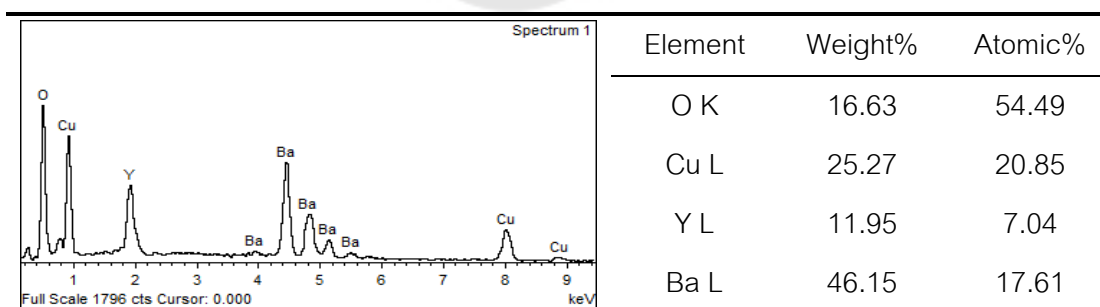
ภาพประกอบ 25 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



ภาพประกอบ 26 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134  
ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

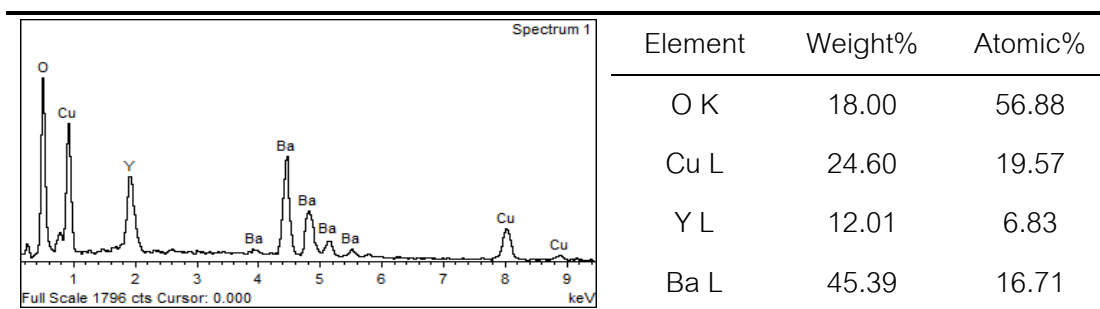


ภาพประกอบ 27 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134  
ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



ภาพประกอบ 28 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134  
ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร





ภาพประกอบ 29 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำเวดจ์ Y134  
ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำเวดจ์ Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร สามารถสรุปได้ดังตาราง 5

ตาราง 5 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำเวดจ์ Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	6.09	6.97	7.19	7.04	6.83	6.82
Ba (แบเรียม)	16.79	15.72	17.01	17.61	16.71	16.77
Cu (คอปเปอร์)	18.83	19.24	20.98	20.85	19.57	19.89
O (ออกซิเจน)	58.29	58.06	54.82	54.49	56.88	56.51
Mn (แมงกานีส)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

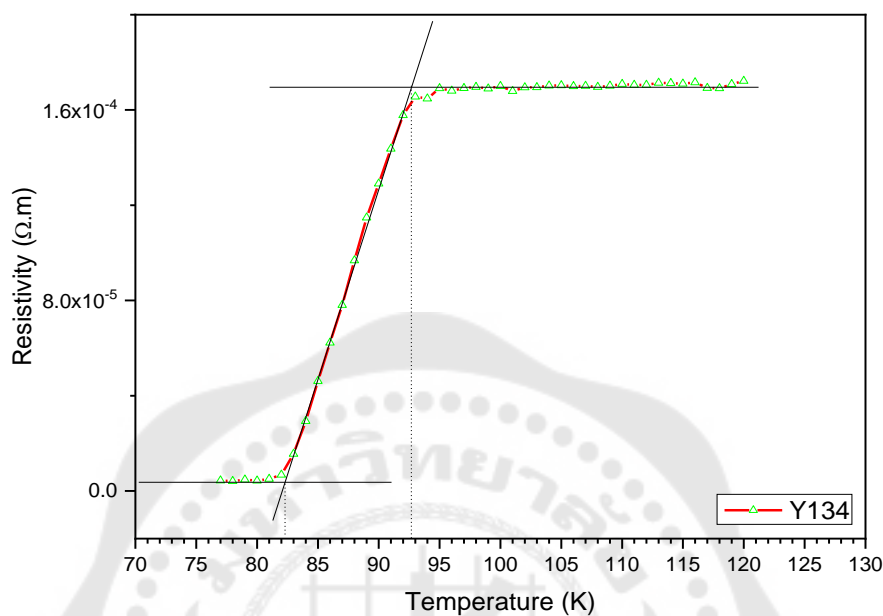
จากตาราง 5 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำเวดจ์ Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 6

ตาราง 6 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย  
โกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (6.82%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	2.46 (16.77%)	3.00	0.54
Cu (คอปเปอร์)	2.92 (19.89%)	4.00	1.08
O (ออกซิเจน)	8.29 (56.51%)	9.50	1.21
Mn (แมงกานีส)	0.00 (0.00%)	0.00	0.00

จากตาราง 6 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจาก  
สมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.54  
(18.00%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 1.08 (27.00%) ออกซิเจนจากการ  
วิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 1.21 (12.74%) และแมงกานีส 0.00 (0.00%)

### ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



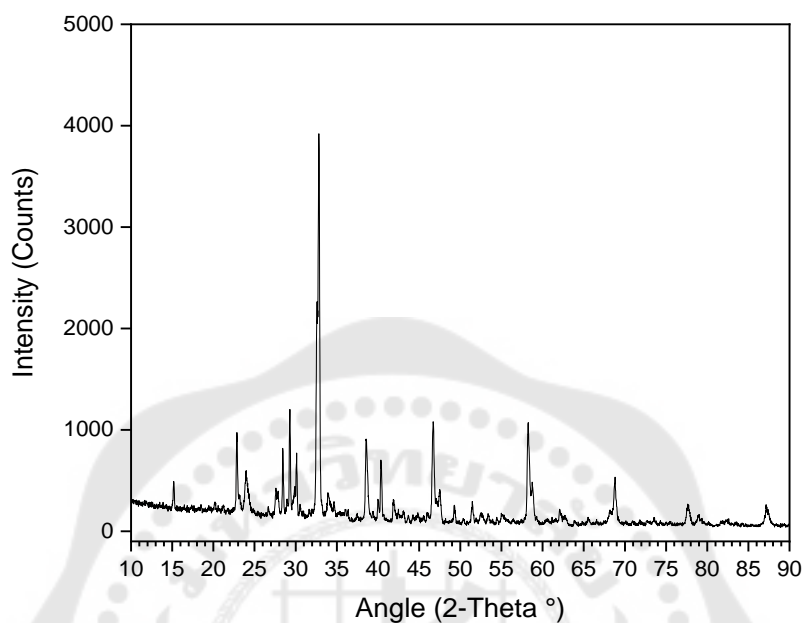
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ตาราง 7 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
$T_C^{onset} (K)$	92.7
$T_C^{offset} (K)$	82.3
$\Delta T_C (K)$	10.4

จากภาพประกอบ 30 และข้อมูลจากตาราง 7 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสารมีอุณหภูมิวิกฤตบนเซตที่ 92.7 เคลวินและอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตที่ 82.3 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 10.4 เคลวิน

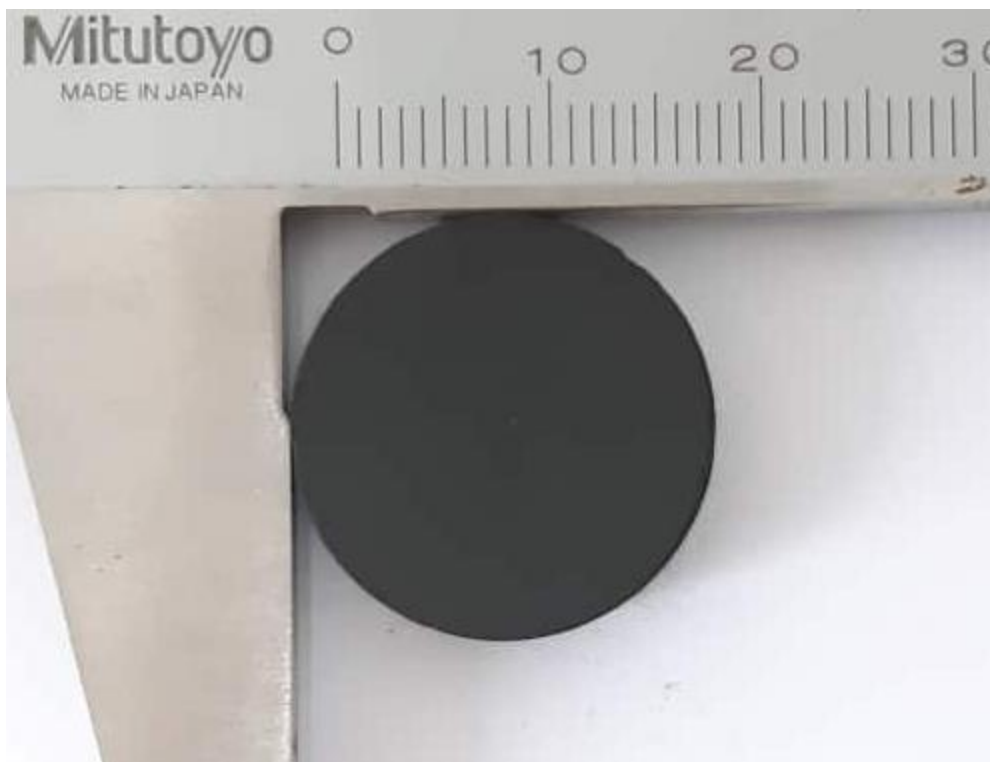
### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 31 กราฟ XRD ของตัวนำยิ่งยวด Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

จากภาพประกอบ 31 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยิ่งยวด  $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$  และเปรียบเทียบกับ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Chainok et al., 2014) จึงสรุปได้ว่าตัวนำยิ่งยวด Y134 ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสารมีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$

1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

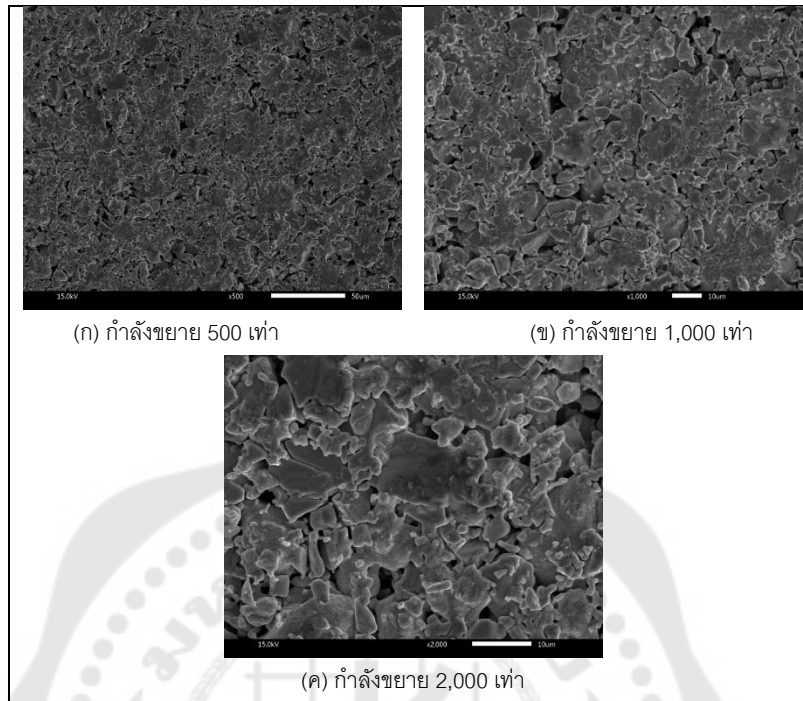


ภาพประกอบ 32 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

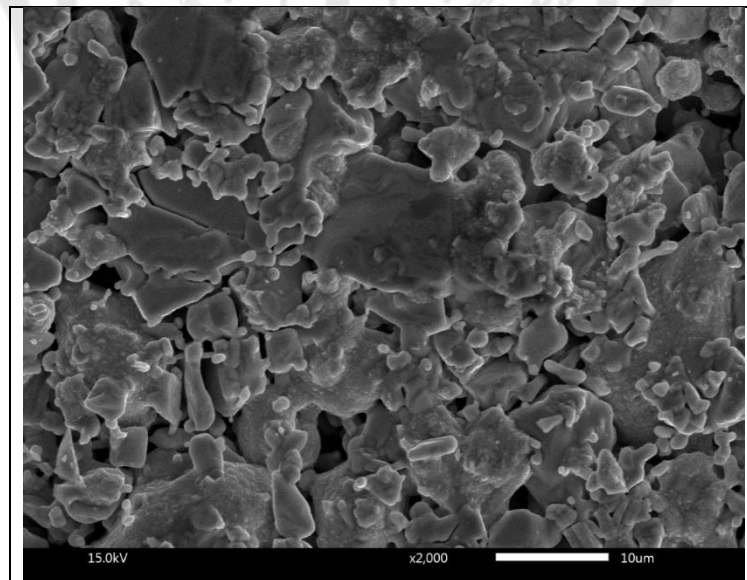
ตาราง 8 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	8.001
การเจือ $Mn_3O_4$ (กรัม)	0.010
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	2.015
ความหนา (เซนติเมตร)	0.560

### ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 33 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโรงแบบสาร



ภาพประกอบ 34 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโรงแบบสาร

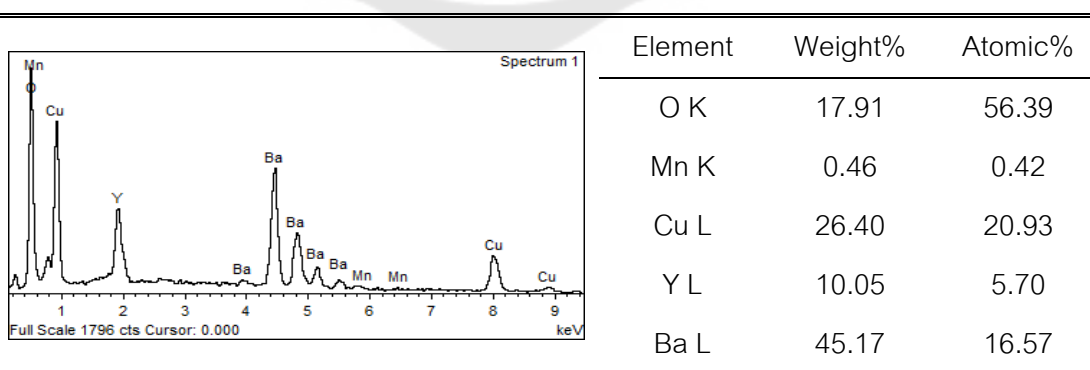
ตาราง 9 แสดงรายละเอียดของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$5.467 \pm 3.159 \mu m$
รูปทรงของเกรน	รูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	ความพรุนค่อนข้างน้อย รูปพรุนใหญ่สุดกินพื้นที่ $34.573 \mu m^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	เกรนค่อนข้างต่อเนื่องและแนบชิดกัน

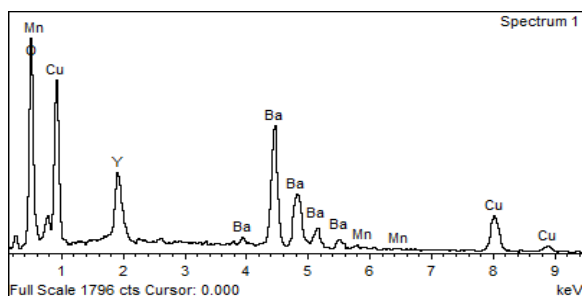
จากตารางที่ 9 พบว่า เกรนของยวดยิ่งตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาดเฉลี่ย 5.467 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 3.159 ไมโครเมตร แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของขนาดเกรน สอดคล้องกับภาพประกอบ 33 จะพบว่า มีเกรนบางเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติ พื้นผิวมีรูพรุนค่อนข้างน้อย เกรนค่อนข้างต่อเนื่องและแนบชิดกัน โดยรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ ประมาณ 34.573 ตารางไมโครเมตร

#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

ในการวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 35-39

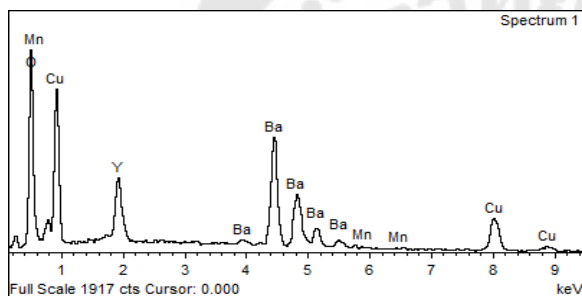


ภาพประกอบ 35 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



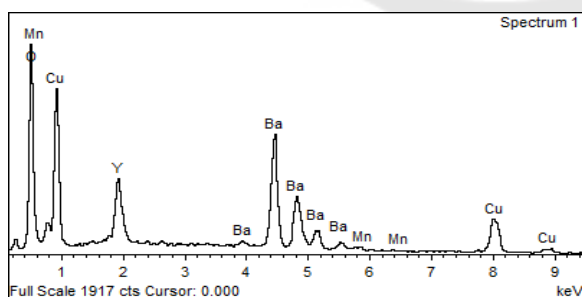
Element	Weight%	Atomic%
O K	17.12	55.18
Mn K	0.08	0.08
Cu L	26.89	21.82
Y L	9.48	5.50
Ba L	46.43	17.43

ภาพประกอบ 36 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



Element	Weight%	Atomic%
O K	17.19	55.15
Mn K	0.02	0.02
Cu L	27.51	22.22
Y L	9.57	5.53
Ba L	45.71	17.08

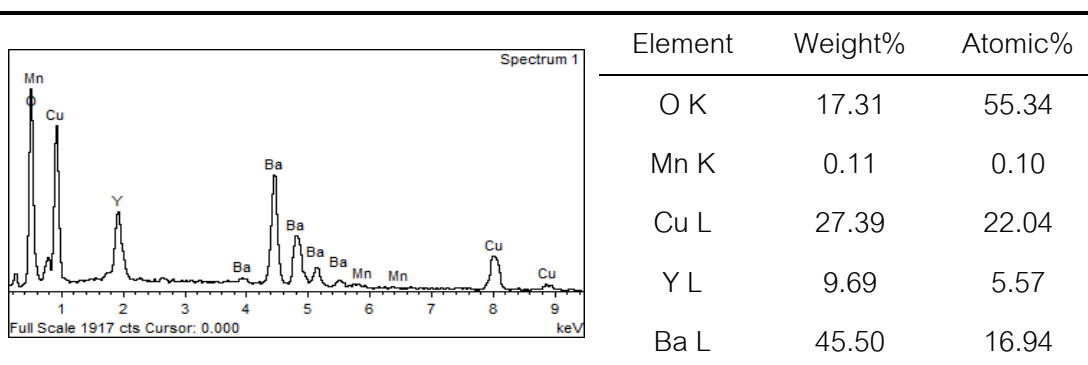
ภาพประกอบ 37 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



Element	Weight%	Atomic%
O K	17.47	55.57
Mn K	0.23	0.21
Cu L	27.57	22.08
Y L	9.22	5.28
Ba L	45.52	16.87

ภาพประกอบ 38 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร





ภาพประกอบ 39 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร สามารถสรุปได้ดังตาราง 10

ตาราง 10 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	5.70	5.50	5.53	5.28	5.57	5.52
Ba (แบเรียม)	16.57	17.43	17.08	16.87	16.94	16.98
Cu (คอปเปอร์)	20.93	21.82	22.22	22.08	22.04	21.82
O (ออกซิเจน)	56.39	55.18	55.15	55.57	55.34	55.53
Mn (แมงกานีส)	0.42	0.08	0.02	0.21	0.10	0.17

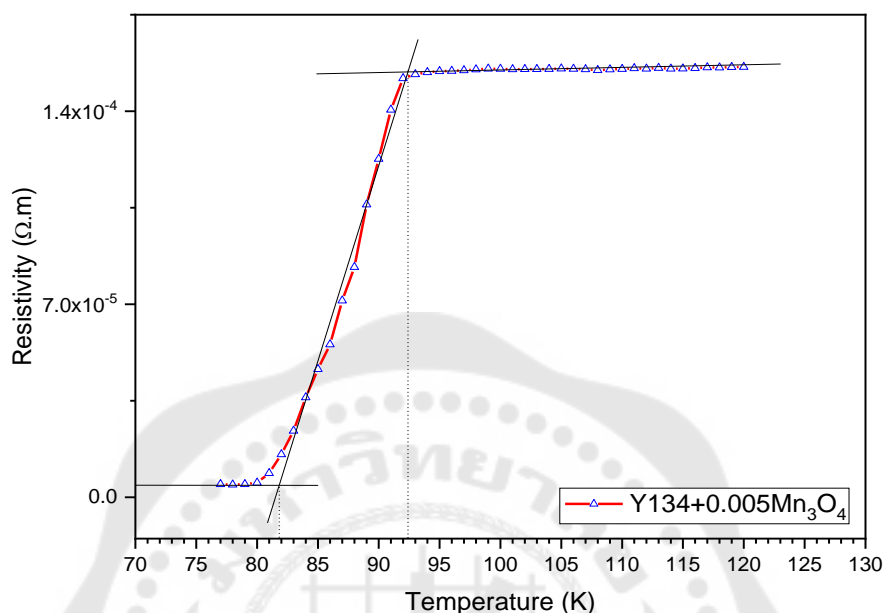
จากตาราง 10 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 11

ตาราง 11 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (5.52%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	3.08 (16.98%)	3.00	0.08
Cu (คอปเปอร์)	3.95 (21.82%)	4.00	0.05
O (ออกซิเจน)	10.06 (55.53%)	9.52	0.54
Mn (แมงกานีส)	0.03 (0.17%)	0.02	0.01

