

การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO

ปริญญานิพนธ์
ของ
ฐิติพงศ์ เครือหงส์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มกราคม 2550

การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO

บทคัดย่อ
ของ
จิตติพงษ์ เครือหงส์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มกราคม 2550

จิตติพงศ์ เครือหงส์. (2550). การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO
ปริญญาานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ผศ.ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย, อ.สมศักดิ์
มณีรัตน์กุล.

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษากระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO โดยใช้วิธี solid state reaction มีสารตั้งต้นคือ ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) นำไป calcined เฝ้าชั้นกลาง และอบด้วยออกซิเจน แล้วจะได้สารที่เตรียมได้ลักษณะแผ่นกลมสีดำ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm มีความหนา 5 mm นำสารที่เตรียมได้วัดสมบัติด้วยเครื่อง XRD, SEM, EDS และ TEM พบว่าสารที่ได้มีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก (orthorhombic) และสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดย x มีค่าเป็น 0.2, 0.06, 0.04 และ 0.02 ตามลำดับของสารตัวอย่าง แล้วได้ศึกษาสมบัติของตัวนำยวดยิ่งโดยนำไปวัดอุณหภูมิวิกฤตและอิทธิพลสนามแม่เหล็กวิกฤตด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้นพบว่า อุณหภูมิวิกฤตมากที่สุดเท่ากับ 91 K และมีสนามแม่เหล็กวิกฤตมากที่สุดเท่ากับ 0.37 mT เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นค่าของกระแสวิกฤตที่ได้มีค่าลดลง สัดส่วนของออกซิเจนที่เหมาะสมเมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.02 จะให้ค่าของอุณหภูมิวิกฤตที่สูงสุด

PREPARATION AND CHARACTERIZATION ON Y-Ba-CuO SUPERCONDUCTORS

AN ABSTRACT
BY
THITIPONG KRUAEHONG

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
January 2007

Thitipong Kruaehong.(2007). *preparation and characterization on y-ba-cuo superconductors*. Master thesis,M.S.(Physics). Bangkok:Graduate School,Srinakharinwirot University. Advisor Committee:Assist.Prof. Pongkaew Udomsamuthirun,Somsak maneerattanakul.

The purpose of this research is to prepare Y-Ba-CuO superconductors by solid state reaction. A superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ sample is prepared from Y_2O_3 , BaCO_3 , and CuO powder. The powders are mixed and then calcined, intermediate fired, and the oxygen annealed. The sample with dimensions of 4 cm diameter and 5 mm thickness are prepared. Our samples are characterized by XRD, SEM, EDS and TEM, we find that they are orthorombic structure with $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ chemical formula with $x=0.2, 0.06, 0.04, 0.02$ respectively. The critical magnetic field and the critical temperature on superconductor are measured by using home-maded instrument and the maximum critical temperature and maximum critical magnetic field are at 91 K and 0.37 mT, respectively. We find that when the magnetic field is increased, the critical current is decreased and the sample with optimize oxygen concentration of $x= 0.02$ can give the maximum critical temperature.

การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยิ่งยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

ปริญญานิพนธ์
ของ
ฐิติพงศ์ เครือหงส์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มกราคม 2550
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยิ่งยวดกลุ่มY-Ba-CuO
ของ
จิตติพงศ์ เครือหงส์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)
วันที่.....เดือน มกราคม พ.ศ. 2550

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ)

..... กรรมการ
(อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตนกุล)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ดร.ดวงมณี ลออรรถพงศ์)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร โอสนาจันทร์)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลงได้ ด้วยความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.พงษ์แก้ว
อุดมสมุทรหิรัญ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัย และอาจารย์สมศักดิ์
มณีรัตนกุล ที่ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย
ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชนากร โอสธจันทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็น
คณะกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์
ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบคุณ คุณเสริมสุข รัตเร่ง และ คุณ ฐัญพ นิลกำจร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกใน
การใช้อุปกรณ์การทดลองในการทำวิจัย

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยขั้นนี้

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่คอย
ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และญาติๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจ และ
สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยตลอดมา

จิตติพงศ์ เครือหงส์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ประวัติการค้นพบตัวนำวดยิ่ง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	9
ความสำคัญของการวิจัย.....	9
ขอบเขตของการวิจัย.....	9
2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
4 ผลการวิจัย.....	41
5 สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	86
สรุปผล.....	95
อภิปรายผล.....	95
ข้อเสนอแนะ.....	95
บรรณานุกรม.....	96
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	100

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวินของตัวนำยวดยิ่ง.....	13
2 แสดงสูตรทางเคมีของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 4 ตัวอย่าง.....	75
3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลขและอุณหภูมิวิกฤต.....	87
4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง แต่ละหมายเลข.....	92
5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากการวัดของเครื่องมือมาตรฐานของตัวนำ ยวดยิ่งแต่ละหมายเลข.....	93
6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลจากการวัดของเครื่องมือที่สร้างขึ้นและเครื่อง XRD SEM EDS TEM ของตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลข.....	93

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าและอุณหภูมิของปรอทบริสุทธิ์.....	1
2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับอุณหภูมิ.....	2
3	แสดงตัวนำปกติในสนามแม่เหล็กและตัวนำยวดยิ่งในสนามแม่เหล็ก.....	3
4	แสดงฟลักซ์แม่เหล็กขณะตัวนำยวดยิ่งอยู่ในสภาพปกติและเมื่ออยู่ในสภาพนำยวดยิ่งแล้วนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกจะมีฟลักซ์แม่เหล็กถูกกักอยู่.....	4
5	แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกับปีการค้นพบ.....	5
6	แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมีระนาบ CuO ซ้อนเป็นชั้นๆของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO.....	7
7	แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมีระนาบ CuO ซ้อนเป็นชั้นๆของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Hg-Ba-Ca-CuO ซึ่งยังไม่ได้เจือด้วยTl.....	7
8	แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงของสารประกอบประเภทเซรามิกออกไซด์.....	8
9	แสดงการเสีรูปทรงของโครงผลึกเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในโครงผลึกและทำอันตรกิริยากับไอออนบวกในโครงผลึก.....	11
10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กภายนอกและสนามแม่เหล็กภายในเมื่ออุณหภูมิคงที่.....	14
11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กภายในและค่าสนามแม่เหล็กระหว่างตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2.....	15
12	แสดงการความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาของการเผาสารกลุ่ม Y-Ba-CuO.....	21
13	แสดงตัวนำยวดยิ่ง และการต่อขั้วการวัดแบบ 4 ขั้ว.....	22
14	แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ปั๊มเกอร์ 3 ใบ.....	23
15	แสดงความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มY-Ba-CuO.....	23
16	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤต.....	24
17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของสาร $Y Ba_2Cu_3O_{7-x}$ และความถี่ของวงจร TDOS.....	25
18	แสดงวัสดุอุปกรณ์ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง.....	26

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ แสดงเป็นรูปร่างกลม $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ แสดงเป็นรูปสี่เหลี่ยม และทองแดงแสดง เป็นรูปกากบาทของ Vandervoort, Willingham; & Morris.....	27
20	แสดงการหาค่าของกระแสวิกฤตของบริษัท PHYWE จำกัด.....	28
21	แสดงการประมาณค่าของกระแสวิกฤตของบริษัท PHYWE จำกัด.....	29
22	แสดงการวัดวัสดุและอุปกรณ์ในการวัดค่ากระแสวิกฤตจากขดลวดเฮมโฮลท์.....	29
23	แสดงกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็ก.....	30
24	แสดงค่าของกระแสวิกฤตที่ได้จากขดลวดเฮมโฮลท์.....	31
25	แสดงสีของสารก่อนการผสม.....	32
26	แสดงสารสีเทาเมื่อผสมเข้ากันแล้วก่อนการเผา.....	33
27	แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 1.....	33
28	แสดงสารที่ได้จากการเผาครั้งที่ 1.....	34
29	แสดงสารที่บดเป็นผงละเอียด.....	34
30	แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 2.....	35
31	แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 3.....	35
32	แสดงการต่อขั้ว การวัดแบบ 4 ขั้ว.....	37
33	แสดงวัสดุอุปกรณ์ในการหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO.....	38
34	แสดงวัสดุอุปกรณ์ของอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO.....	39
35	แสดงตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO ที่เตรียมได้.....	41
36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดหมายเลข 1 วัดครั้งที่ 1.....	42
37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดหมายเลข 1 วัดครั้งที่ 2.....	43
38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดหมายเลข 2 วัดครั้งที่ 1.....	44