จากตาราง 11 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจากสมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.08 (2.67%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.05 (1.25%) ออกซิเจนจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.54 (5.67%) และแมงกานีสจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.01 (50.00%)

### ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



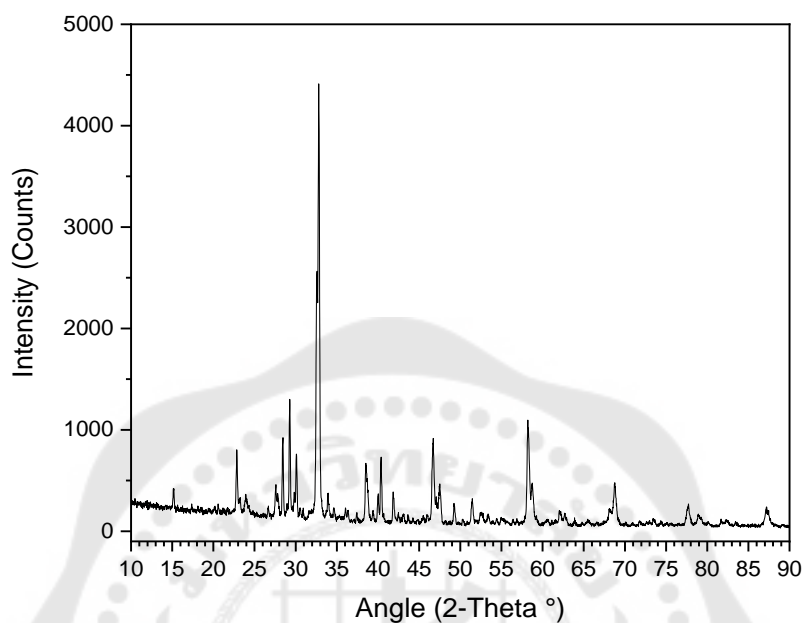
ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ตาราง 12 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 0.005 โมล
$T_C^{onset} (K)$	92.3
$T_C^{offset} (K)$	82.0
$\Delta T_C (K)$	10.3

จากภาพประกอบ 40 และข้อมูลจากตาราง 12 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสารมีอุณหภูมิวิกฤตบนเซตที่ 92.3 เคลวินและอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตที่ 82.0 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 10.3 เคลวิน

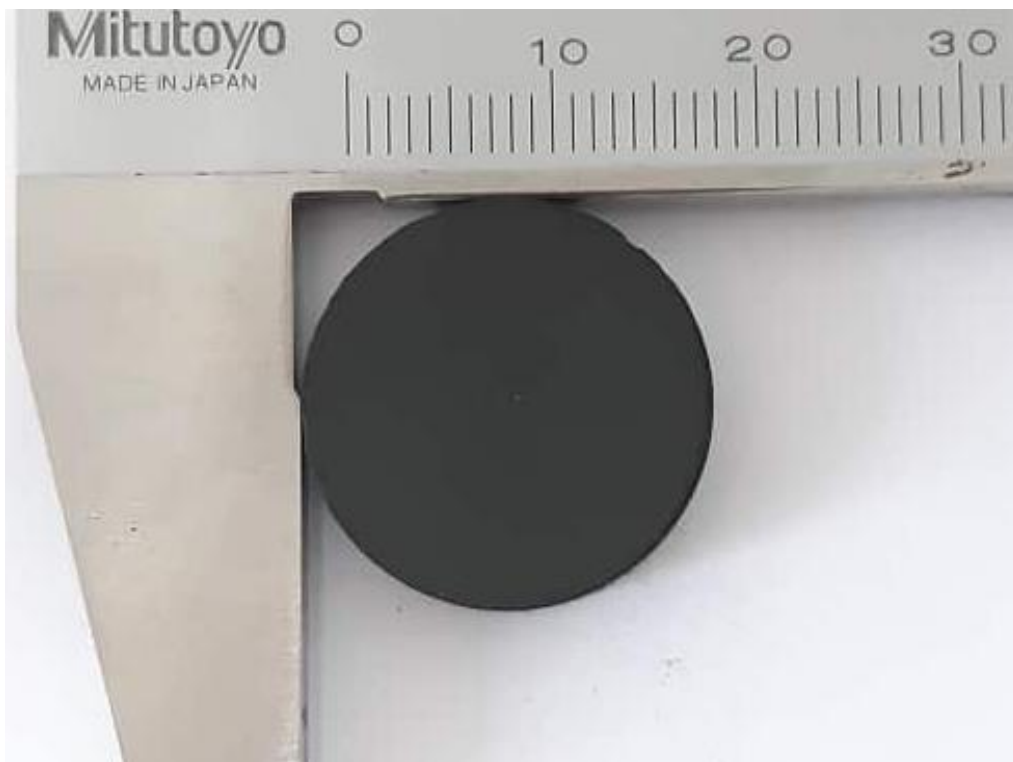
### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 41 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

จากภาพประกอบ 41 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง  $YBa_3Cu_4O_x$  และเปรียบเทียบกับ  $YBa_2Cu_3O_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสารมีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$  แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์มีผลต่อโครงสร้างหลักของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 น้อยมาก

1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

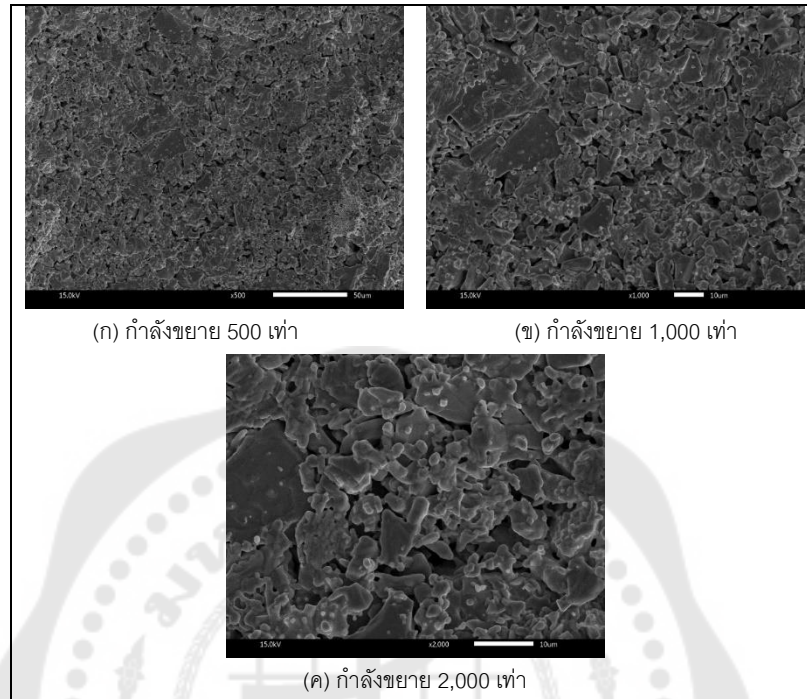


ภาพประกอบ 42 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

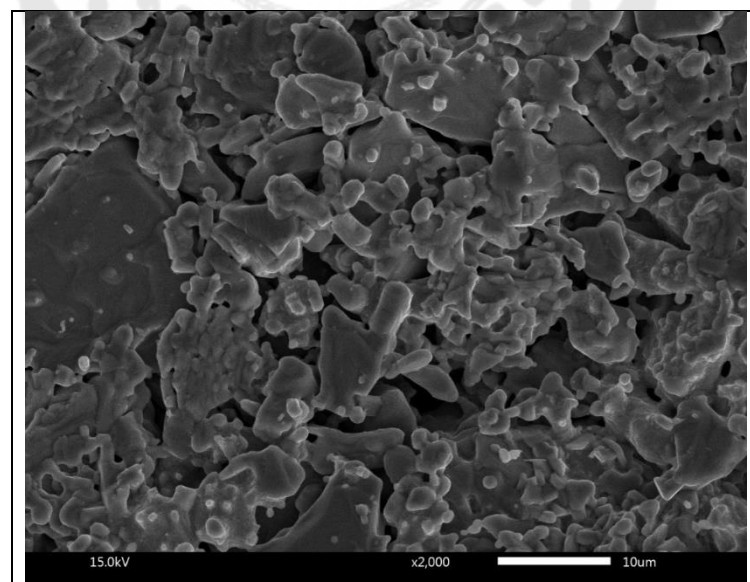
ตาราง 13 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	8.072
การเจือ $Mn_3O_4$ (กรัม)	0.020
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	2.010
ความหนา (เซนติเมตร)	0.560

### ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 43 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร



ภาพประกอบ 44 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

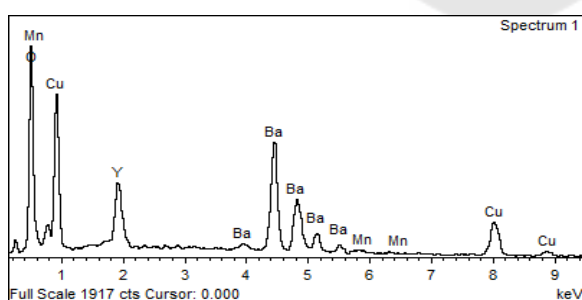
ตาราง 14 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$3.667 \pm 3.367 \mu m$
รูปทรงของเกรน	รูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	ความพรุนค่อนข้างมาก รูปพรุนใหญ่สุดกินพื้นที่ $19.306 \mu m^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	เกรนมีความต่อเนื่องกัน แม้จะมีรูปพรุนอยู่บ้าง

จากตารางที่ 14 พบว่า เกรนของผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาดเฉลี่ย 3.667 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 3.367 ไมโครเมตร แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของขนาดเกรน สอดคล้องกับภาพประกอบ 42 จะพบว่ามีเกรนบางเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติแทรกอยู่ พื้นผิวมีรูปพรุนค่อนข้างมาก เกรนค่อนข้างต่อเนื่องแม้จะมีรูปพรุน โดยรูปพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ ประมาณ 19.306 ตารางไมโครเมตร

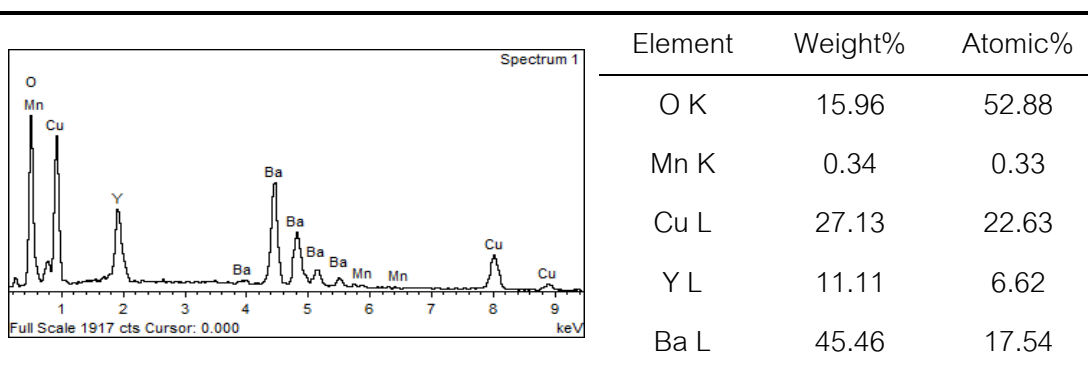
#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

ในการวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 45-49

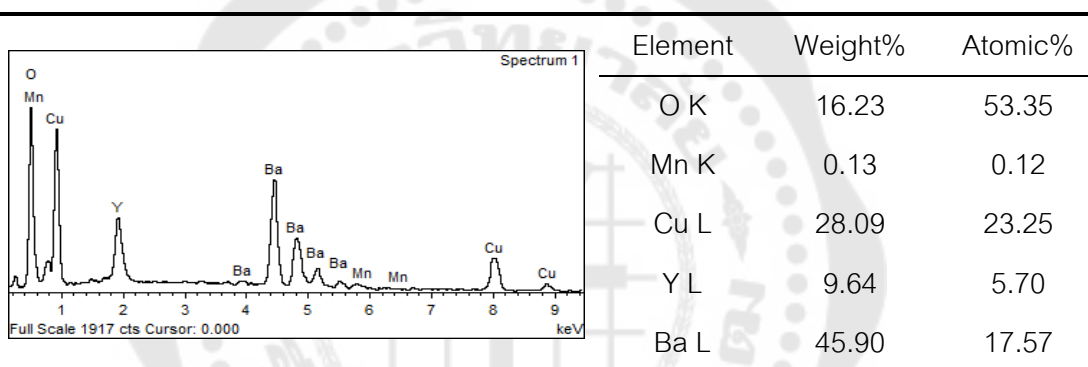


Element	Weight%	Atomic%
O K	17.93	56.35
Mn K	0.33	0.31
Cu L	27.04	21.40
Y L	9.62	5.44
Ba L	45.08	16.51

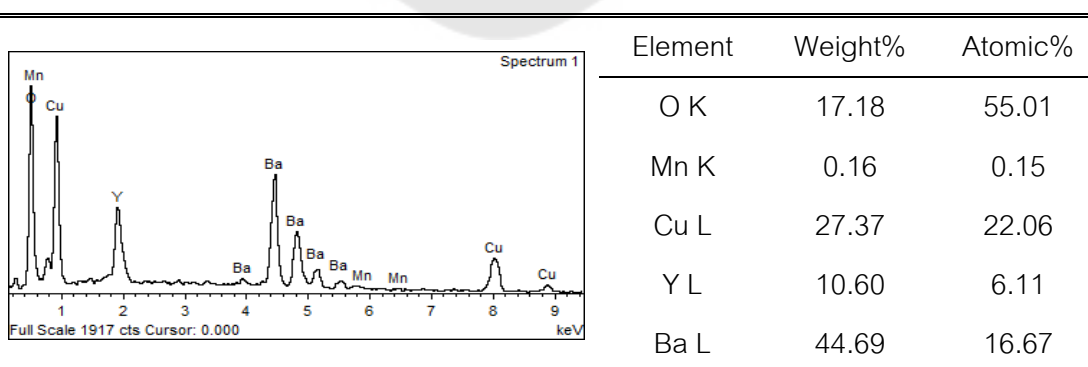
ภาพประกอบ 45 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



ภาพประกอบ 46 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

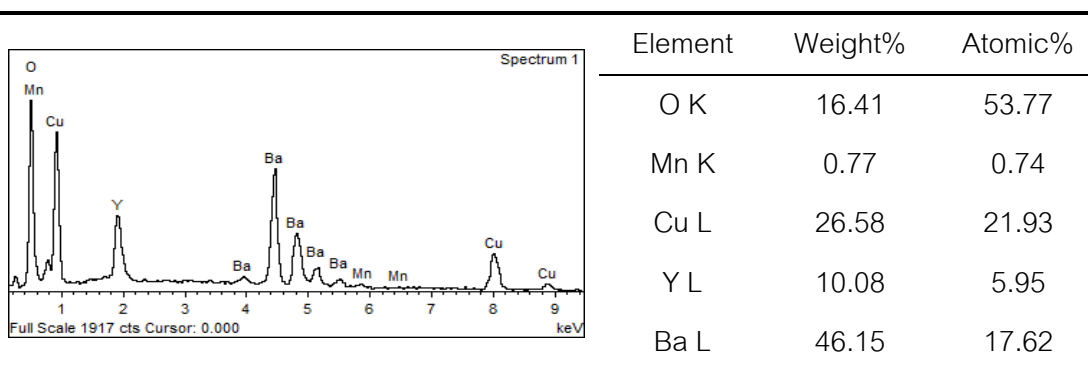


ภาพประกอบ 47 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



ภาพประกอบ 48 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร





ภาพประกอบ 49 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร สามารถสรุปได้ดังตาราง 15

ตาราง 15 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	5.44	6.62	5.70	6.11	5.95	5.96
Ba (แบเรียม)	16.51	17.54	17.57	16.67	17.62	17.18
Cu (คอปเปอร์)	21.40	22.63	23.25	22.06	21.93	22.25
O (ออกซิเจน)	56.35	52.88	53.35	55.01	53.77	54.27
Mn (แมงกานีส)	0.31	0.33	0.12	0.15	0.74	0.33

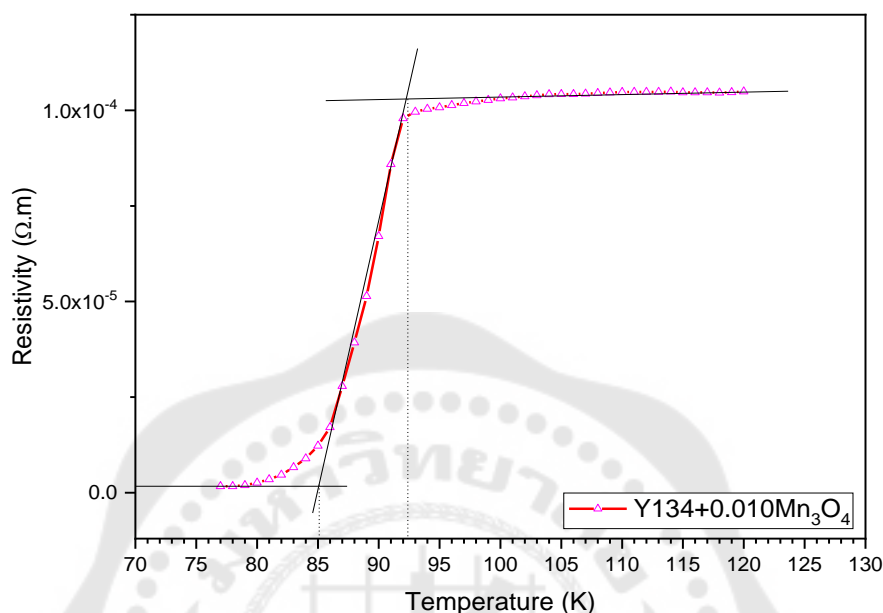
จากตาราง 15 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 16

ตาราง 16 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (5.96%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	2.88 (17.18%)	3.00	0.12
Cu (คอปเปอร์)	3.73 (22.25%)	4.00	0.27
O (ออกซิเจน)	9.12 (54.27%)	9.54	0.42
Mn (แมงกานีส)	0.05 (0.33%)	0.03	0.02

จากตาราง 16 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจากสมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.12 (4.00%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.27 (6.75%) ออกซิเจนจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.42 (4.40%) และแมงกานีสจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.02 (66.67%)

### ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



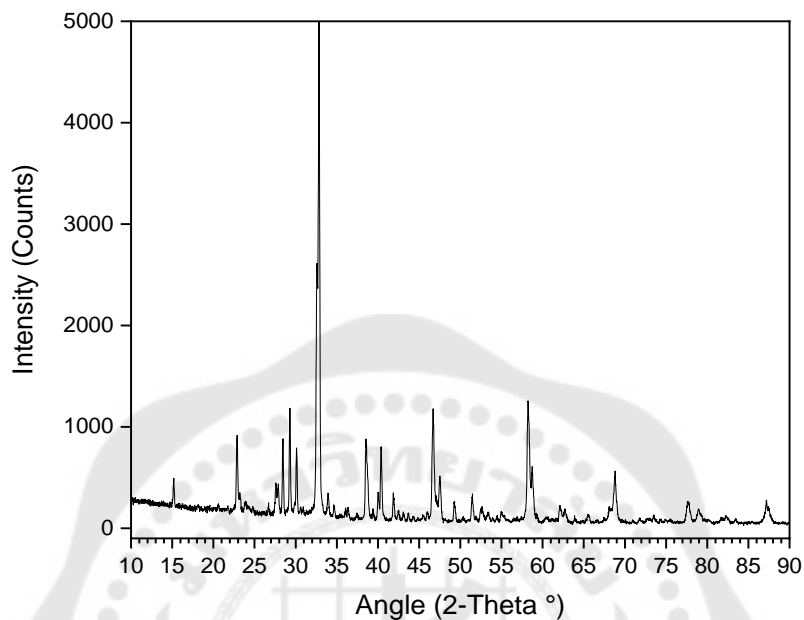
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

ตาราง 17 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 0.010 โมล
$T_C^{onset} (K)$	92.5
$T_C^{offset} (K)$	85.0
$\Delta T_C (K)$	7.5

จากภาพประกอบ 50 และข้อมูลจากตาราง 17 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสารมีอุณหภูมิวิกฤตบนเซตที่ 92.5 เคลวินและอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตที่ 85.0 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 7.5 เคลวิน

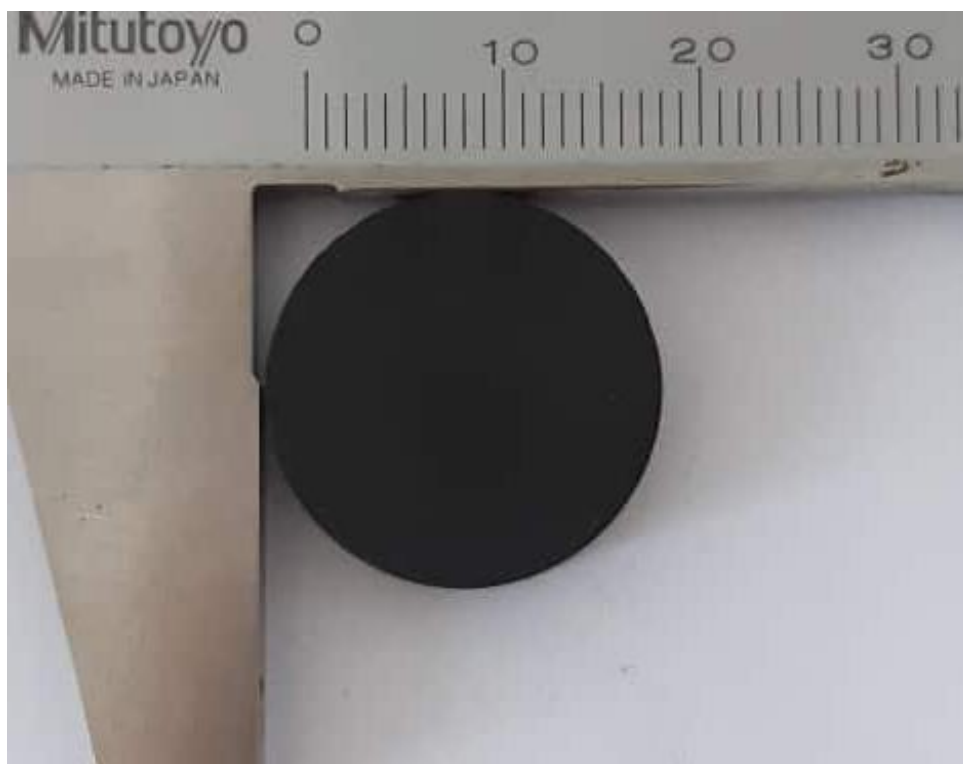
### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 51 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