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำวดยิ่งหมายเลข 2 วัดครั้งที่ 2.....	45
40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำวดยิ่งหมายเลข 3 วัดครั้งที่ 1.....	46
41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำวดยิ่งหมายเลข 3 วัดครั้งที่ 2.....	47
42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำวดยิ่งหมายเลข 4 วัดครั้งที่ 1.....	48
43	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำวดยิ่งหมายเลข 4 วัดครั้งที่ 2.....	49
44	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 950 mA.....	50
45	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.08 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 890 mA.....	51
46	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.34 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 550 mA.....	52
47	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.39 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 450 mA.....	53
48	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งหมายเลข 1.....	54
49	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 930 mA.....	55
50	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.06 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 850 mA.....	56
51	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.36 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 550 mA.....	57
52	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.41 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 450 mA.....	58
53	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งหมายเลข 2.....	59
54	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่ากระแสวิกฤต 980 mA.....	60
55	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.07 mT มีค่ากระแสวิกฤต 900 mA.....	61
56	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.35 mT มีค่ากระแสวิกฤต 480 mA.....	62
57	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.40 mT มีค่ากระแสวิกฤต 420 mA.....	63
58	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3.....	64
59	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่ากระแสวิกฤต 950 mA.....	65
60	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.05 mT มีค่ากระแสวิกฤต 890 mA.....	66
61	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.37 mT มีค่ากระแสวิกฤต 500 mA.....	67
62	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.41 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 450 mA.....	68

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

63	แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4.....	69
64	แสดงหลักการทำงานของเครื่อง XRD(X-Ray Diffraction).....	70
65	แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 มีโครงสร้าง แบบออร์โทโรมบิก และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$	71
66	แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 มีโครงสร้าง แบบออร์โทโรมบิก และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.94}$	72
67	แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3 มีโครงสร้าง แบบออร์โทโรมบิก และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.96}$	73
68	แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 มีโครงสร้าง แบบออร์โทโรมบิก และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.98}$	74
69	แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy).....	76
70	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 ที่กำลังขยาย 1000.....	77
71	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 ที่กำลังขยาย 5000.....	77
72	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 ที่กำลังขยาย 10000.....	77
73	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 ที่กำลังขยาย 1000.....	78
74	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 ที่กำลังขยาย 5000.....	78
75	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 ที่กำลังขยาย 10000.....	78
76	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ที่กำลังขยาย 1000.....	79
77	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ที่กำลังขยาย 5000.....	79
78	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ที่กำลังขยาย 10000.....	79
79	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 ที่กำลังขยาย 1000.....	80
80	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 ที่กำลังขยาย 5000.....	80
81	แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 ที่กำลังขยาย 10000.....	80
82	แสดงหลักการทำงานของเครื่อง EDS (Energy Dispersive Spectrometer).....	81
83	แสดงปริมาณธาตุที่มีอยู่ในตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO.....	82
84	แสดงหลักการทำงานของเครื่อง TEM (Transmission Electron Microscopy).....	83
85	แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1.....	84
86	แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2.....	84
87	แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3.....	85

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

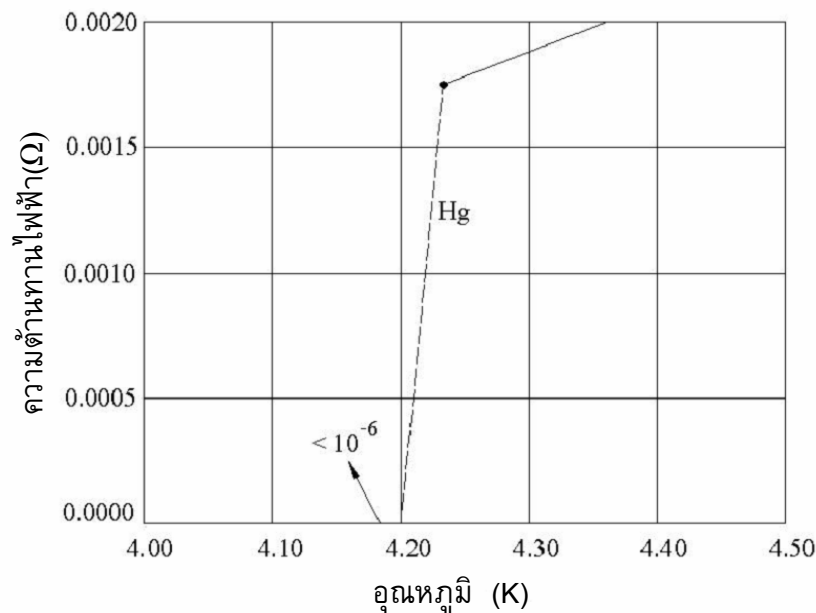
88	แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4.....	85
89	แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 เมื่อ $I_C=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.63 mT.....	88
90	แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 เมื่อ $I_C=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.68 mT.....	89
91	แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3 เมื่อ $I_C=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.63 mT.....	90
92	แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 เมื่อ $I_C=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.64 mT.....	91
93	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนที่มีผลต่ออุณหภูมิวิกฤต.....	94

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปี ค.ศ. 1911 นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อคาร์เมอร์ลิงก์ ออนเนส (Kamerlingh Onnes. 1911:3) ได้ทดลองศึกษาว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์โดยใส่ปรอทลงในภาชนะรูปวงแหวนแล้วแช่ลงในฮีเลียมเหลวเมื่ออุณหภูมิของปรอทลดลงอย่างสม่ำเสมอถึงอุณหภูมิ 4.2 K พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทดังกล่าวนั้นมีค่าเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใด เรียกสภาพดังกล่าวนี้ว่าสภาพนำยวดยิ่ง (Superconductivity) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้ปรอทหมดความต้านทานไฟฟ้านี้ว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c) ดังภาพประกอบ 1



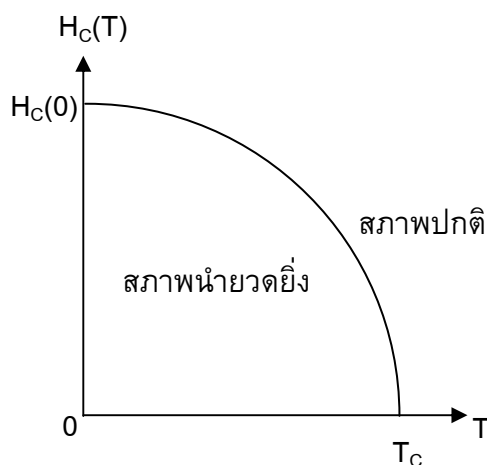
ภาพประกอบ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าและอุณหภูมิของปรอทบริสุทธิ์

ที่มา: Buckel. (1991): *Fundamental and Applications*.p: 3.