จากภาพประกอบ 51 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง  $YBa_3Cu_4O_x$  และเปรียบเทียบกับ  $YBa_2Cu_3O_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสารมีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$  แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์มีผลต่อโครงสร้างหลักของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 น้อยมาก

1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

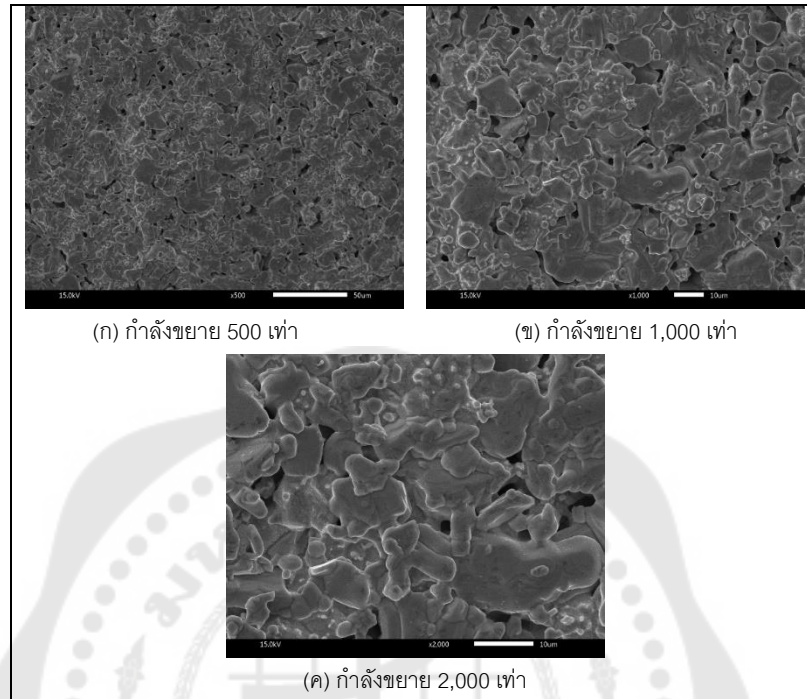


ภาพประกอบ 52 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

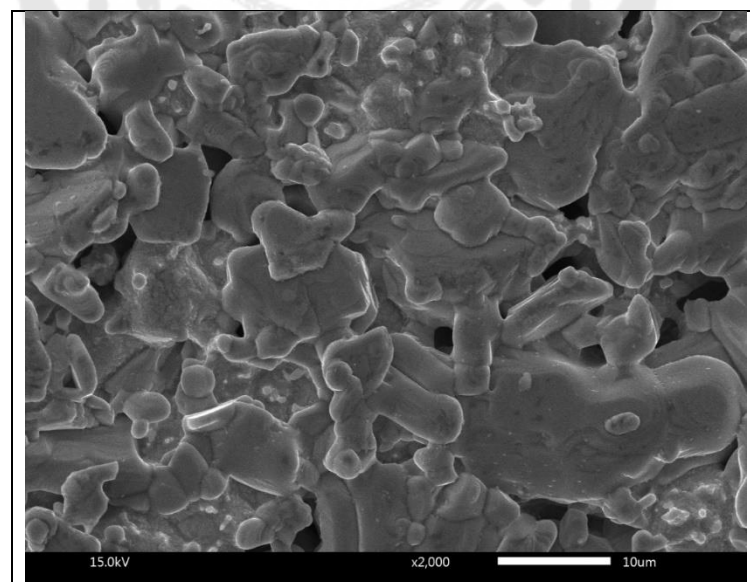
ตาราง 18 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	8.087
การเจือ $\text{Mn}_3\text{O}_4$ (กรัม)	0.030
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	2.010
ความหนา (เซนติเมตร)	0.565

### ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 53 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโรงแบบดสาร



ภาพประกอบ 54 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโรงแบบดสาร

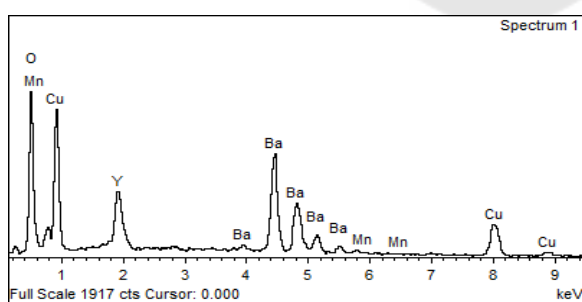
ตาราง 19 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$4.714 \pm 3.438 \mu m$
รูปร่างของเกรน	รูปร่างหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	รูพรุนน้อย รูพรุนขนาดใหญ่สุดกินพื้นที่ $12.289 \mu m^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	ขนาดเกรนสม่ำเสมอ ต่อเนื่องและแนบชิดกัน

จากตารางที่ 19 พบว่า เกรนของผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร เป็นรูปร่างหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาดเฉลี่ย 4.714 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 3.438 ไมโครเมตร สอดคล้องกับภาพประกอบ 51 จะพบว่ามีเกรนบางเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติแต่ค่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวมีรูพรุนค่อนข้างน้อย เกรนต่อเนื่องและแนบชิดกัน โดยรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ ประมาณ 12.289 ตารางไมโครเมตร

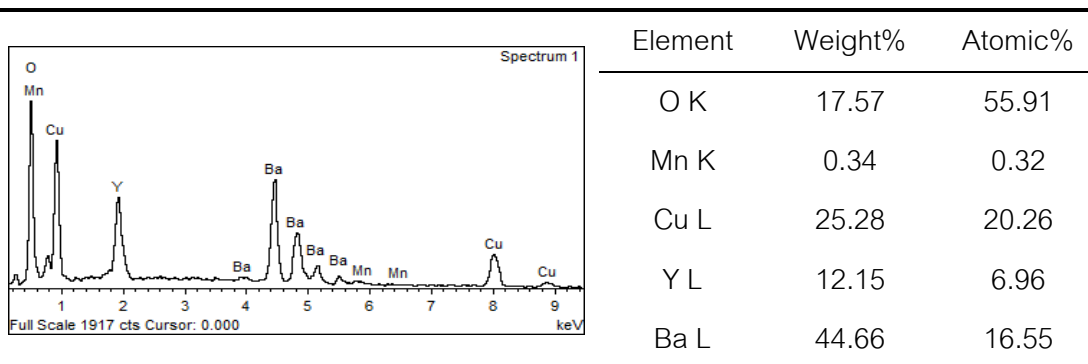
### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

ในการวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 55-59

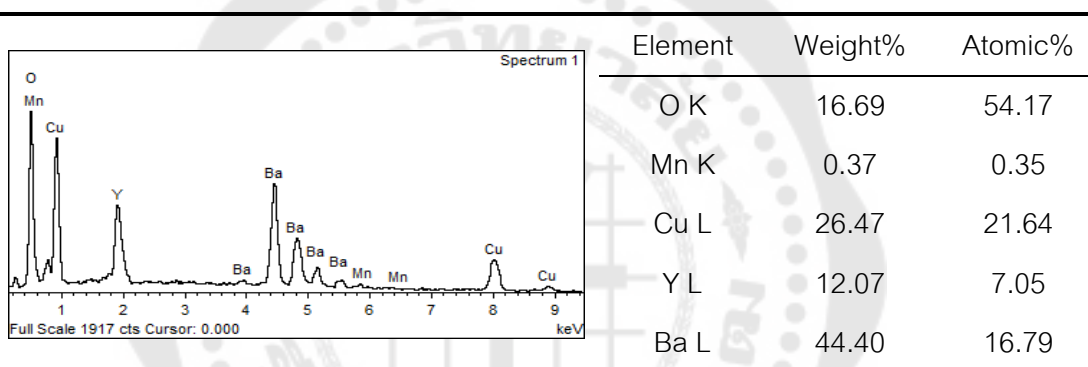


Element	Weight%	Atomic%
O K	15.69	52.45
Mn K	0.03	0.03
Cu L	28.13	23.68
Y L	9.34	5.62
Ba L	46.81	18.23

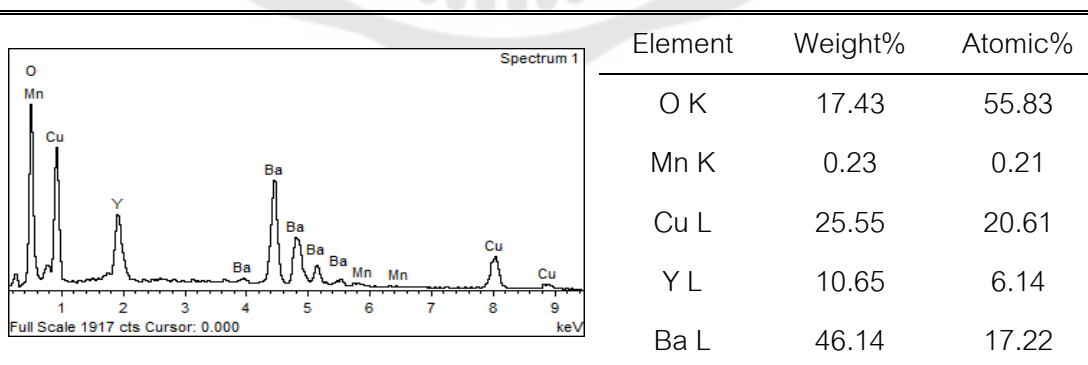
ภาพประกอบ 55 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร



ภาพประกอบ 56 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

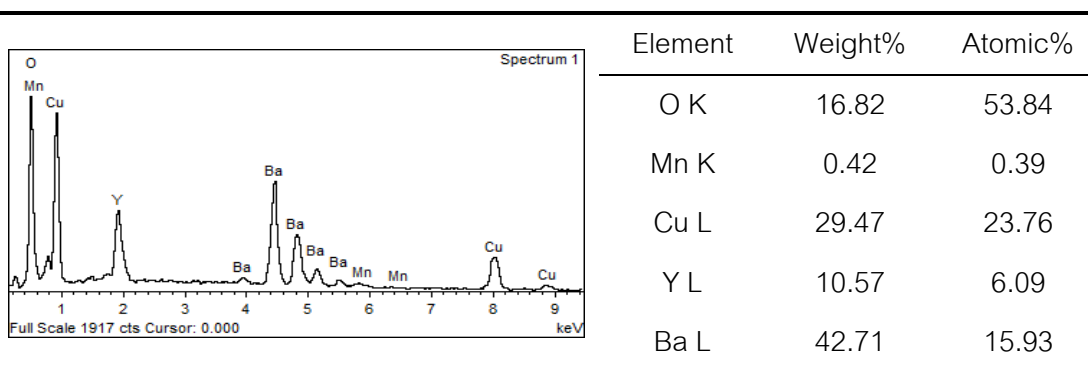


ภาพประกอบ 57 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



ภาพประกอบ 58 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร





ภาพประกอบ 59 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร สามารถสรุปได้ดังตาราง 20

ตาราง 20 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	5.62	6.96	7.05	6.14	6.09	6.37
Ba (แบเรียม)	18.23	16.55	16.79	17.22	15.93	16.94
Cu (คอปเปอร์)	23.68	20.26	21.64	20.61	23.76	21.99
O (ออกซิเจน)	52.45	55.91	54.17	55.83	53.84	54.44
Mn (แมงกานีส)	0.03	0.32	0.35	0.21	0.39	0.26

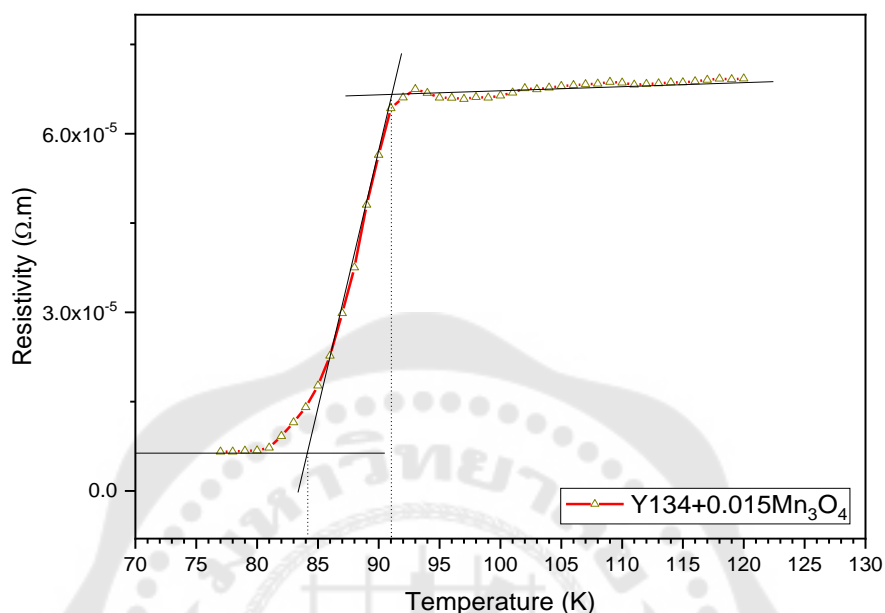
จากตาราง 20 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 21

ตาราง 21 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (6.37%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	2.66 (16.94%)	3.00	0.34
Cu (คอปเปอร์)	3.45 (21.99%)	4.00	0.55
O (ออกซิเจน)	8.55 (54.44%)	9.56	1.01
Mn (แมงกานีส)	0.04 (0.26%)	0.05	0.01

จากตาราง 21 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจากสมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.34 (11.33%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.55 (13.75%) ออกซิเจนจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 1.01 (10.56%) และแมงกานีสจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.01 (20.00%)

### ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



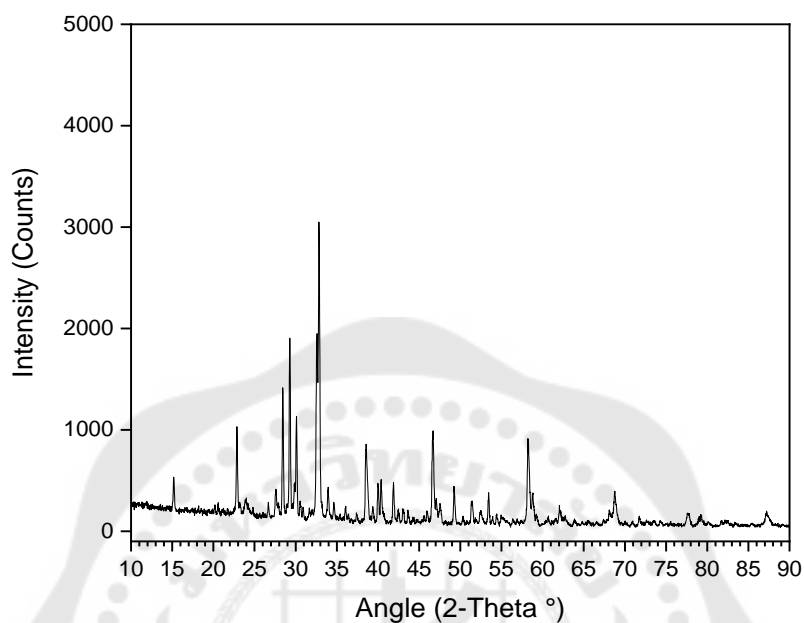
ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ตาราง 22 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 0.015 โมล
$T_C^{onset} (K)$	91.0
$T_C^{offset} (K)$	84.3
$\Delta T_C (K)$	6.7

จากภาพประกอบ 60 และข้อมูลจากตาราง 22 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสารมีอุณหภูมิวิกฤตบนเซตที่ 91.0 เคลวินและอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตที่ 84.3 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 6.7 เคลวิน

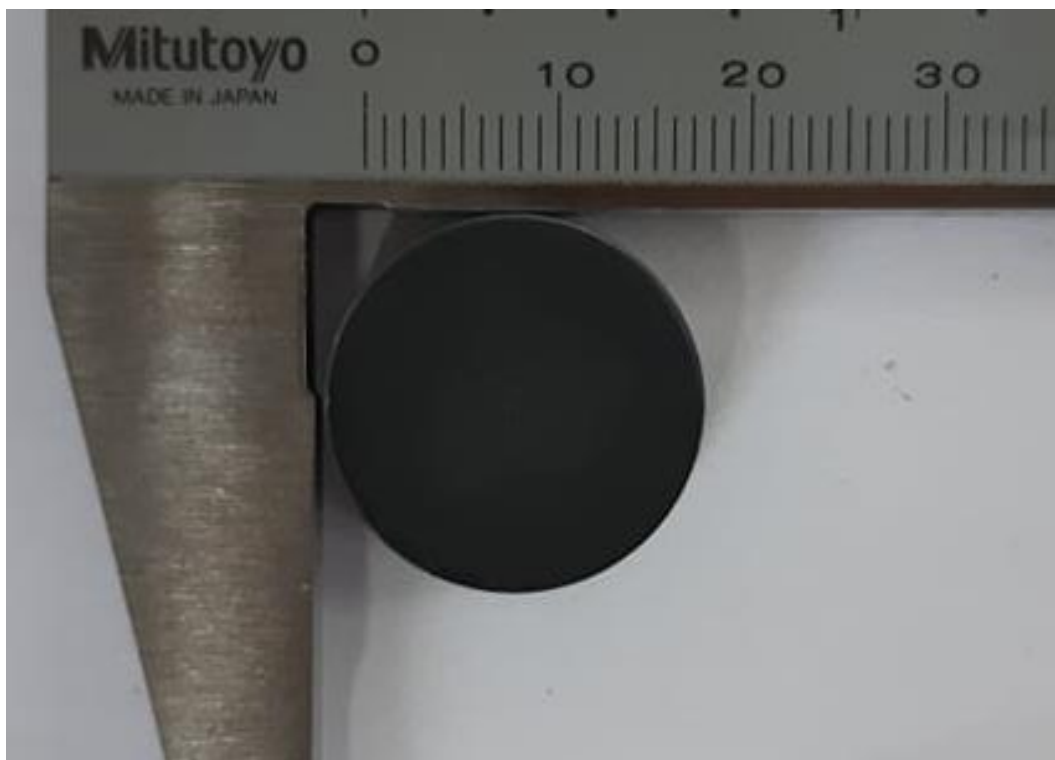
### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 61 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสาร

จากภาพประกอบ 61 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง  $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$  และเปรียบเทียบกับ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยโถงบดสารมีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$  แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์มีผลต่อโครงสร้างหลักของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 น้อยมาก

2. การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์  
 2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

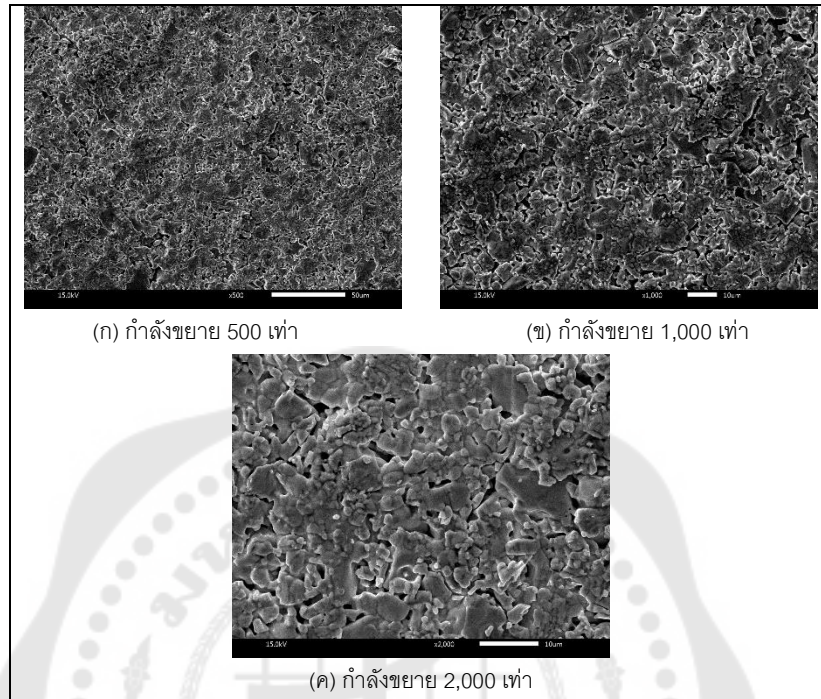


ภาพประกอบ 62 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

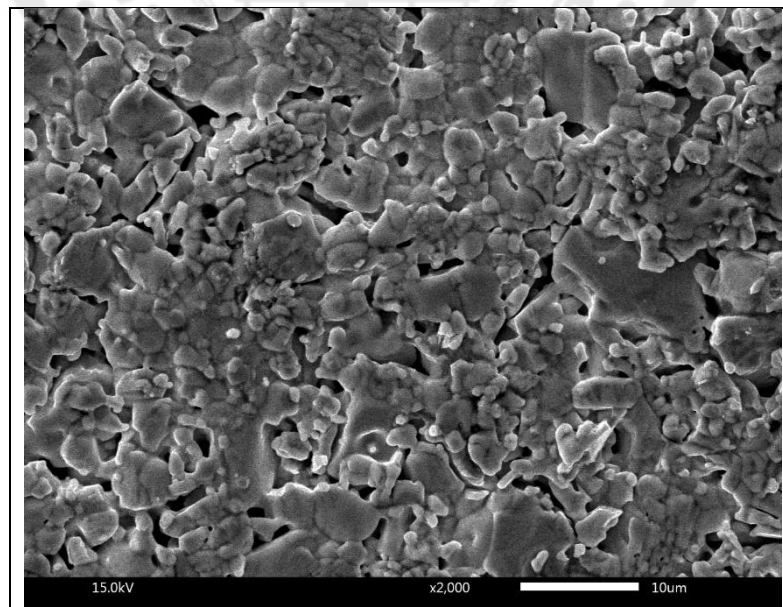
ตาราง 23 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	7.142
การเจือ $Mn_3O_4$ (กรัม)	0.000
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	1.998
ความหนา (เซนติเมตร)	0.462

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 63 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 64 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

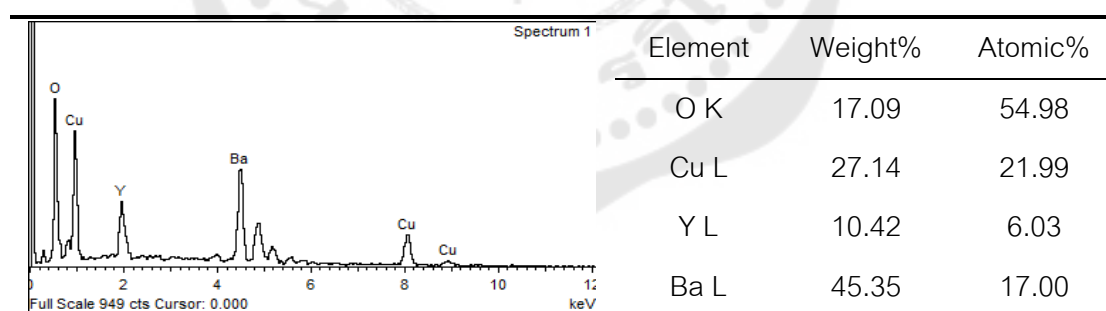
ตาราง 24 แสดงรายละเอียดของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$3.591 \pm 1.708 \mu\text{m}$
รูปทรงของเกรน	รูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	ความพรุนน้อย รูปพรุนขนาดใหญ่สุดกินพื้นที่ $7.314 \mu\text{m}^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	ขนาดเกรนสม่ำเสมอ ต่อเนื่องและแนบชิดกัน

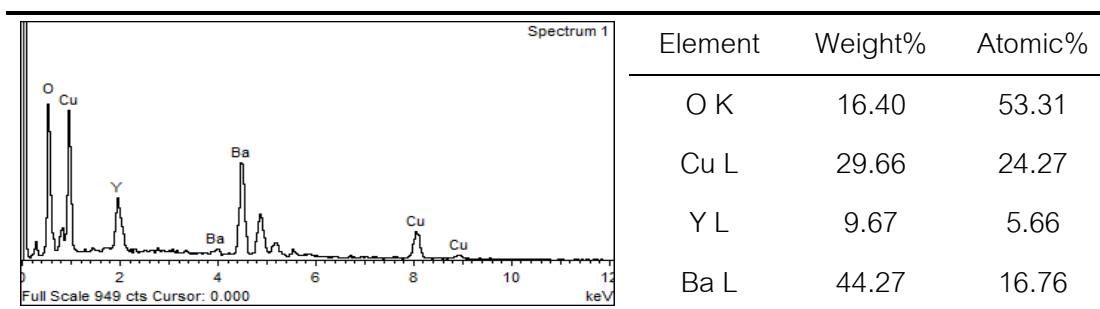
จากตารางที่ 24 พบว่า เกรนของยวดยิ่งตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาดเฉลี่ย 3,591 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1.708 ไมโครเมตร แสดงถึง ความสม่ำเสมอของขนาดเกรน สอดคล้องกับภาพประกอบ 60 จะพบว่าขนาดของเกรนส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันมาก พื้นผิวมีรูปพรุนน้อย เกรนต่อเนื่องและแนบชิดกัน โดยรูปพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ ประมาณ 7.314 ตารางไมโครเมตร

#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

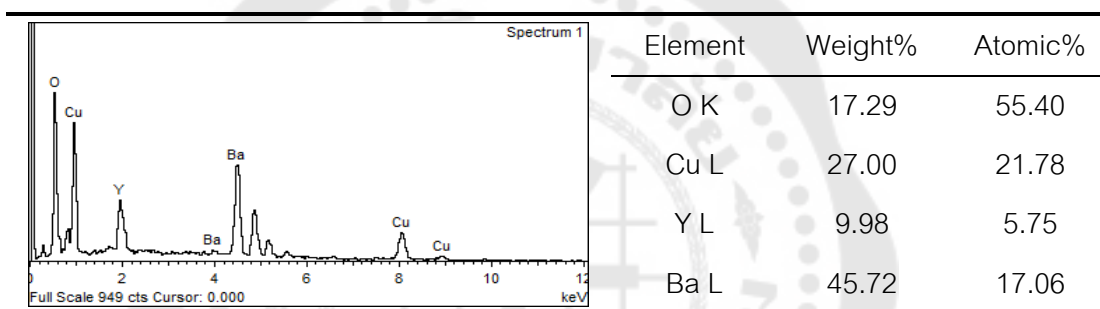
ในการวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 65-69



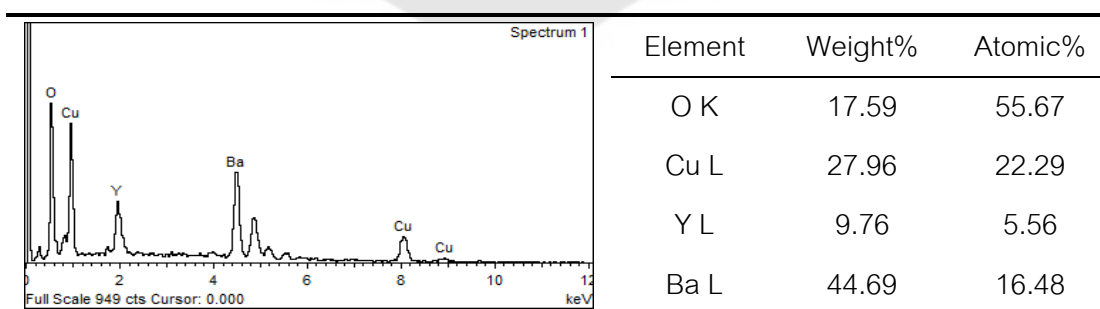
ภาพประกอบ 65 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 66 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำเวดจ์ Y134  
ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

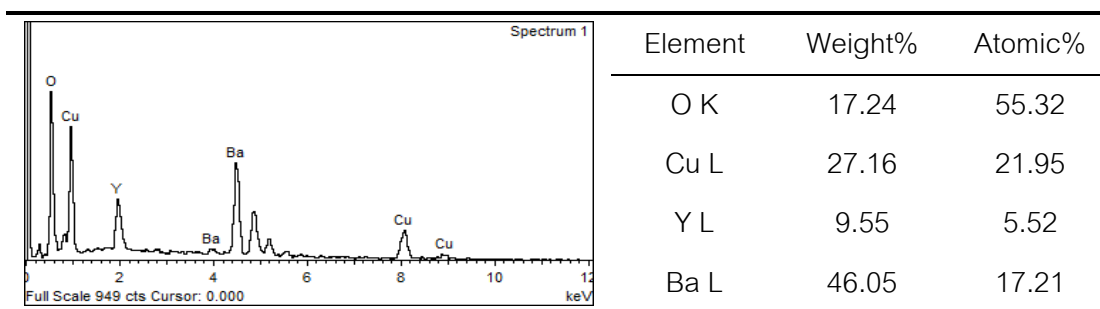


ภาพประกอบ 67 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำเวดจ์ Y134  
ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 68 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำเวดจ์ Y134  
ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์





ภาพประกอบ 69 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำเวดจ์ Y134  
ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำเวดจ์ Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ สามารถสรุปได้ดังตาราง 25

ตาราง 25 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำเวดจ์ Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	6.03	5.66	5.75	5.56	5.52	5.70
Ba (แบเรียม)	17.00	16.76	17.06	16.48	17.21	16.90
Cu (คอปเปอร์)	21.99	24.27	21.78	22.29	21.95	22.46
O (ออกซิเจน)	54.98	53.31	55.40	55.67	55.32	54.94
Mn (แมงกานีส)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

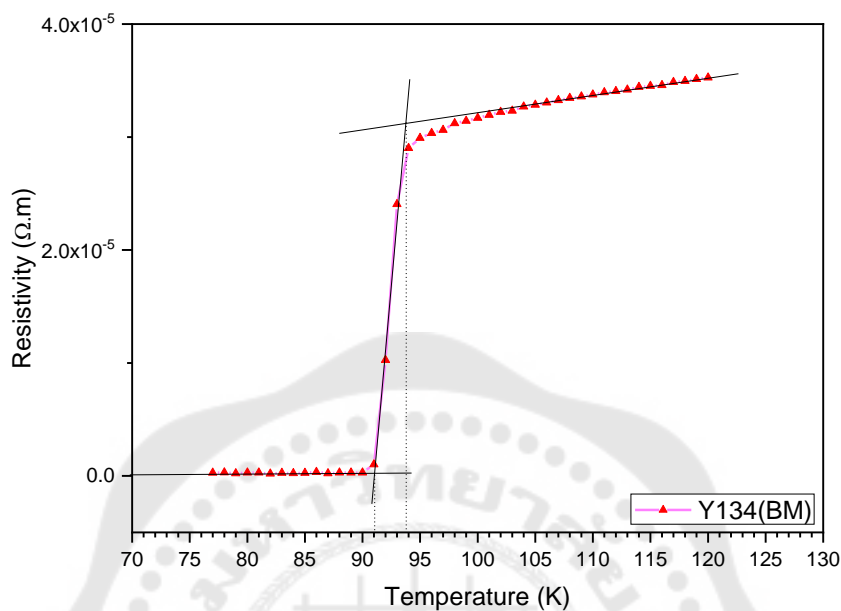
จากตาราง 25 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำเวดจ์ Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 26

ตาราง 26 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (5.70%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	2.95 (16.90%)	3.00	0.05
Cu (คอปเปอร์)	3.94 (22.46%)	4.00	0.06
O (ออกซิเจน)	9.64 (54.94%)	9.50	0.14
Mn (แมงกานีส)	0.00 (0.00%)	0.00	0.00

จากตาราง 26 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจากสมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.05 (1.67%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.06 (1.50%) และออกซิเจนจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.14 (1.47%)

### ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



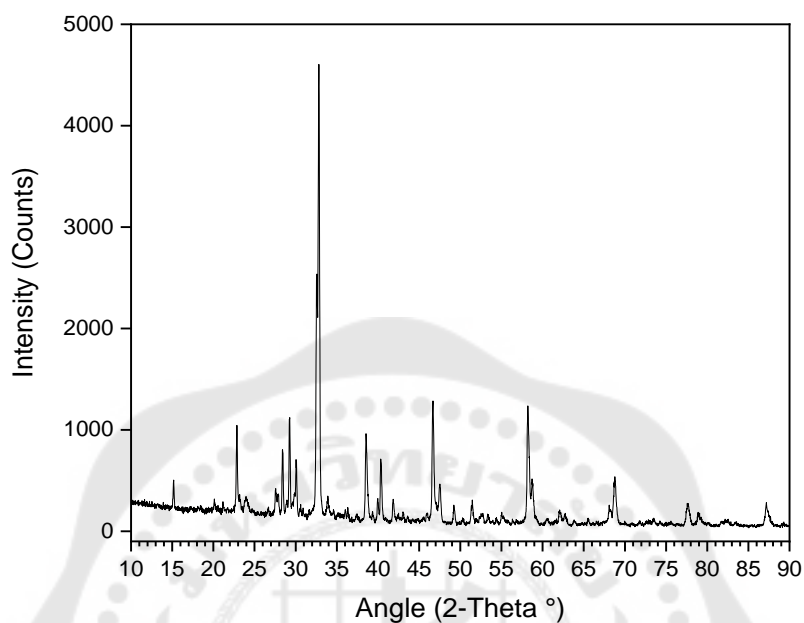
ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ตาราง 27 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำวดยิ่ง Y134
$T_C^{onset} (K)$	94.0
$T_C^{offset} (K)$	91.0
$\Delta T_C (K)$	3.0

จากภาพประกอบ 70 และข้อมูลจากตาราง 27 พบว่า ตัวนำวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ มีอุณหภูมิวิกฤต onset ที่ 94.0 เคลวินและอุณหภูมิวิกฤต offset ที่ 91.0 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 3.0 เคลวิน

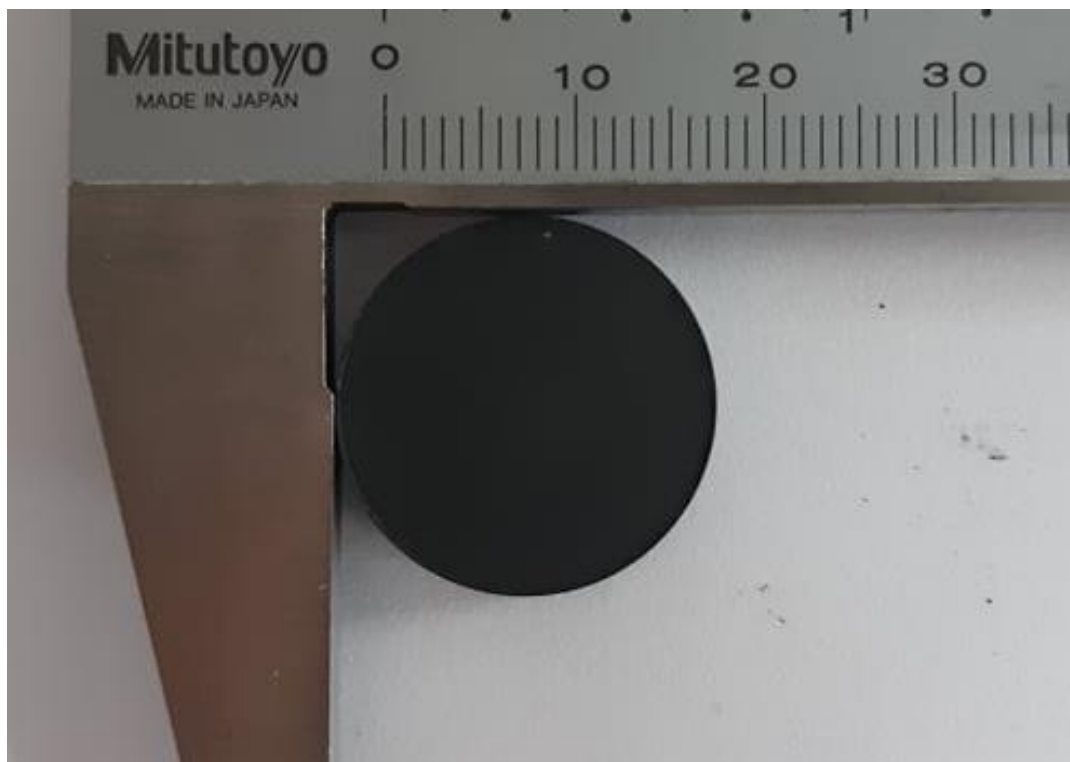
### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 71 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากภาพประกอบ 71 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง  $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$  และเปรียบเทียบกับ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$

2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

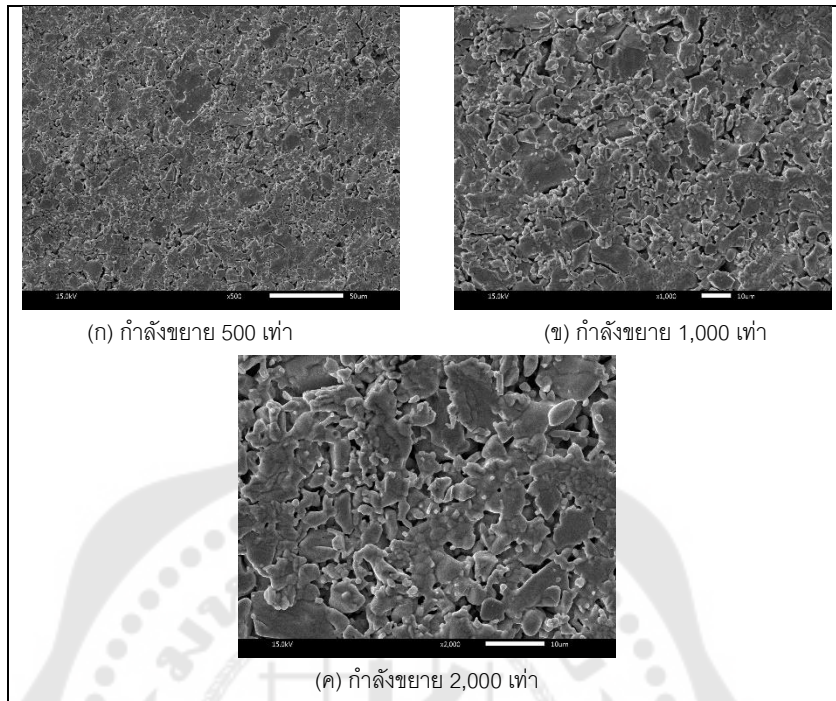


ภาพประกอบ 72 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

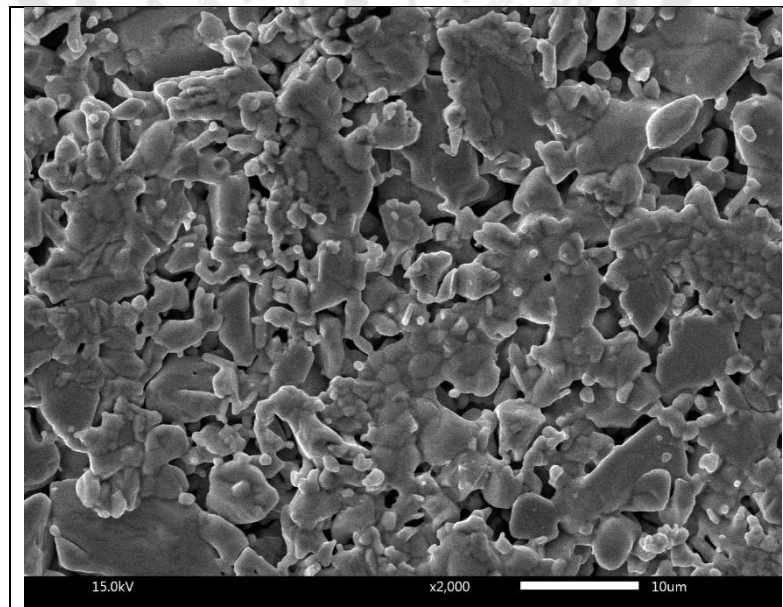
ตาราง 28 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	7.815
การเจือ $Mn_3O_4$ (กรัม)	0.010
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	1.999
ความหนา (เซนติเมตร)	0.521

### ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 73 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 74 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

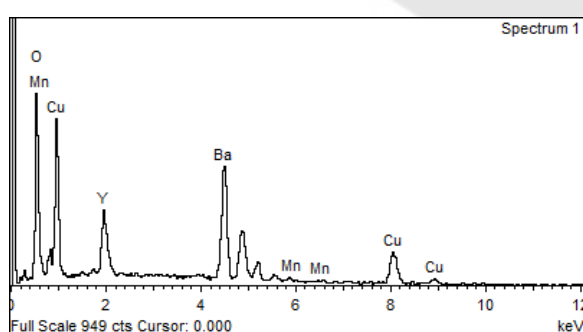
ตาราง 29 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$3.770 \pm 1.083 \mu m$
รูปทรงของเกรน	รูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	ความพรุนน้อย รูปพรุนขนาดใหญ่สุดกินพื้นที่ $10.769 \mu m^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	ขนาดเกรนสม่ำเสมอ ต่อเนื่องและแนบชิดกัน

จากตารางที่ 29 พบว่า เกรนของผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาดเฉลี่ย 3.770 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1.083 ไมโครเมตร แสดงถึง ความสม่ำเสมอของขนาดเกรน สอดคล้องกับภาพประกอบ 69 จะพบว่าเกรนส่วนใหญ่มีขนาดใกล้เคียงกัน พื้นผิวมีรูพรุนน้อย เกรนต่อเนื่องและแนบชิดกัน โดยรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ ประมาณ 10.769 ตารางไมโครเมตร

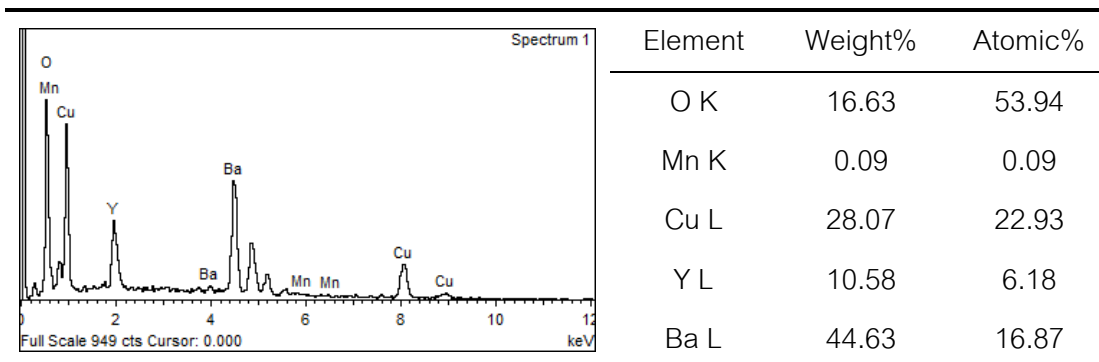
#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

ในการวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 75-79

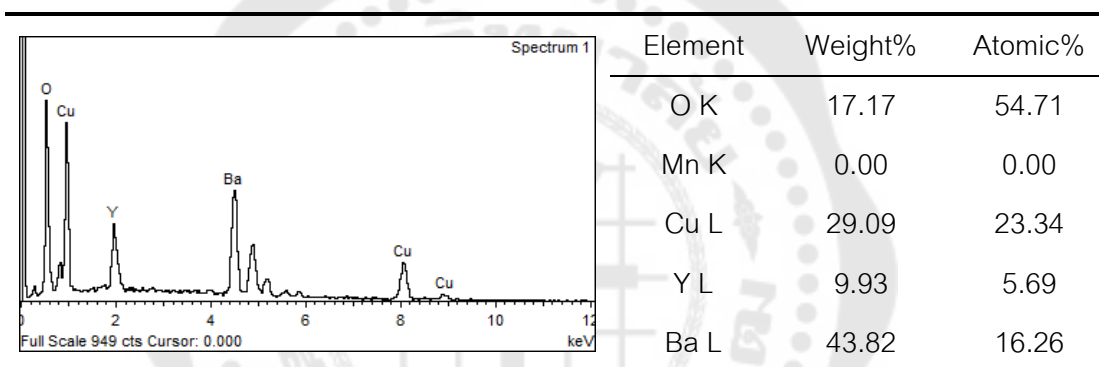


Element	Weight%	Atomic%
O K	16.63	54.12
Mn K	0.28	0.27
Cu L	27.21	22.29
Y L	10.33	6.05
Ba L	45.54	17.26