และในปีเดียวกัน ออนเนส (Kamerlingh Onnes. 1911:3) ได้นำปรอทรูปวงแหวนนั้นใส่กระแสไฟฟ้าให้แก่อปรอทแล้วนำเอาแหล่งจ่ายไฟฟ้าออกไปกระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปนั้น จะมีค่าที่คงตัวตลอดเวลาเนื่องจากไม่มีผลของความต้านทานไฟฟ้าในตัววัสดุเลยเรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่นี้ว่า กระแสยืนยง (Persistent current)

จากนั้นในปี ค.ศ. 1913 ออนเนส (Kamerlingh Onnes. 1911:3) ได้ทดลองศึกษาถึงสมบัติของสภาพนำยวดยิ่งโดยปล่อยให้กระแสไฟฟ้าให้ไหลในขณะเกิดสภาพนำยวดยิ่ง แล้วเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าให้มีค่าสูงกว่าค่าหนึ่งของตัวนำดังกล่าว กระแสไฟฟ้างกล่าวจะสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจากสภาพนำยวดยิ่งให้เป็นสภาพปกติได้ เรียกความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าค่านี้ว่า “ความหนาแน่นกระแสวิกฤต” (Critical current density, J_c) ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้างกล่าวนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ (T) คือ J_c มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ T ลดลง

ในปี ค.ศ. 1914 ออนเนส (Kamerlingh Onnes. 1911:3) ได้พบสมบัติอีกประการหนึ่งว่าสนามแม่เหล็กมีสมบัติที่สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้เช่นเดียวกันกับกระแสไฟฟ้างกล่าวคือ ถ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งที่สามารถรับได้ แล้วตัวนำยวดยิ่งก็จะเกิดการกลายสภาพเป็นตัวนำปกติจากการทดลองสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับอุณหภูมิ

ที่มา: Kresin; & Wolf. (1990): *Fundamental of Superconductor* .p:10.

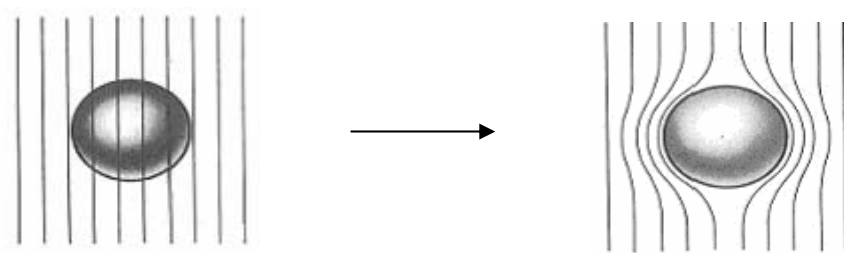
และสามารถเขียนสมการของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ขึ้นกับอุณหภูมิได้ดังนี้

$$H_c(T) = H_c(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right) \quad \dots\dots(1.1)$$

เมื่อ $H_c(0)$ และ $H_c(T)$ คือสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ และที่อุณหภูมิ T ใดๆ ตามลำดับ และ T_c คืออุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งนั้น

ในปี ค.ศ. 1933 ไมส์เนอร์และออกเซนเฟลด์ (Meissner ;& Ochsenfeld. 1958: 606) ได้พบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่งอีกประการหนึ่งคือเมื่อตัวนำยวดยิ่งถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยวดยิ่งจะเกิดสภาพนำยวดยิ่งจากนั้นใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไม่สามารถพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ ในทางกลับกันถ้าตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยวดยิ่งนี้จะเปลี่ยนสภาพจากสภาพนำยวดยิ่งเป็นสภาพปกติ สนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจึงสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)

ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ (ก) $T > T_c$

ตัวนำสภาพปกติในสนามแม่เหล็ก

ภาพประกอบ (ข) $T < T_c$

ตัวนำสภาพยวดยิ่งในสนามแม่เหล็ก

ภาพประกอบ 3 (ก) แสดงตัวนำปกติในสนามแม่เหล็ก (ข) แสดงตัวนำยวดยิ่งในสนามแม่เหล็ก

ที่มา: Kittel. (1997): *Introduction to solid state Physics* .p:344.