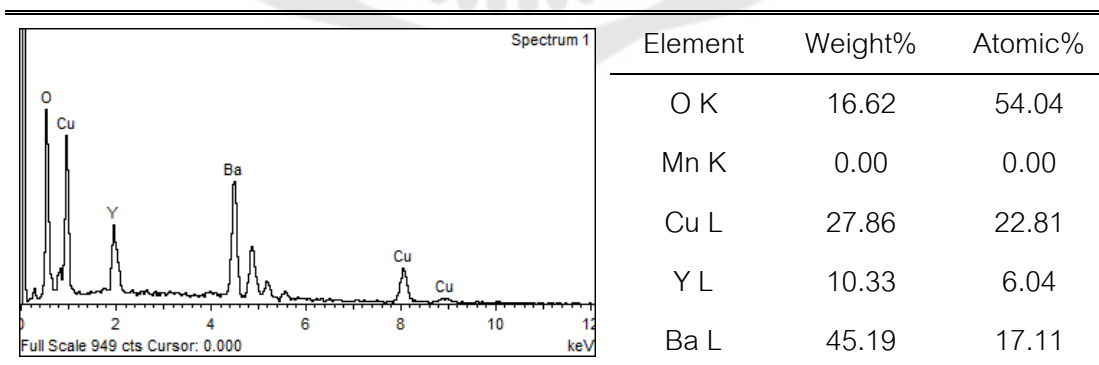
ภาพประกอบ 75 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 76 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

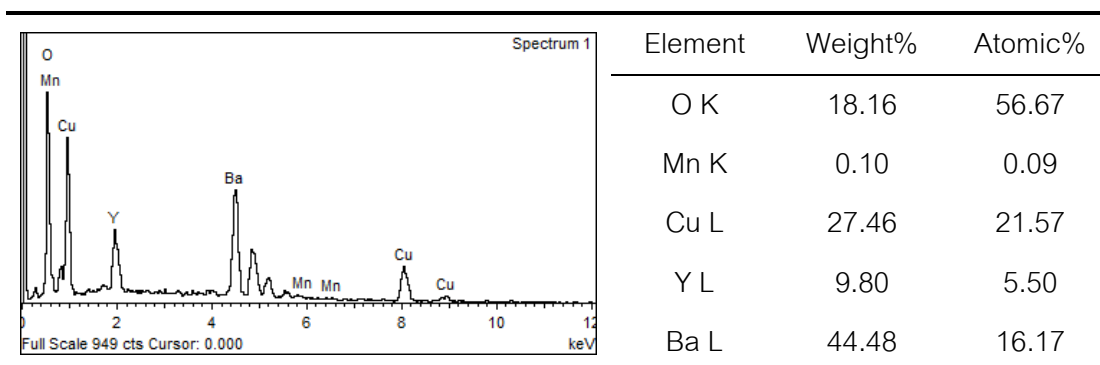


ภาพประกอบ 77 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 78 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์





ภาพประกอบ 79 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ สามารถสรุปได้ดังตาราง 30

ตาราง 30 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	6.05	6.18	5.69	6.04	5.50	5.89
Ba (แบเรียม)	17.26	16.87	16.26	17.11	16.17	16.73
Cu (คอปเปอร์)	22.29	22.93	23.34	22.81	21.57	22.59
O (ออกซิเจน)	54.12	53.94	54.71	54.04	56.67	54.70
Mn (แมงกานีส)	0.27	0.09	0.00	0.00	0.09	0.09

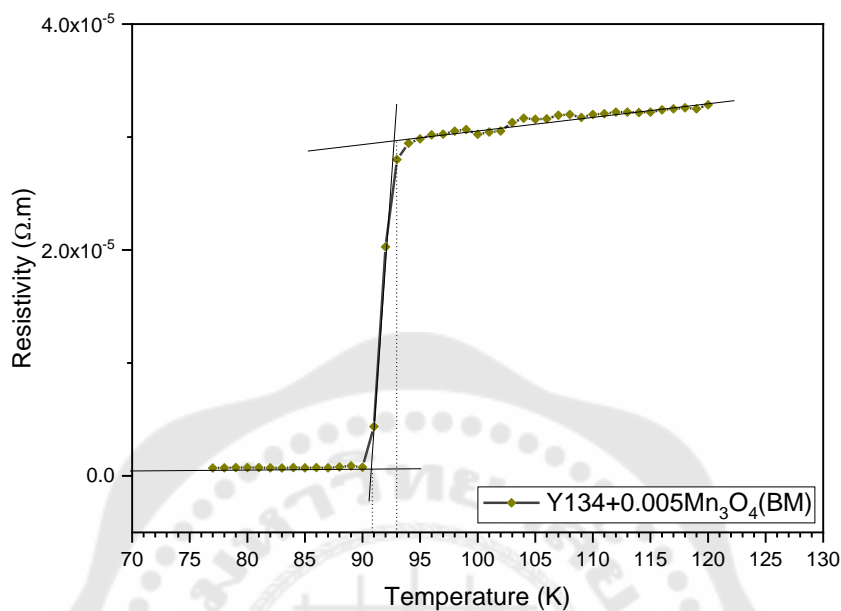
จากตาราง 30 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 31

ตาราง 31 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 જેોด้วย  $Mn_3O_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (5.89%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	2.84 (16.73%)	3.00	0.16
Cu (คอปเปอร์)	3.84 (22.59%)	4.00	0.16
O (ออกซิเจน)	9.29 (54.70%)	9.52	0.23
Mn (แมงกานีส)	0.02 (0.09%)	0.02	0.00

จากตาราง 31 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจากสมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.16 (5.33%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.16 (4.00%) ออกซิเจนจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.23 (2.42%) และแมงกานีสจากการวิเคราะห์เท่ากับสมการเคมี (0.00%)

### ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



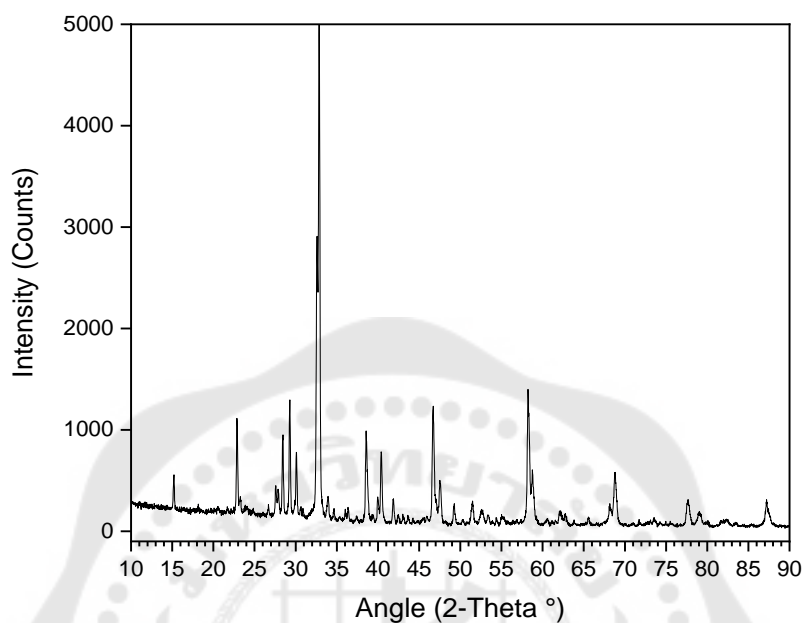
ภาพประกอบ 80 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ตาราง 32 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 0.005 โมล
$T_C^{onset} (K)$	93.0
$T_C^{offset} (K)$	91.0
$\Delta T_C (K)$	2.0

จากภาพประกอบ 80 และข้อมูลจากตาราง 32 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ มีอุณหภูมิวิกฤตบนเซตที่ 93.0 เคลวินและอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตที่ 91.0 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 2.0 เคลวิน

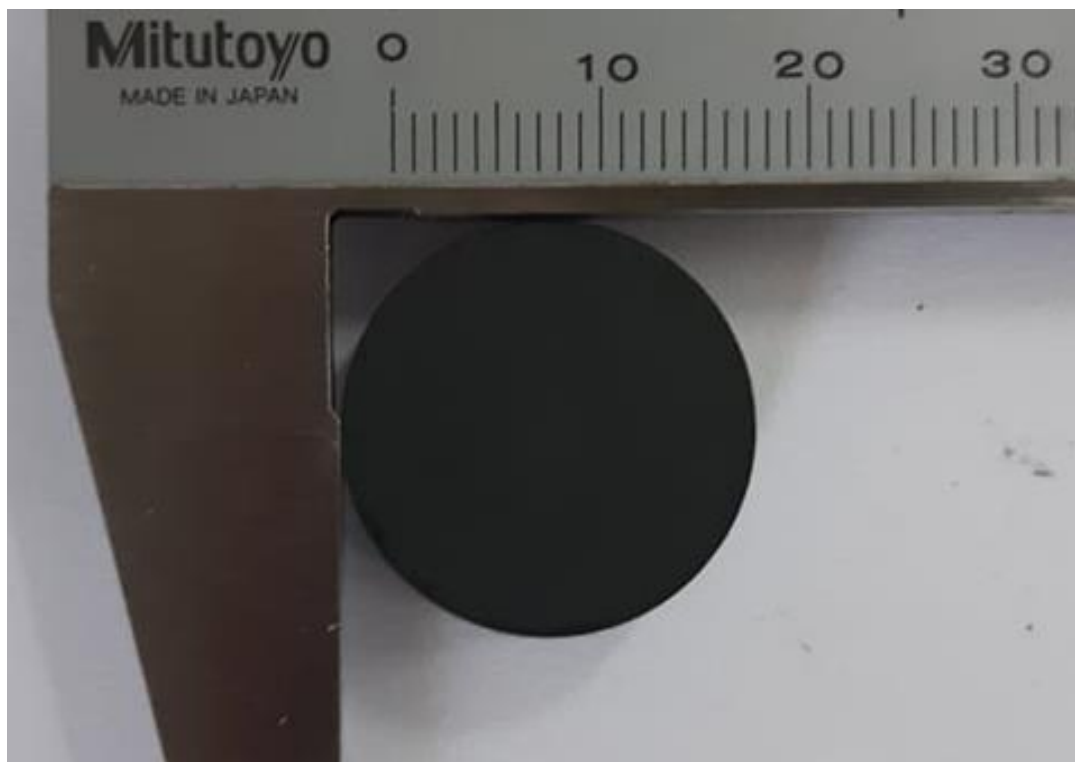
### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 81 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  0.005 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากภาพประกอบ 81 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง  $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$  และเปรียบเทียบกับ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  0.005 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$  แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์มีผลต่อโครงสร้างหลักของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 น้อยมาก

2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

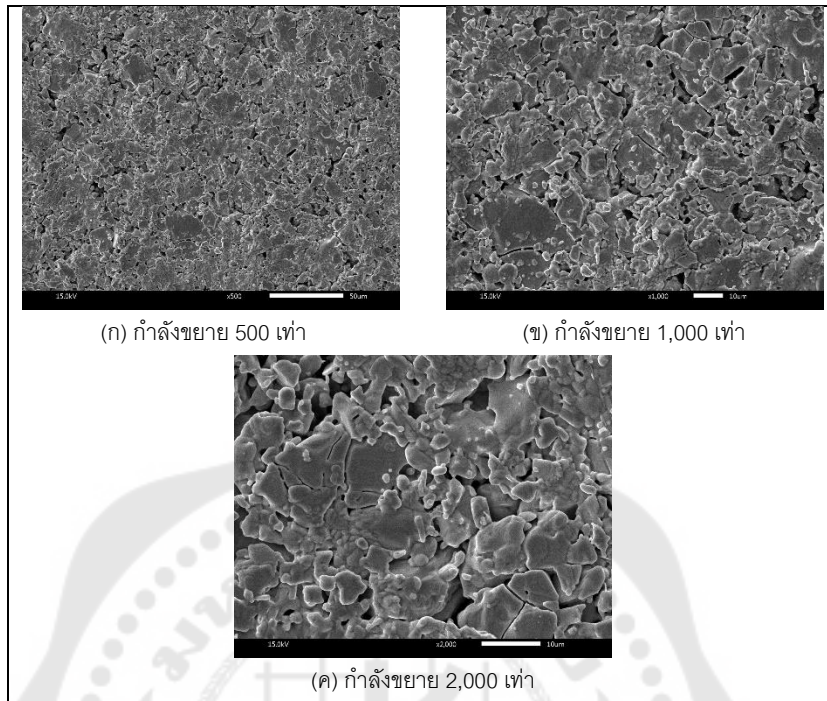


ภาพประกอบ 82 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

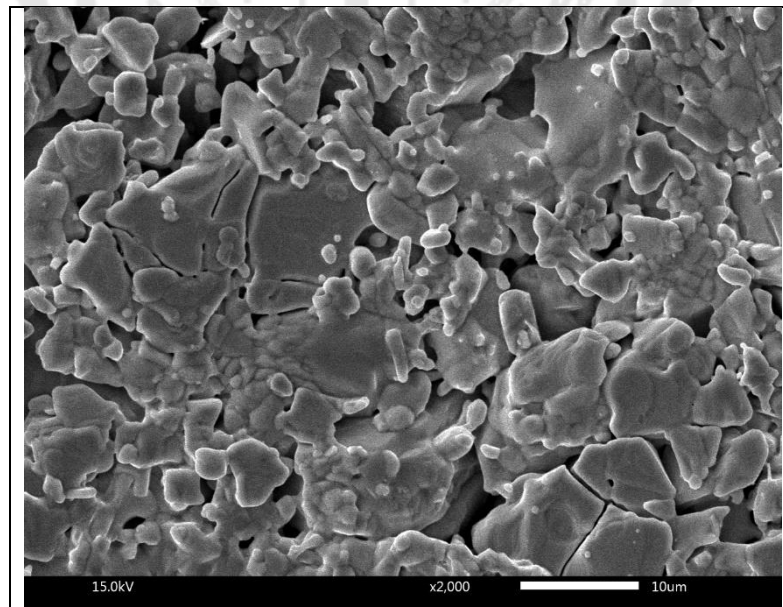
ตาราง 33 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	8.513
การเจือ $Mn_3O_4$ (กรัม)	0.020
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	2.000
ความหนา (เซนติเมตร)	0.584

### ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 83 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 84 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

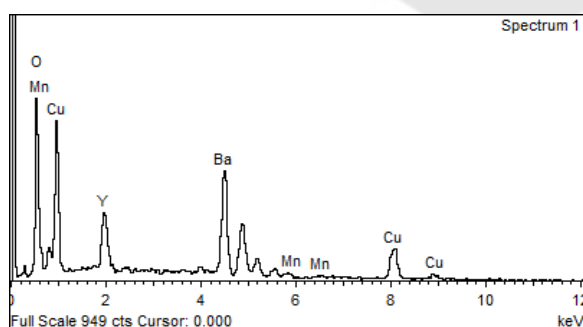
ตาราง 34 แสดงรายละเอียดผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$4.522 \pm 2.284 \mu m$
รูปร่างของเกรน	รูปร่างหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	ความพรุนค่อนข้างน้อย รูพรุนขนาดใหญ่สุดกินพื้นที่ $15.298 \mu m^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	รูปร่างเกรนชัดเจน ต่อเนื่องและแนบชิดกัน

จากตารางที่ 34 พบว่า เกรนของผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นรูปร่างหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาดเฉลี่ย  $4.522$  ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น  $2.284$  ไมโครเมตร แสดงถึง มีความไม่สม่ำเสมอของขนาดเกรนเล็กน้อย สอดคล้องกับภาพประกอบ 78 จะพบว่ามีเกรนบางเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติ พื้นผิวมีรูพรุนค่อนข้างน้อย เกรนรูปร่างชัดเจน ต่อเนื่องและแนบชิดกัน โดยรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ ประมาณ  $15.298$  ตารางไมโครเมตร

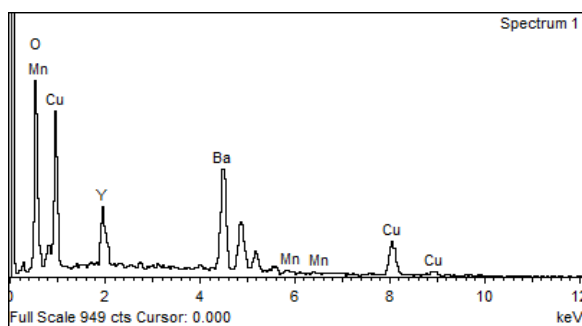
#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

ในการวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 85-89



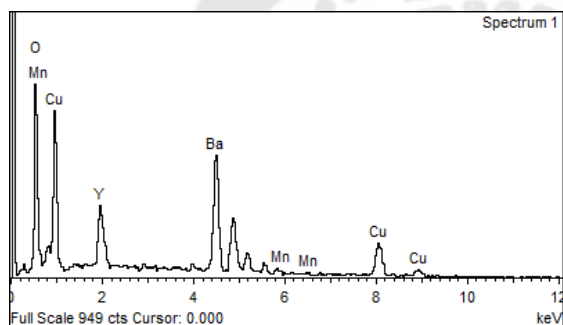
Element	Weight%	Atomic%
O K	16.55	54.08
Mn K	0.03	0.03
Cu L	27.31	22.47
Y L	9.93	5.84
Ba L	46.19	17.59

ภาพประกอบ 85 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



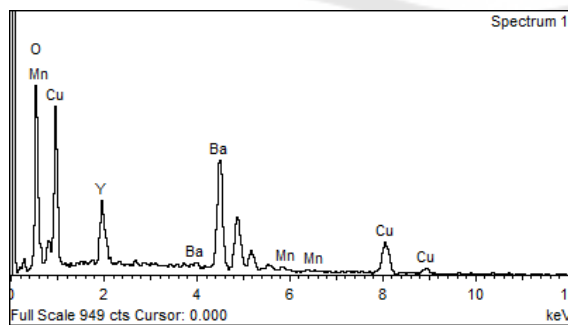
Element	Weight%	Atomic%
O K	17.08	54.74
Mn K	0.35	0.33
Cu L	28.09	22.67
Y L	9.50	5.48
Ba L	44.97	16.79

ภาพประกอบ 86 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



Element	Weight%	Atomic%
O K	16.40	53.91
Mn K	0.23	0.22
Cu L	26.86	22.24
Y L	9.55	5.65
Ba L	46.96	17.98

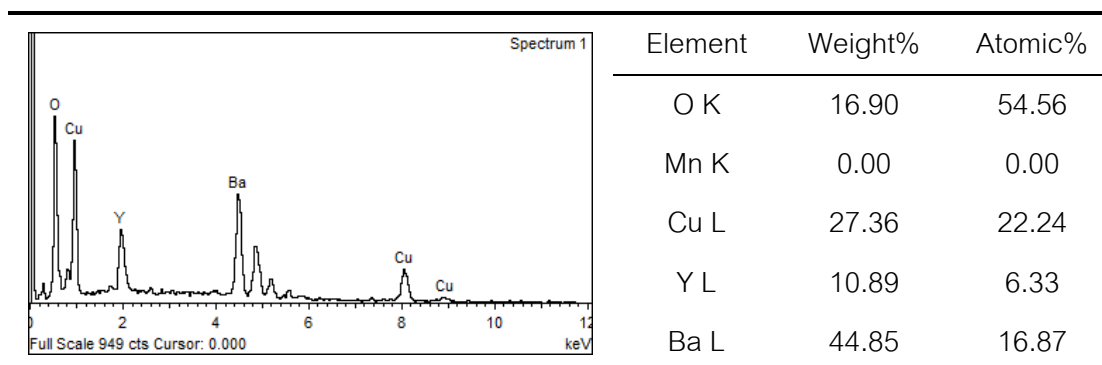
ภาพประกอบ 87 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



Element	Weight%	Atomic%
O K	16.49	53.87
Mn K	0.05	0.05
Cu L	27.76	22.84
Y L	9.85	5.79
Ba L	45.86	17.46

ภาพประกอบ 88 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์





ภาพประกอบ 89 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ สามารถสรุปได้ดังตาราง 35

ตาราง 35 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	5.84	5.48	5.65	5.79	6.33	5.82
Ba (แบเรียม)	17.59	16.79	17.98	17.46	16.87	17.34
Cu (คอปเปอร์)	22.47	22.67	22.24	22.84	22.24	22.49
O (ออกซิเจน)	54.08	54.74	53.91	53.87	54.56	54.23
Mn (แมงกานีส)	0.03	0.33	0.22	0.05	0.00	0.13

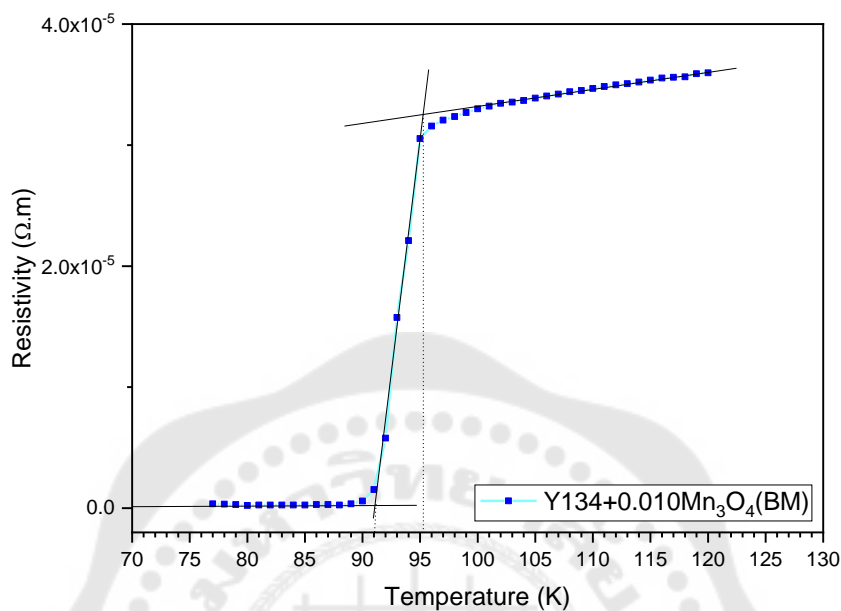
จากตาราง 35 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 36

ตาราง 36 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 જેોด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (5.82%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	2.98 (17.34%)	3.00	0.02
Cu (คอปเปอร์)	3.86 (22.49%)	4.00	0.14
O (ออกซิเจน)	9.32 (54.23%)	9.54	0.32
Mn (แมงกานีส)	0.02 (0.13%)	0.03	0.01

จากตาราง 36 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจากสมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.02 (0.67%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.14 (3.50%) ออกซิเจนจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.32 (3.35%) และแมงกานีสจากการวิเคราะห์น้อยกว่าสมการเคมี 0.01 (33.33%)

### ผลการศึกษาคูณหภูมิจากการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



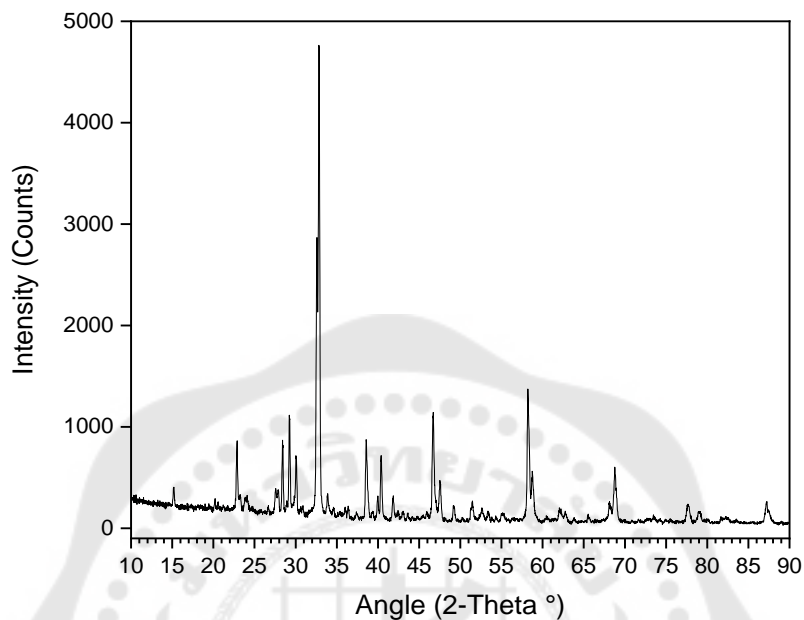
ภาพประกอบ 90 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ตาราง 37 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย $Mn_3O_4$ 0.010 โมล
$T_C^{onset}$ (K)	95.2
$T_C^{offset}$ (K)	91.0
$\Delta T_C$ (K)	4.2

จากภาพประกอบ 90 และข้อมูลจากตาราง 37 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ มีอุณหภูมิวิกฤต onset ที่ 95.2 เคลวินและอุณหภูมิวิกฤต offset ที่ 91.0 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 4.2 เคลวิน

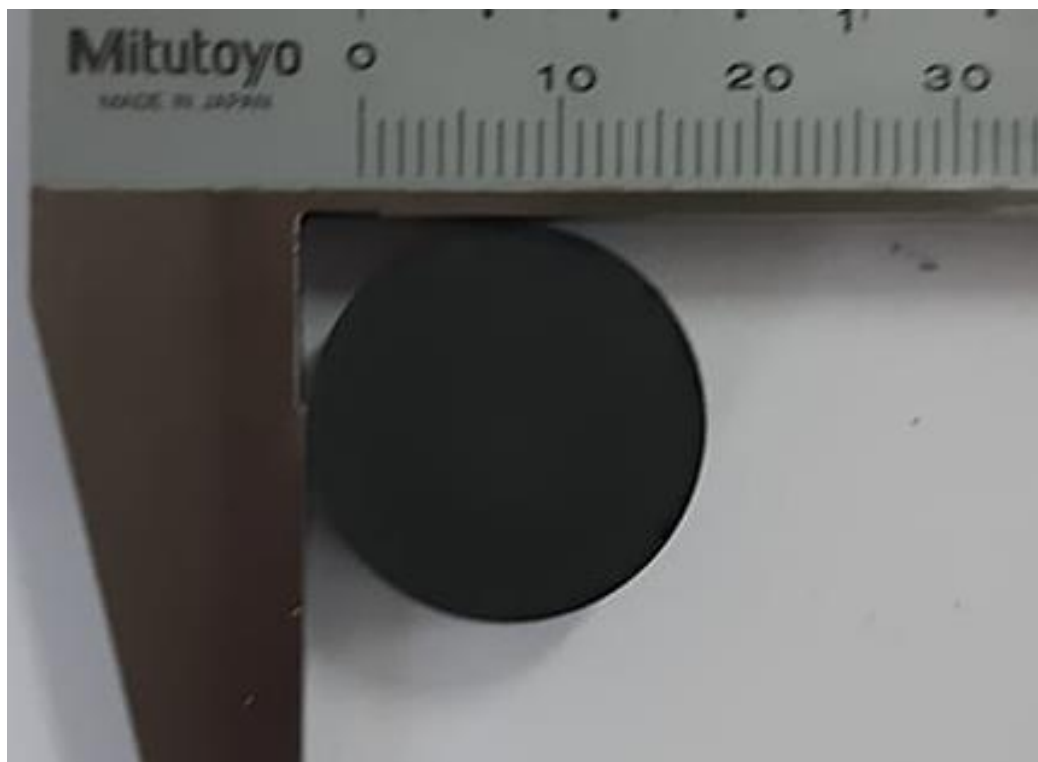
### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 91 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากภาพประกอบ 91 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง  $YBa_3Cu_4O_x$  และเปรียบเทียบกับ  $YBa_2Cu_3O_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.010 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$  แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์มีผลต่อโครงสร้างหลักของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 น้อยมาก

2.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

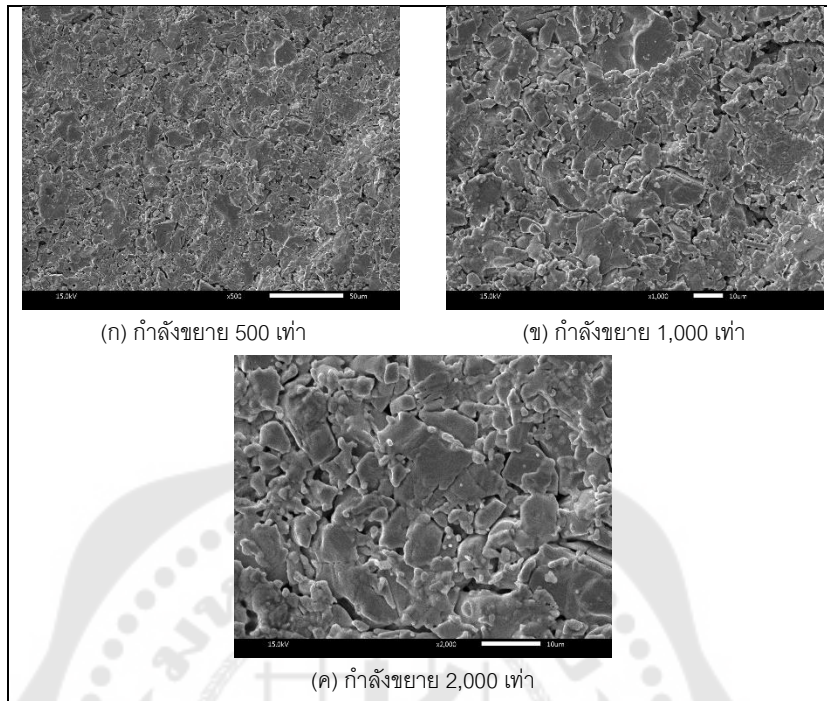


ภาพประกอบ 92 ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

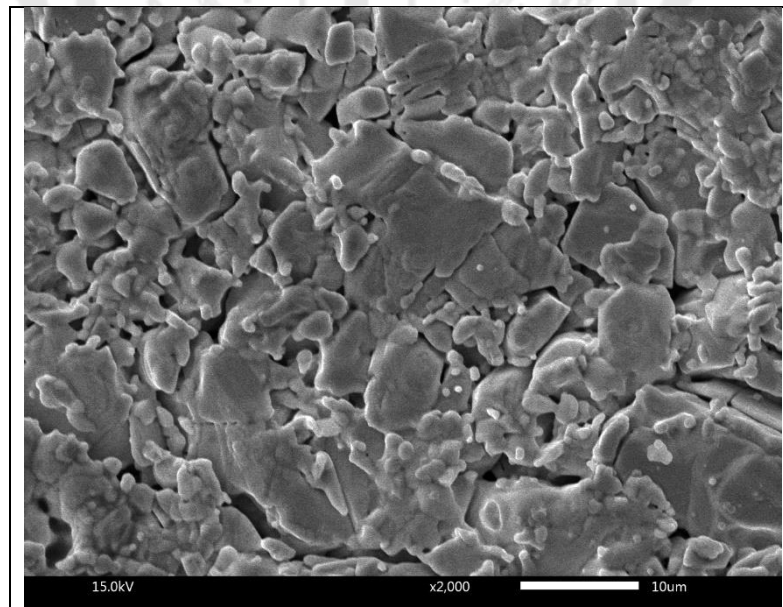
ตาราง 38 ลักษณะทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิด	ตัวนำยวดยิ่ง Y134
มวล (กรัม)	8.400
การเจือ $Mn_3O_4$ (กรัม)	0.030
เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	1.998
ความหนา (เซนติเมตร)	0.550

### ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย SEM



ภาพประกอบ 93 ผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 94 ขนาดตัวอย่างเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

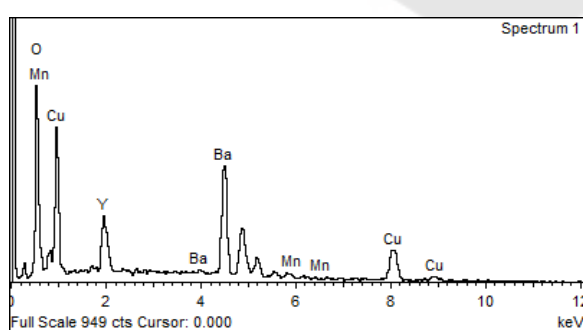
ตาราง 39 แสดงรายละเอียดของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ลักษณะที่วิเคราะห์	รายละเอียด
ขนาดของเกรน	$4.724 \pm 2.117 \mu m$
รูปทรงของเกรน	รูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ
ความพรุน	ความพรุนน้อย รูพรุนขนาดใหญ่สุดกินพื้นที่ $6.718 \mu m^2$
ลักษณะเพิ่มเติม	ขนาดเกรนสม่ำเสมอ ชัดเจน ต่อเนื่องและแนบชิดกัน

จากตารางที่ 39 พบว่า เกรนของยวดยิ่งตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมมีผิวเรียบ มีขนาดเฉลี่ย 4.724 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 2.117 ไมโครเมตร แสดงถึงความสม่ำเสมอของขนาดเกรน สอดคล้องกับภาพประกอบ 87 จะพบว่าเกรนส่วนใหญ่มีขนาดใกล้เคียงกัน พื้นผิวมีรูพรุนน้อย เกรนต่อเนื่องและแนบชิดกัน โดยรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุดกินพื้นที่ ประมาณ 6.718 ตารางไมโครเมตร

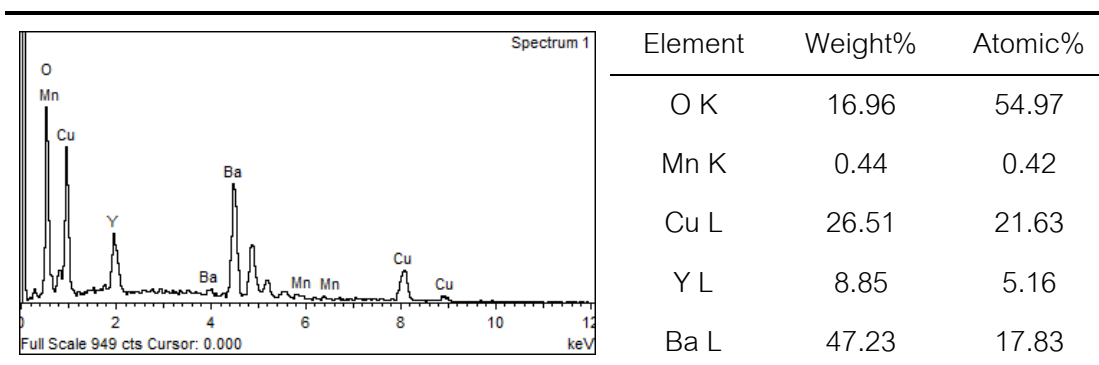
#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX

ในการวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX จำนวน 5 ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ แสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 95-99

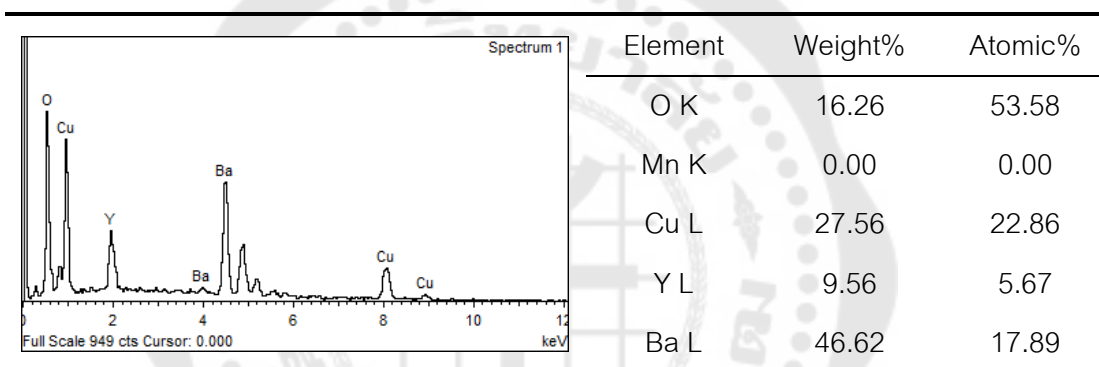


Element	Weight%	Atomic%
O K	17.06	55.05
Mn K	0.26	0.24
Cu L	26.64	21.64
Y L	9.72	5.64
Ba L	46.33	17.42

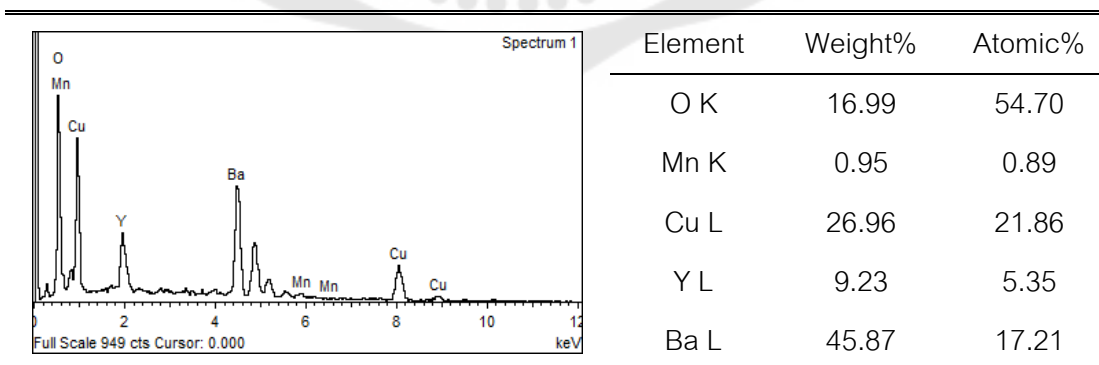
ภาพประกอบ 95 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 1 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 96 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

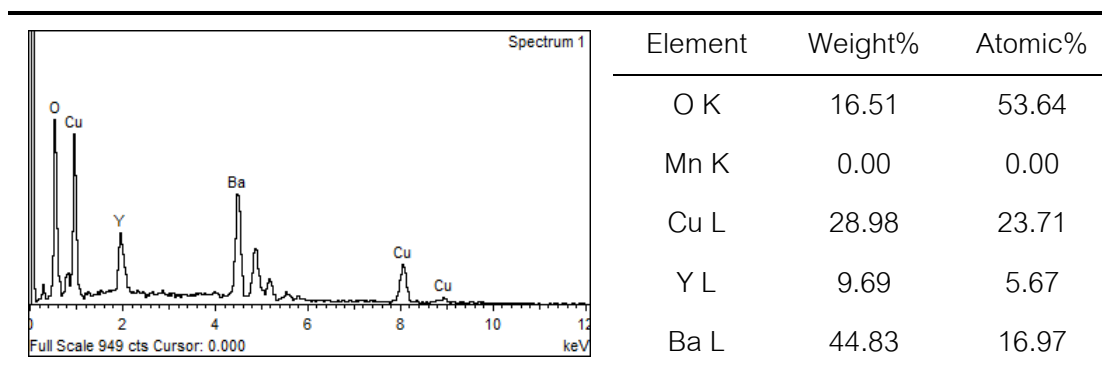


ภาพประกอบ 97 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 3 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์



ภาพประกอบ 98 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 4 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์





ภาพประกอบ 99 กราฟวิเคราะห์ปริมาณธาตุตำแหน่งที่ 5 ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากร้อยละเชิงอะตอมของธาตุประกอบทั้ง 5 ตำแหน่งบนผิวตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ สามารถสรุปได้ดังตาราง 40

ตาราง 40 แสดงรายละเอียดร้อยละของอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Y (ยิทเทรียม)	5.64	5.16	5.67	5.35	5.67	5.50
Ba (แบเรียม)	17.42	17.83	17.21	17.21	16.97	17.33
Cu (คอปเปอร์)	21.64	21.63	21.86	21.86	23.71	22.14
O (ออกซิเจน)	55.05	54.97	53.58	54.70	53.64	54.39
Mn (แมงกานีส)	0.24	0.42	0.00	0.89	0.00	0.31

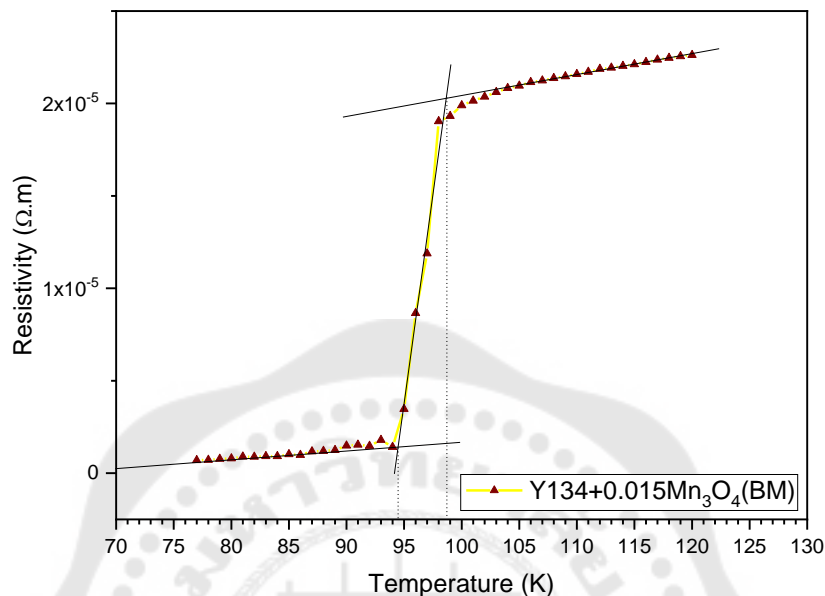
จากตาราง 40 เมื่อเทียบอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของอะตอมธาตุประกอบแต่ละชนิดและกำหนดให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็น 1 จะได้อัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบที่วิเคราะห์จากตัวอย่างดังตาราง 41

ตาราง 41 แสดงรายละเอียดอัตราส่วนอะตอมธาตุประกอบของตัวนำยวดยิ่ง Y134 જેોด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ธาตุองค์ประกอบ	อัตราส่วนอะตอม		
	จากการวิเคราะห์	ตามสมการเคมี	ความแตกต่าง
Y (ยิทเทรียม)	1.00 (5.50%)	1.00	0.00
Ba (แบเรียม)	3.15 (17.33%)	3.00	0.15
Cu (คอปเปอร์)	4.03 (22.14%)	4.00	0.03
O (ออกซิเจน)	9.89 (54.39%)	9.56	0.33
Mn (แมงกานีส)	0.06 (0.31%)	0.05	0.01

จากตาราง 41 พบว่า อัตราส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปจากสมการเคมี ดังนี้ ยิทเทรียม 0.00 (0.00%) แบเรียมจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.15 (5.00%) คอปเปอร์จากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.03 (0.75%) ออกซิเจนจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.33 (3.45%) และแมงกานีสจากการวิเคราะห์มากกว่าสมการเคมี 0.01 (20.00%)