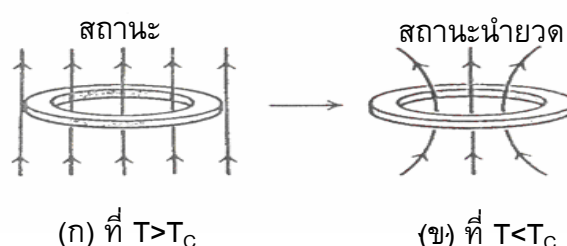
ถัดมาในปี ค.ศ. 1950 แม็กเวลและเรย์โนลส์ (Maxwell;& Reynold. 1950: 43) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ไอโซโทปโดยพบว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งเป็นปฏิภาคผกผันกับรากที่สองของมวลไอโซโทปเป็นไปตามสมการ

$$T_c \propto M^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots(1.2)$$

ก่อนหน้านี้ในปี ค.ศ. 1922 ออนเนสและไทน์ (Onnes;&Tuyn. 1922: 43) ได้เคยศึกษาปรากฏการณ์ไอโซโทปโดยใช้ไอโซโทปของตะกั่ว (Pb) แต่การทดลองก็ล้มเหลวอีก 19 ปีต่อมา JUSTI (Justi. 1941: 43) ได้พยายามอีกครั้งแต่ก็ล้มเหลวอีก ซึ่งปรากฏการณ์ไอโซโทปเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่แสดงให้เห็นว่าสาเหตุการเกิดสภาพนำยวดยิ่งนั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า สภาพนำยวดยิ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ และในปีเดียวกันโฟรลิช (Frohlich. 1950: 2621) ได้เสนอแนวความคิดที่ว่า

อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซคือสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่ง นอกจากนี้ยังได้มีการทดลองอื่นๆ อีกที่สนับสนุนแนวคิดนี้เช่นกันคือ การวัดสมบัติการสะท้อนคลื่นอินฟราเรด สมบัติการดูดกลืนของคลื่นอัลตราโซนิก (Rieck; et al. 1995: 3772) และผลที่ได้จากการวัดความร้อนจำเพาะของตัวนำยวดยิ่งได้พบว่าตัวนำยวดยิ่งมีช่องว่างพลังงานประมาณ 10^{-3} eV การค้นพบเหล่านี้ได้เป็นแนวทางที่ทำให้นักทฤษฎีคิดหาทฤษฎีเพื่อที่จะสามารถอธิบายสมบัติต่างๆ ของตัวนำยวดยิ่งได้และให้สอดคล้องกับการทดลองซึ่งมีทฤษฎีที่สำคัญคือ ทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory) ซึ่งได้นำเสนอแนวความคิดขึ้นในปี ค.ศ. 1957 โดย บาร์ดีน คูเปอร์และ ชริฟเฟอร์ (Bardeen, Cooper ;& Schriffer. 1957:1175-1204)

ก่อนหน้านี้ในปี ค.ศ. 1955 เดเวอร์ แฟร์แบงก์ และคณะ (Deaver, Fairbank ; et al. 1961: 43) ได้ค้นพบฟลักซ์ควอนไทเซชัน (Flux Quantization) ในตัวนำยวดยิ่งโดยได้นำตัวนำยวดยิ่งที่ทำเป็นรูปวงแหวนแล้วใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะที่ตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะพุ่งผ่านตัวนำยวดยิ่งได้แต่เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต แล้วได้นำสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปออกจะพบว่าฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกกักอยู่ภายในวงแหวนของตัวนำยวดยิ่งและจะมีค่าเท่ากับ $\frac{n\hbar c}{2e}$ โดยจะเพิ่มขึ้นเป็นค่าๆ ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนเต็มคือ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ เมื่อ $\hbar$ เป็นค่าคงที่ของพลังค์ ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 (ก) แสดงฟลักซ์แม่เหล็กขณะตัวนำยวดยิ่งอยู่ในสถานะปกติ
(ข) แสดงเมื่ออยู่ในสภาพนำยวดยิ่งแล้วนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกจะมีฟลักซ์แม่เหล็กถูกกักอยู่

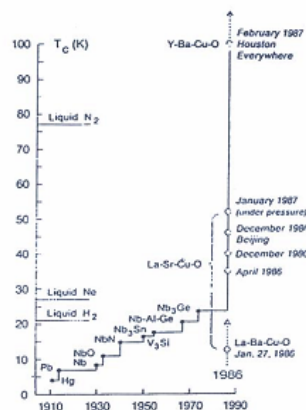
ที่มา: Fetter, & Walecka. (1995): *Quantum Theory of Many – Particle System*. p : 416.