### ผลการศึกษาอุณหภูมิวิกฤตด้วยชุดวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว



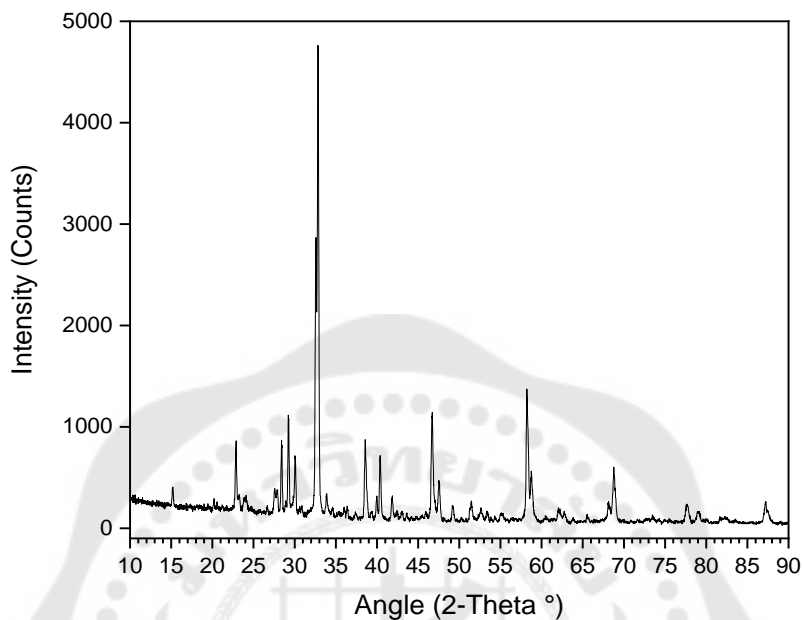
ภาพประกอบ 100 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ตาราง 42 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 0.015 โมล
$T_C^{onset} (K)$	98.7
$T_C^{offset} (K)$	94.5
$\Delta T_C (K)$	4.2

จากภาพประกอบ 100 และข้อมูลจากตาราง 42 พบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ มีอุณหภูมิวิกฤต onset ที่ 98.7 เคลวิน ซึ่งถือเป็นอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดของตัวอย่างในงานวิจัยนี้และอุณหภูมิวิกฤต offset ที่ 94.5 เคลวิน โดยความต่างของอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองอยู่ที่ 4.2 เคลวิน

### ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD



ภาพประกอบ 101 กราฟ XRD ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมล  
ต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

จากภาพประกอบ 101 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD สอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง  $YBa_3Cu_4O_x$  และเปรียบเทียบกับ  $YBa_2Cu_3O_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือด้วย  $Mn_3O_4$  0.015 โมลต่อตัวนำยวดยิ่ง Y134 1 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$  แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์มีผลต่อโครงสร้างหลักของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 น้อยมาก

### 3. การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

#### 3.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง แสดงรายละเอียดดังตาราง

ตาราง 43 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

วิธีการบด	ความเข้มข้น	ขนาดเกรนเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ส่วนเบี่ยงเบน	ความพรุน
	การเจือ $Mn_3O_4$		มาตรฐาน (ไมโครเมตร)	
โกร่งบด สาร	ไม่เจือ	4.346	2.959(68.09%)	มาก
	0.005	5.467	3.159(57.78%)	ค่อนข้างน้อย
	0.010	3.666	3.367(91.84%)	ค่อนข้างมาก
	0.015	4.714	3.438(72.93%)	น้อย
เครื่องบด บอลมิลล์	ไม่เจือ	3.591	1.708(47.56%)	น้อย
	0.005	3.770	1.083(28.73%)	น้อย
	0.010	4.522	2.284(50.51%)	ค่อนข้างน้อย
	0.015	4.734	2.117(44.72%)	น้อย

จากการวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างดังตาราง 43 พบว่า ความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสออกไซด์ในตัวอย่างเตรียมด้วยวิธีการบดเดียวกัน มีขนาดเกรนเฉลี่ยสอดคล้องกันที่ประมาณ 3.5-5.5 ไมโครเมตร และตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสารทั้ง 4 ตัวอย่างมีความพรุนลดลงเมื่อเจือแมงกานีสออกไซด์มากขึ้น ในขณะที่ทุกตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีความพรุนน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร นอกจากนี้ขนาดเกรนของตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ยังมีความสม่ำเสมอมากกว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ซึ่งสะท้อนผ่านส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยที่น้อยกว่าถึงร้อยละ 29.78

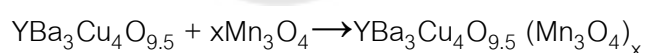
### 3.2 ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง แสดงรายละเอียดดังตาราง

ตาราง 44 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

วิธีการบด	ความเข้มข้น การเจือ $Mn_3O_4$	อัตราส่วนอะตอม				
		Y	Ba	Cu	O	Mn
โกร่งบดสาร	ไม่เจือ	1.00	2.46	2.92	8.29	0.00
	0.005	1.00	3.08	3.95	10.06	0.03
	0.010	1.00	2.88	3.73	9.12	0.05
	0.015	1.00	2.66	3.45	8.55	0.04
เครื่องบดบอลมิลล์	ไม่เจือ	1.00	2.95	3.94	9.64	0.00
	0.005	1.00	2.84	3.84	9.29	0.02
	0.010	1.00	2.98	3.86	9.32	0.02
	0.015	1.00	3.15	4.03	9.89	0.06

ตาราง 44 แสดงอัตราส่วนอะตอมของธาตุประกอบในสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างทั้ง 8 ตัวอย่าง โดยเทียบกับปริมาณของยิทเทเรียม (Y) จากนั้นนำอัตราส่วนอะตอมไปเทียบกับอัตราส่วนอะตอมที่ควรจะเป็นตามสมการเคมี



โดย x คือจำนวนโมลของสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ประกอบด้วย 0.000 0.005 0.010 และ 0.015 โมล

จากนั้นคำนวณหาผลต่างอัตราส่วนอะตอมของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง และคิดร้อยละความคลาดเคลื่อน แสดงรายละเอียดดังตาราง 45

ตาราง 45 แสดงผลต่างอัตราส่วนอะตอมของตัวนำเวดยี่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมได้เทียบกับสมการเคมี

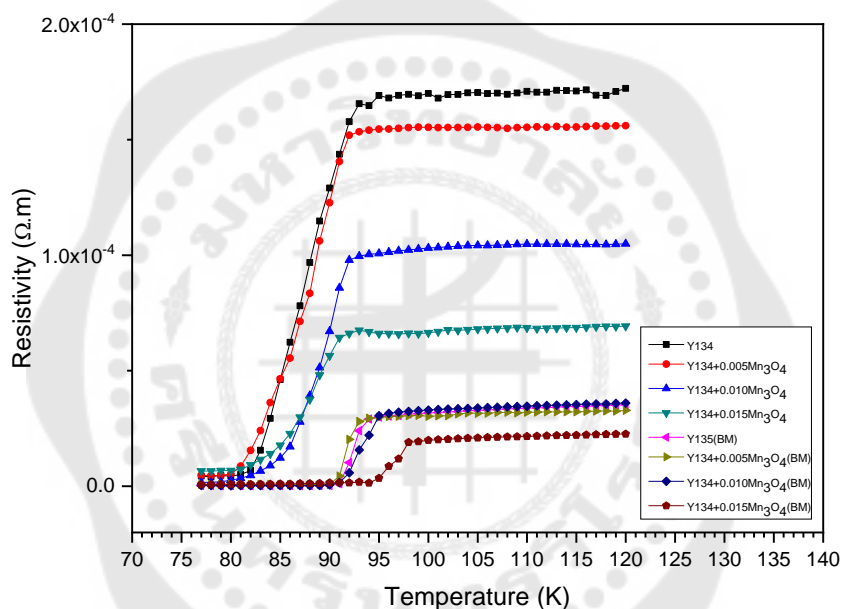
วิธีการบด	ความเข้มข้น การเจือ $Mn_3O_4$	ผลต่างของอัตราส่วนอะตอม				
		Y	Ba	Cu	O	Mn
โกร่งบดสาร	ไม่เจือ	0.00 (0.00%)	0.54 (18.00%)	1.08 (27.00%)	1.21 (12.74%)	0.00 (0.00%)
	0.005	0.00 (0.00%)	0.08 (2.67%)	0.05 (1.25%)	0.54 (5.67%)	0.01 (50.00%)
	0.010	0.00 (0.00%)	0.12 (4.00%)	0.27 (6.75%)	0.42 (4.40%)	0.02 (66.67%)
	0.015	0.00 (0.00%)	0.34 (11.33%)	0.55 (13.75%)	1.01 (10.56%)	0.01 (20.00%)
	ไม่เจือ	0.00 (0.00%)	0.05 (1.67%)	0.06 (1.50%)	0.14 (1.47%)	0.00 (0.00%)
เครื่องบดบอลมิลล์	0.005	0.00 (0.00%)	0.16 (5.33%)	0.16 (4.00%)	0.23 (2.42%)	0.00 (0.00%)
	0.010	0.00 (0.00%)	0.02 (0.67%)	0.14 (3.50%)	0.32 (3.35%)	0.01 (33.33%)
	0.015	0.00 (0.00%)	0.15 (5.00%)	0.03 (0.75%)	0.33 (3.45%)	0.01 (20.00%)
	ไม่เจือ	0.00 (0.00%)	0.05 (1.67%)	0.06 (1.50%)	0.14 (1.47%)	0.00 (0.00%)

จากตาราง 45 พบว่า ตัวนำเวดยี่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างทุกตัวอย่างประกอบด้วยธาตุหลัก ได้แก่ ยิทเทรียม (Y), แบเรียม (Ba), คอปเปอร์ (Cu) และออกซิเจน (O) ในปริมาณที่สอดคล้องกับสมการเคมี โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.00%, 6.08%, 7.37% และ 5.51% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบรายตัวอย่างพบว่า ตัวนำเวดยี่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีอัตราส่วนอะตอมสอดคล้องกับสมการเคมีมากกว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ในขณะที่อะตอมของแมงกานีสที่เจือลงในตัวนำเวดยี่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 23.75% ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่สูงเกิดจากการเจือสารในปริมาณที่น้อยมากและข้อจำกัดเรื่องความละเอียดของเครื่องมือวัด หากพิจารณารายตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

มีอัตราส่วนอะตอมของแมงกานีสสอดคล้องกับสมการเคมีมากกว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถ้งบดสาร

### 3.3 อุณหภูมิวิกฤตและสภาพต้านทานของตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่าง

การวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่าง จากการวัดความต้านทาน 4 ชั่วโมงด้วยวิธี แวน เดอร์ พาว ได้กราฟความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานของตัวอย่างกับอุณหภูมิ ดังภาพประกอบ 102



ภาพประกอบ 102 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่าง

จากกราฟความสัมพันธ์ด้านบน สามารถวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของเซต อุณหภูมิวิกฤตของเซต ผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตทั้งสอง และสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 เคลวิน ได้ดังตาราง 46



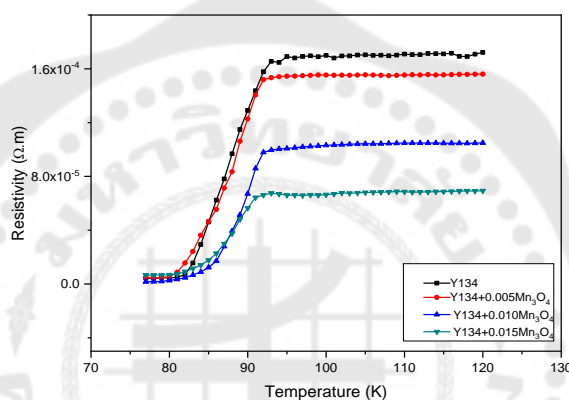
ตาราง 46 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

วิธีการอบ	ความเข้มข้น การเจือ $Mn_3O_4$	อุณหภูมิวิกฤต (K)			สภาพต้านทานไฟฟ้า ที่ 120 เคลวิน ( $m\Omega.cm$ )
		$T_C^{offset}$	$T_C^{onset}$	$\Delta T_C$	
โกร่งบดสาร	ไม่เจือ	82.3	92.7	10.4	17.22
	0.005	82.0	92.3	10.3	15.61
	0.010	85.0	92.5	7.5	10.49
	0.015	84.3	91.0	6.7	6.93
เครื่องบด บอลมิลล์	ไม่เจือ	91.0	94.0	3.0	3.53
	0.005	91.0	93.0	2.0	3.28
	0.010	91.0	95.2	4.2	3.60
	0.015	94.5	98.7	4.2	2.26

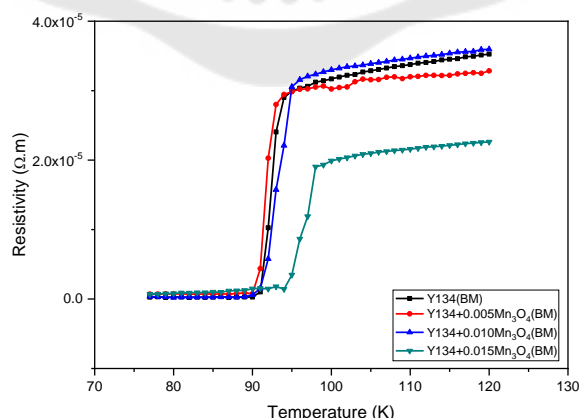
จากตารางด้านบนพบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ความเข้มข้น 0.000, 0.005, 0.010 และ 0.015 โมล ที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร มีอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตใกล้เคียงกันที่ 82.3, 82.0, 85.0 และ 84.3 เคลวิน ตามลำดับ และมีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตใกล้เคียงกันที่ 92.7, 92.3, 92.5 และ 91.0 เคลวิน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตทั้งสองพบว่า ผลต่างมีค่าลดลงคือ 10.4, 10.3, 7.5 และ 6.7 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความชันของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่ง ดังภาพประกอบ 103

ในขณะที่ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ความเข้มข้น 0.000, 0.005, 0.010 และ 0.015 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซต 94.0, 93.0, 95.2 และ 98.7 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเจือด้วยความเข้มข้นมากกว่า 0.010 โมล โดยตัวอย่างที่เจือสารแมงกานีสออกไซด์ความเข้มข้น 0.015 โมล มีอุณหภูมิวิกฤตออนเซตสูงที่สุดคือ 98.7 เคลวิน ในขณะที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตออนเซตและออฟเซตมีค่าใกล้เคียงกันคือ 3.0, 2.0, 4.2 และ 4.2 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสารอย่างเห็นได้ชัด แสดงถึงความชันของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่ง ดังภาพประกอบ

เมื่อพิจารณาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120 เคลวินพบว่า การเจือสารแมงกานีสออกไซด์ความเข้มข้นมากขึ้นทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างลดลงซึ่งหมายถึงวัสดุมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นในสถานะปกติ สังเกตการลดลงของสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ชัดเจนในตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ในขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ก็พบว่ามีความต้านทานลดลงแต่มีสัดส่วนไม่มากเมื่อเทียบกับผลจากวิธีการบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ซึ่งทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิ 120 เคลวินมีค่าน้อยกว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสารอย่างมาก

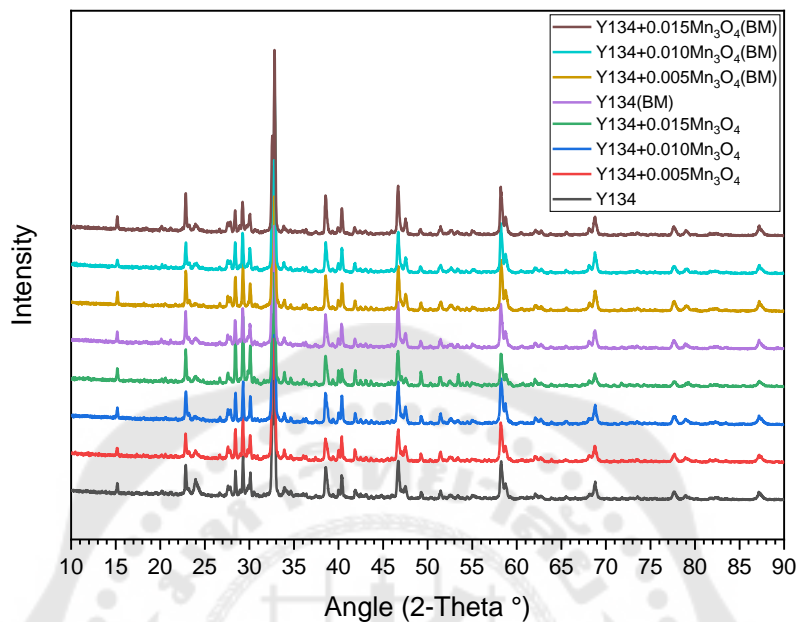


ภาพประกอบ 103 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำเวดจ์ Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร



ภาพประกอบ 104 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำเวดจ์ Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

### 3.4 โครงสร้างผลึกของตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่าง



ภาพประกอบ 105 กราฟ XRD ของตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่าง

จากภาพประกอบ 105 พบว่าตำแหน่งพีคจากกราฟ XRD ของทุกตัวอย่างสอดคล้องกับงานวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยิ่งยวด  $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$  และเปรียบเทียบกับ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  จึงสรุปได้ว่าตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่างทั้งหมด มีโครงสร้างเป็นออร์โทโรมบิก (orthorhombic) ที่มี  $a = 3.8022 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8853 \text{ \AA}$  และ  $c = 15.2570 \text{ \AA}$  โดยประมาณ แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสออกไซด์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลักของสารตัวนำยิ่งยวด Y134 น้อยมากในระดับที่ไม่มีความสำคัญ

### 3.4 อัตราส่วนของ $\text{Cu}^{3+}$ ต่อ $\text{Cu}^{2+}$ ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

การหาอัตราส่วนของ  $\text{Cu}^{3+}$  ต่อ  $\text{Cu}^{2+}$  ในโครงสร้างด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน โดยใช้สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) ความเข้มข้น 0.0308 โมลาร์ และนำไปหาปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้างหลักของ  $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$  ได้ผลการทดลองดังตาราง 47

ตาราง 47 แสดงอัตราส่วนของ  $\text{Cu}^{3+}$  ต่อ  $\text{Cu}^{2+}$  จากวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

วิธีการบด	ความเข้มข้น การเจือ $\text{Mn}_3\text{O}_4$	จำนวนโมลของทองแดง			ปริมาณออกซิเจนใน โครงสร้างหลัก $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$
		$\text{Cu}^{2+}$ ( $\times 10^3$ )	$\text{Cu}^{3+}$ ( $\times 10^3$ )	$\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$	
โกร่งบดสาร	ไม่เจือ	7.198	1.407	0.195	8.827
	0.005	7.098	1.621	0.228	8.872
	0.010	6.937	1.962	0.283	8.941
	0.015	6.993	1.885	0.270	8.925
เครื่องบด บอลมิลล์	ไม่เจือ	6.814	1.886	0.277	8.934
	0.005	6.283	2.385	0.380	9.050
	0.010	6.681	2.051	0.307	8.970
	0.015	7.028	1.886	0.268	8.923

จากตารางด้านบนพบว่าการเจือแมงกานีสออกไซด์และการเตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีผลต่ออัตราส่วนของ  $\text{Cu}^{3+}$  ต่อ  $\text{Cu}^{2+}$  ในโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง Y134 น้อยมาก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จาก XRD ที่ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างหลักของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างมีความสอดคล้องกัน

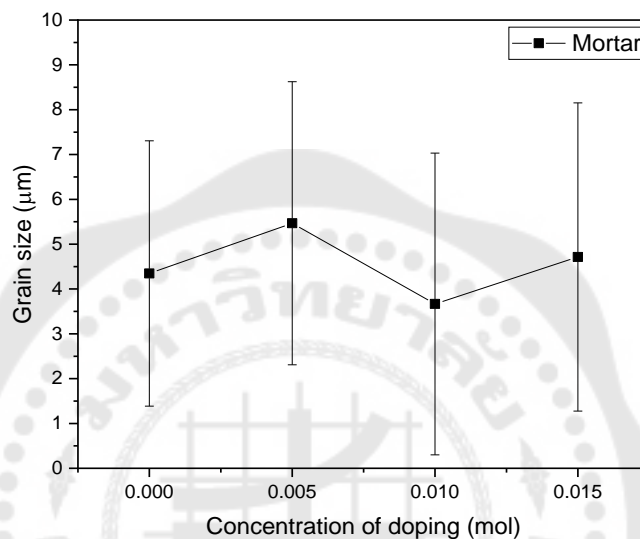
จากปริมาณออกซิเจนที่หาได้จากการวิเคราะห์อัตราส่วน  $\text{Cu}^{3+}$  ต่อ  $\text{Cu}^{2+}$  เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณออกซิเจนตามสูตรทั่วไปของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ( $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_{9-x}$ ) สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ฟรอนต์ออกซิเจนได้ดังตาราง 48

ตาราง 48 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนและเปอร์เซ็นต์ฟร่งออกซิเจน

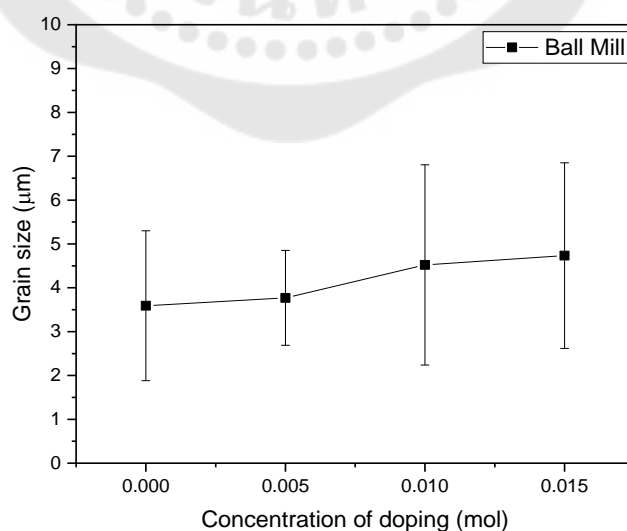
วิธีการบด	ความเข้มข้น	ปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างหลัก		เปอร์เซ็นต์ฟร่งออกซิเจน (%)
	การเจือ $Mn_3O_4$	จาก $Cu^{3+}/Cu^{2+}$	จากสูตรทั่วไป	
โกร่งบด สาร	ไม่เจือ	8.827	9.000	1.922
	0.005	8.872	9.000	1.422
	0.010	8.941	9.000	0.656
	0.015	8.925	9.000	0.833
เครื่องบด บอลมิลล์	ไม่เจือ	8.934	9.000	0.733
	0.005	9.050	9.000	0.556
	0.010	8.970	9.000	0.333
	0.015	8.923	9.000	0.856

#### 4. ผลของการเจือ $Mn_3O_4$ และวิธีการบดต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยิ่งยวด Y134

ผลของความเข้มข้นการเจือสารแมงกานีสออกไซด์ต่อขนาดเกรนของตัวนำยิ่งยวดทั้งกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถบดสารและกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์แสดงดังภาพประกอบ 106 และ 107 ตามลำดับ



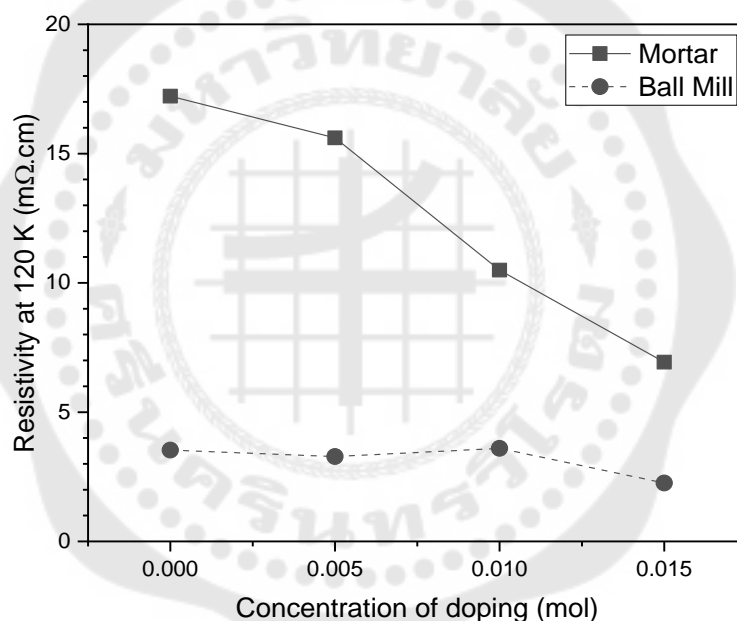
ภาพประกอบ 106 แสดงขนาดเกรนของตัวนำยิ่งยวด Y134 ที่เตรียมด้วยโถบดสาร



ภาพประกอบ 107 แสดงขนาดเกรนของตัวนำยิ่งยวด Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

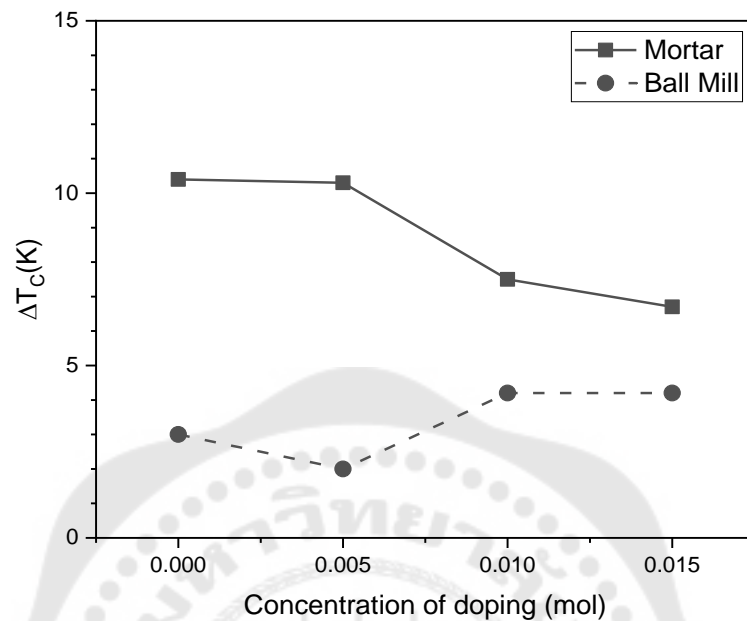
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยขนาดเกรนของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีขนาดสอดคล้องกัน แต่กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีความสม่ำเสมอของขนาดเกรนมากกว่ากลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร

ความพรุนของกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีความพรุนน้อยกว่ากลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร เมื่อพิจารณาจากกลุ่มตัวอย่างเดียวกัน ความพรุนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นการเจือสารแมงกานีสออกไซด์มากขึ้น แสดงถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างมากขึ้น แปรผกผันกับสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120 เคลวินที่มีแนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบ 108



ภาพประกอบ 108 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120 เคลวิน  
ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

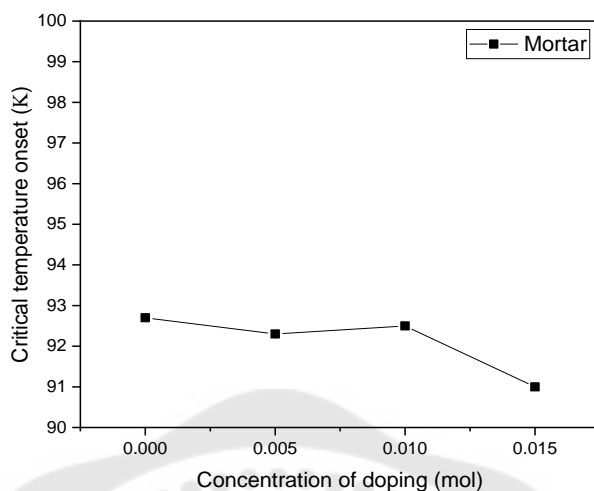
นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตและอุณหภูมิวิกฤตออนเซตในกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร ดังภาพประกอบ 109 ในขณะที่กลุ่มที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ไม่เห็นแนวโน้มการลดลง เพราะผลต่างดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกลุ่มที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร



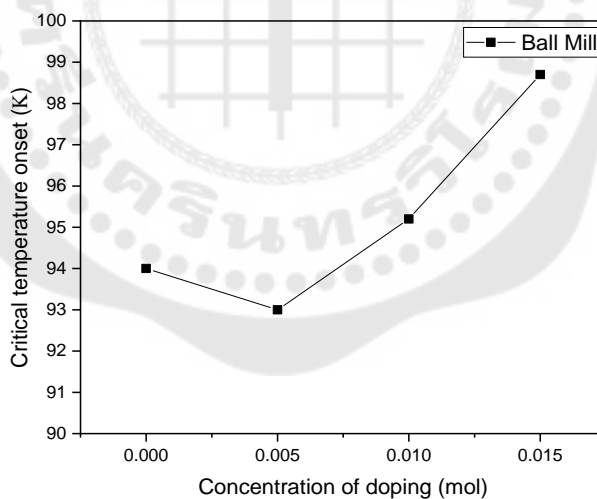
ภาพประกอบ 109 แสดงผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตของฟเซต-อนเซต  
ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง

สำหรับอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญในการพัฒนาวัสดุตัวนำยวดยิ่ง พบว่า อุณหภูมิวิกฤตของฟเซตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดก่อนที่สภาพต้านทานจะลดลงอย่างทันทีทันใดเข้าสู่สถานะนำยวดยิ่ง ค่อนข้างคงที่ทุกความเข้มข้นของการเจือสารแมงกานีสออกไซด์ในกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโกร่งบดสาร ดังภาพประกอบ 110 ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีอุณหภูมิวิกฤตของฟเซตสูงขึ้นเมื่อเจือสารแมงกานีสออกไซด์มากขึ้น ดังภาพประกอบ 111 โดยตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างที่มีอุณหภูมิวิกฤตของฟเซตสูงสุดคือ ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ 0.015 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ อุณหภูมิวิกฤตของฟเซตอยู่ที่ 98.7 เคลวิน





ภาพประกอบ 110 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่าง  
ที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร



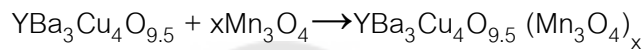
ภาพประกอบ 111 แสดงอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวด Y134 กลุ่มตัวอย่าง  
ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์

ในขณะที่ผลจาก XRD และวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน ระบุสอดคล้องกันว่าทั้งวิธีการบด  
ที่แตกต่างกันและการเจือสารแมงกานีสออกไซด์ความเข้มข้นต่างกัน ไม่กระทบกับโครงสร้างหลัก  
ของสารตัวนำยิ่งยวด Y134

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่องการเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์และโถรงบดสารในครั้งนี้ เป็นการสังเคราะห์สารตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างตามสมการเคมี



โดย  $x$  คือจำนวนโมลของสารแมงกานีสออกไซด์ ( $Mn_3O_4$ ) ประกอบด้วย 0.000 0.005 0.010 และ 0.015 โมล

แบ่งเป็น 2 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร จำนวน 4 ตัวอย่าง และกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ จำนวน 4 ตัวอย่าง จากนั้นศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง ได้แก่

1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
2. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX)
3. การวิเคราะห์อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ตามวิธีแวน เดอร์ พาว (Van Der Pauw method)
4. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)
5. การวิเคราะห์อัตราส่วนของ  $Cu^{3+}$  ต่อ  $Cu^{2+}$  ด้วยวิธีไอโอโดเมตริกไทเทรชัน

โดยมีสมมติฐานในการวิจัย 2 ข้อ คือ

1. วิธีการบดส่งผลให้สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 มีความแตกต่างกัน
2. ขนาดความเข้มข้นของการเจือ  $Mn_3O_4$  ในสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 ส่งผลให้สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 มีความแตกต่างกัน

## สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลการวิจัยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า วิธีการบดส่งผลกระทบต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างหลายประการ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างมีความแตกต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีขนาดเกรนสม่ำเสมอมากกว่ากลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสารอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยต่ำกว่าถึงร้อยละ 29.78 และความพรุนน้อยกว่าอย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่า การเตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ให้ตัวนำยวดยิ่งที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) มากกว่าการเตรียมด้วยโถรงบดสาร

ผลจาก EDX พบว่า ปริมาณธาตุของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยธาตุหลัก ได้แก่ ยิบเทรียม แบเรียม คอปเปอร์ ออกซิเจนและแมงกานีส ในอัตราส่วนที่สอดคล้องกับสมการเคมี และไม่มีสารอื่นเจือปน (Impurity) เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนจากสมการเคมีของธาตุประกอบ สรุปได้ว่าการเตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ให้อัตราส่วนของธาตุสอดคล้องกับสมการเคมีมากกว่าการเตรียมด้วยโถรงบดสาร โดยมีร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากสมการเคมีเฉลี่ย 4.32 และ 12.74 ตามลำดับ ซึ่งการเตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ให้ร้อยละของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการเตรียมด้วยโถรงบดสารถึงร้อยละ 8.42

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ด้วยวิธีแวน เดอร์ พาว พบว่า อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ทั้ง 4 ตัวอย่าง มีค่า 94.0, 93.0, 95.2 และ 98.7 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งสูงกว่าเมื่อเทียบรายตัวกับกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร ซึ่งมีค่า 92.7, 92.3, 92.5 และ 91.0 เคลวินตามลำดับ และผลต่างระหว่างอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งและอุณหภูมิวิกฤตเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าถึง 5.38 เคลวิน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสภาพต้านทานไฟฟ้าในสถานะปกติที่อุณหภูมิ 120 เคลวิน พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย 3.17  $m\Omega\cdot cm$  ซึ่งน้อยกว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถรงบดสาร ซึ่งมีค่า 12.56  $m\Omega\cdot cm$

นอกจากนี้ ผลจาก XRD พบว่า โครงสร้างผลึกของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้วิธีการบดที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับอัตราส่วนของ  $Cu^{3+}$  ต่อ  $Cu^{2+}$  ที่มีความแตกต่างกันน้อยมาก

ในขณะที่ขนาดความเข้มข้นของการเจือ  $Mn_3O_4$  ในสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 หลายประการ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีการบดเดียวกัน มีขนาดเกรนเฉลี่ยสอดคล้องกัน แต่มีความพรุนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเจือสารแมงกานีสออกไซด์ด้วยความเข้มข้นสูงขึ้น นอกจากนี้เกรนของตัวอย่างที่เจือแมงกานีส

ออกไซด์ความเข้มข้นสูงขึ้นยังมีความต่อเนื่องและแนบชิดกันของเกรนสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เจือแมงกานีสออกไซด์

ผลจาก EDX ระบุว่า ปริมาณธาตุประกอบในตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง มีความสอดคล้องกับสมการเคมีทุกตัวอย่างและไม่มีสารอื่นเจือปน โดยธาตุที่มีร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากสมการเคมีมากที่สุดคือ แมงกานีส เนื่องจากเจือด้วยปริมาณที่น้อย จึงยากแก่การตรวจวัด

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ด้วยวิธีแวนเดอร์พาวพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของเซตของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยโถงบดสารมีความสอดคล้องกันคือ 92.7, 92.3, 92.5 และ 91.0 เคลวิน ตามลำดับ แต่ในตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ อุณหภูมิวิกฤตของเซตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเจือแมงกานีสออกไซด์ความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งมีค่า 94.0, 93.0, 95.2 และ 98.7 เคลวิน สำหรับความเข้มข้นการเจือ 0.000, 0.005, 0.010 และ 0.015 โมลตามลำดับ นอกจากนี้ สภาพต้านทานไฟฟ้าในสถานะปกติที่อุณหภูมิ 120 เคลวิน มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นการเจือแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งแสดงดังกราฟในภาพประกอบ 99

นอกจากนี้ โครงสร้างหลักของสารตัวนำยวดยิ่ง Y134 กลุ่มตัวอย่าง ไม่แตกต่างกันเมื่อเจือสารแมงกานีสออกไซด์ด้วยความเข้มข้นแตกต่างกัน

## อภิปรายผล

จากผลการวิจัยพบว่า กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มีความเป็นเนื้อเดียวมากกว่ากลุ่มตัวอย่างที่เตรียมด้วยโถงบดสาร การเป็นเนื้อเดียวกันของสารตัวอย่งนี้ จึงส่งผลต่อถึงความชันของกราฟในการเปลี่ยนเฟสของตัวนำยวดยิ่งซึ่งแสดงผ่านผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิวิกฤตออฟเซตและออนเซตที่มีค่าน้อย และส่งผลถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าในสถานะปกติได้ดีขึ้นจากการที่ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการบดส่งผลอย่างมากในทางปฏิบัติเพราะเป็นผลเชิงมหภาค ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง

นอกจากวิธีการบดผสมแล้ว การเจือสารแมงกานีสออกไซด์ยังพัฒนาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งหลายประการคือ ความต่อเนื่องและแนบชิดกันของเกรน อาจเป็นผลจากการแทรกตัวของสารแมงกานีสออกไซด์บริเวณช่องว่างระหว่างเกรน ซึ่งไม่กระทบกับโครงสร้างหลักของสาร สอดคล้องกับงานวิจัยของซาลามา (Salama et al., 2015, 2016) และทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานส่งผลให้นำไฟฟ้าได้ดีขึ้นในสภาวะปกติและเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตเมื่อเจือด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสม และใช้วิธีการเตรียมที่มีประสิทธิภาพ ดังจะพบว่า ตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสาร

แมงกานีสออกไซด์ ความเข้มข้น 0.010 และ 0.015 โมล ที่เตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ มี อุณหภูมิกฤตตอนเขตสูงขึ้นจากตัวอย่างอื่น ๆ เป็น 95.2 และ 98.7 เคลวิน ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การเตรียมด้วยสารปริมาณน้อย อาจทำให้มีข้อจำกัดในการตรวจวัดทำให้มีร้อยละของความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าอะตอมของธาตุอื่น ๆ ในโครงสร้าง

### ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 ที่เตรียมด้วย โกร่งบดสารและเครื่องบดบอลมิลล์ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า การเตรียมด้วยเครื่องบดบอลมิลล์มี ประสิทธิภาพมากกว่า จึงส่งผลให้สารตัวนำยวดยิ่งแสดงสมบัติทางฟิสิกส์ที่ดีกว่าการเตรียมด้วย โกร่งบดสาร จึงสามารถนำไปประยุกต์ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งชนิดอื่นต่อไป

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า การเจือด้วยสารแมงกานีสออกไซด์ ช่วยพัฒนา สมบัติทางฟิสิกส์หลายประการ เช่น ความเป็นเนื้อเดียวกันของสาร โดยไม่ทำลายสมบัติสำคัญอื่น ๆ จึงสามารถประยุกต์ใช้ในการเจือสารตัวนำยวดยิ่งชนิดอื่นได้ และเมื่อเจือสารแมงกานีสออกไซด์ ปริมาณน้อย ด้วยความเข้มข้นสูงขึ้นไป ยังส่งผลให้อุณหภูมิกฤตมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ซึ่งถือเป็น สมบัติสำคัญของตัวนำยวดยิ่ง

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ทำการเจือสารแมงกานีสออกไซด์ในตัวนำยวดยิ่ง Y134 ด้วย ความเข้มข้นในขอบเขตจำกัด จึงเห็นเพียงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกฤต ไม่ทราบ ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเสนอแนะแก่ผู้สนใจศึกษาในอนาคต ให้ทำการ ขยายช่วงความเข้มข้นของการเจือสารแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นไปอีก จึงจะสามารถทราบช่วง ความเข้มข้นที่เหมาะสมได้ นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ไม่ได้วิเคราะห์การลอยตัวเหนือสนามแม่เหล็ก ของตัวนำยวดยิ่ง Y134 เจือสารแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจสำหรับทำการศึกษาวิจัย ในอนาคต

## บรรณานุกรม

- Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (2002). *Theory of Superconductivity*: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Buckel, Werner. (1991). *Superconductivity : fundamentals and applications*: Weinheim : VCH.
- Chainok, Piyamas, Khuntak, Thanarat, Sujinnapram, Supphadate, Tiyasri, Somporn, Wongphakdee, Wirat, Kruaehong, Thitipong, . . . Udomsamuthirun, Pongkaew. (2015). Some properties of  $YBa_mCu_{1+m}O_y$  ( $m = 2,3,4,5$ ) superconductors. 29(9). doi:10.1142/S0217979215500605
- Chainok, Piyamas, Sujinnapram, Supphadate, Nilkamjon, Tunyanop, Ratreng, Sermsuk, Somsri, Kiattipong, Phomphuang, Nantawat, . . . Udomsamuthirun, Pongkaew. (2014). The Synthesis of  $YBa_3Cu_4O_x$  Superconductor and Comparison with  $YBa_2Cu_3O_x$ . *Advanced Materials Research*, 979, 220-223. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.979.220
- Choy, Jin-Ho, Choi, S. Y., Byeon, S. H., Chun, S. H., Hong, Seung-Tae, Jung, D. Y., . . . Park, Y. W. (1989). ChemInform Abstract: Determination of the Copper Valency and the Oxygen Deficiency in the High Tc Superconductor,  $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ . *ChemInform*, 20. doi:10.1002/chin.198912021
- Deaver, Bascom S., & Fairbank, William M. (1961). Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders. *Physical Review Letters*, 7(2), 43-46. doi:10.1103/PhysRevLett.7.43
- Ha, Dong Han, Min, H. S., Lee, Kang-Won, Byon, S., Han, G. Y., & Lee, H. K. (2001). Effects of cation substitution on the oxygen loss in YBCO superconductors. *Journal of the Korean Physical Society*, 39, 1041-1045.
- Kittel, Charles. (2005). *Introduction to solid state physics* (8th ed.. ed.): Hoboken, NJ : J. Wiley.
- Kruaehong, Thitipong, Sujinnapram, Supphadate, Udomsamuthirun, Pongkaew, Nilkamjon, Tunyanop, & Ratreng, Sermsuk. (2018). The Effect of Ti-doped on the Structure of

Y134 and Y257 Superconductors. *CURRENT APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY*.

Meissner, W., & Ochsenfeld, R. (1933). Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*, 21(44), 787-788. doi:10.1007/BF01504252

Muller, K. Alex, & Bednorz, J. Georg. (1987). The discovery of a class of high-temperature superconductors. *Science*, 237, 1133+.

Nilkamjon, Tunyanop, Supadanaisorn, Rattanasuda, Panklang, Theerathawan, Kumtha, Pariwat, Inlek, Natwagee, Ouengmongkhonchai, Thanaporn, & Udomsamuthirun, Pongkaew. (2017). *The Effect of Wet and Dry Ball Milling on some Properties of Y134 Superconductor*. Paper presented at the International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2017).

Sacchetti, N. (2000). SUPERCONDUCTIVITY: FROM PHYSICS TO ALCHEMY. *International Journal of Modern Physics B*, 14(25n27), 2617-2627. doi:10.1142/S0217979200002685

Salama, A. H., El-Hofy, M., Rammah, Y. S., & Elkhatib, M. (2015). Effect of magnetic and nonmagnetic nano metal oxides doping on the critical temperature of a YBCO superconductor. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 6(4), 045013. doi:10.1088/2043-6262/6/4/045013

Salama, A. H., El-Hofy, M., Rammah, Y. S., & Elkhatib, M. (2016). The influence of magnetic nano metal oxides doping on structure and electrical properties of a YBCO superconductor. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 7(4), 015011. doi:10.1088/2043-6262/7/1/015011

Schroder, Dieter K. (2006). *Semiconductor Material and Device Characterization*: Wiley-Interscience.

Tesanovic, Zlatko. (1999). Extreme type-II superconductors in a magnetic field: A theory of critical fluctuations. *Physical Review B*, 59(9), 6449-6474. doi:10.1103/PhysRevB.59.6449

Timm, C. (2012). *Theory of Superconductivity*. New York: Tu Dresden.

Vanderah, T. A. (1992). *Chemistry of Superconductor Materials Preparation, Chemistry, Characterization and Theory*: William Andrew Publishing/Noyes.

คชินท์, สายอินทวงศ์. (2551). การบดละเอียด(Grinding or Milling). Retrieved from

[http://www.thaiceramicsociety.com/pc\\_pre\\_grindmore.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php)

พงษ์แก้ว, อุดมสมุทรหิรัญ. (2559). *ตัวนำยิ่งยวดพื้นฐาน (พิมพ์ครั้งที่ 1.. ed.)*: กรุงเทพฯ :

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิมพ์เพ็ญ, พรเฉลิมพงศ์; และคนอื่นๆ. (2556). Ball mill / เครื่องบดแบบลูกบด หรือบอลมิลล์.

Retrieved from <http://www.foodnetworksolution.com>





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ปรีวัตร คำทา
วัน เดือน ปี เกิด	28 ธันวาคม 2537
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2561 การศึกษาระดับบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	9 หมู่ 3 ต.หนองบัว อ.หนองบัว จ.นครสวรรค์ 60110