จากภาพประกอบ 4 (ข) จากตัวนำยวดยิ่งที่เป็นรูปวงแหวนมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตและตัวนำยวดยิ่งดังกล่าวมีสภาพนำยวดยิ่ง จากนั้นเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กพบว่าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบวงแหวนเมื่อหยุดการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอกยังพบอีกว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลวนรอบวงแหวนอยู่นั้น จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กลอดผ่านพื้นที่วงใน

ของวงแหวน โดยมีค่าเท่ากับฟลักซ์ควอนตัม ซึ่งฟลักซ์ควอนตัมมีค่าเท่ากับ $\Phi = \frac{hc}{e^*}$ มีค่าเท่ากับ $4 \times 10^{-7} \text{ gauss} - \text{cm}^2$ และฟลักซ์แม่เหล็กที่วัดได้ $\Phi_0 = \frac{hc}{2e} = 2.0679 \times 10^{-7} \text{ gauss} - \text{cm}^2$ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่า $e^* = 2e$ เมื่อ e^* ประกอบด้วยอิเล็กตรอนสองตัวทำให้เป็นการยืนยันว่ากลไกของการเกิดสภาพนำยวดยิ่งมาจากคู่คูเปอร์ตามทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory)

1.2 การค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง

ในปี ค.ศ. 1986 เบทนอสและมูลเลอร์ (Bednorz ; & Muller 1986: 189) ได้ทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการของ IBM ที่เมืองซูริกส์ได้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งของสารกลุ่มใหม่ที่มีองค์ประกอบของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO_2) เป็นองค์ประกอบเรียกว่า คิวเพรต (Cuprate) และเป็นสารตัวแรกที่เป็นสารประกอบ คือ $\text{La}_2\text{BaCuO}_4$ ซึ่งเป็นสารประเภทเซรามิกคือ ที่อุณหภูมิห้องสารจะมีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่ถ้าหากลดอุณหภูมิลงจนต่ำกว่า 30 K สารจะเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่งได้ การค้นพบของเบทนอสและมูลเลอร์ทำให้กลุ่มนักฟิสิกส์คาดกันว่าจะต้องค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิห้องและการค้นพบของเบทนอสและมูลเลอร์ครั้งนี้เองทำให้กลุ่มนักฟิสิกส์มีความเข้าใจในแนวเดียวกันว่าตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิกว้างไม่เกิน 35 K เป็นตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional Superconductors) และเรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิกว้างสูงกว่า 35 K ว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductors) การพัฒนาการวิจัยทำให้การค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิกว้างสูงขึ้นไป ดังภาพประกอบ 5



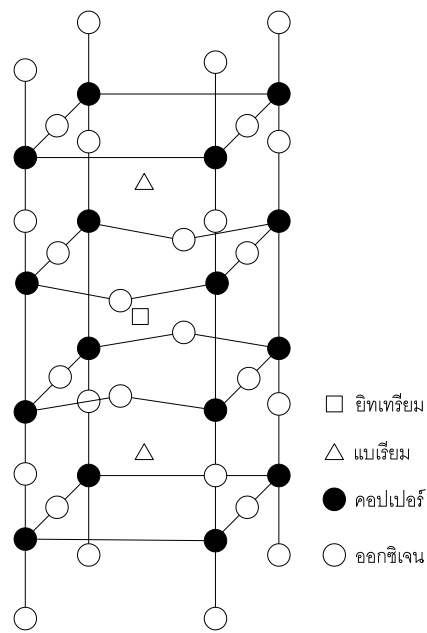
ภาพประกอบ 5 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกว้างของตัวนำยวดยิ่งกับปีการค้นพบ

ที่มา: Bennesman & Ketterson. (2003): *Physics of Superconductor* .p : 387.

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1911 ซึ่งเป็นปีของการค้นพบเป็นต้นมาการค้นคว้าวิจัยหาตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่ๆ ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงนั้นได้พัฒนาไปอย่างเชื่องช้าจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1973 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบโลหะผสมของไนโอเบียมและเจอร์มาเนียม (Nb_3Ge) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต 23.2 K จากนั้นเป็นเวลาหลายสิบปีนักวิทยาศาสตร์ก็ได้พยายามค้นคว้าวิจัยเพื่อให้ได้ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 23.2 K แต่ก็ไม่ประสบผลสำเร็จจึงทำให้เชื่อว่าตัวนำยวดยิ่งในธรรมชาติน่าจะมีอุณหภูมิวิกฤตที่จำกัดอยู่ประมาณ 35 K และเรียกตัวนำชนิดนี้ว่า “ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ” (Low Temperature Superconductors) หรือตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional Superconductors) ในทางปฏิบัติของการใช้งานตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ต้องใช้ฮีเลียมเหลวเป็นสารหล่อเย็น เนื่องจากฮีเลียมเหลวมีจุดเดือด 2.18 K ดังนั้นในการใช้งานฮีเลียมเหลวนั้นจะต้องใช้การกักเก็บความร้อนเป็นอย่างดี เพื่อที่จะรักษาสภาพนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิระดับต่ำมากๆ ไว้ให้นาน อีกประการหนึ่งก็คือฮีเลียมเหลวเป็นวัสดุที่ผลิตยากราคาแพงและสิ้นเปลือง

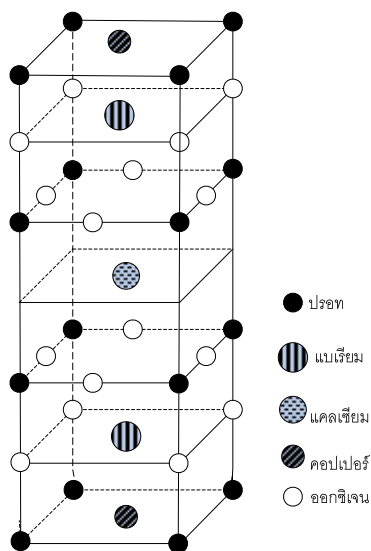
1.3 การค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงกลุ่ม Y-Ba-CuO

ในปี ค.ศ. 1987 ชูและคณะ (Chu; et al. 1987: 405) ได้ค้นพบสารกลุ่มคิวเพรทที่มีองค์ประกอบของแลนทานัม-แบเรียม-คิวเพรท (La-Ba-CuO) ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 40 K โดยใช้เทคนิคการเพิ่มความดันให้กับตัวนำยวดยิ่ง ในปีเดียวกันยังมีการค้นพบสารกลุ่มคิวเพรทใหม่อีกกลุ่มหนึ่งที่มีองค์ประกอบของยิทเทรียม-แบเรียม-คิวเพรท (Y-Ba-CuO) ดังภาพประกอบ 6 และมีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 90 K โดย ชูและคณะ (Chu; et al. 1987: 405) ได้ค้นพบสารประกอบเป็นครั้งแรกซึ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวที่ 77 K โดยสารประกอบนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Cava, et al. 2001: 54) ในปี ค.ศ. 1993 กลุ่มนักฟิสิกส์ที่เมืองซูริกส์ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ซึ่งมีชิลลิงและคณะ (Schilling; et al. 1993: 204) พบสารเซรามิกในกลุ่มปรอท-คิวเพรท มีอุณหภูมิ 138 K ภายใต้ความดันซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งที่ถูกเจือปนด้วยเทลเลียม (TI) สารดังกล่าวประกอบด้วยปรอท-เทลเลียม-แบเรียม-แคลเซียม-คิวเพรท (Hg-Tl-Ba-Ca-CuO) หลังจากนั้นการค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งที่ทำให้ได้อุณหภูมิวิกฤตสูงๆ ในกลุ่มเซรามิกอยู่เป็นจำนวนมาก จากรายงานในวารสารฟิสิกส์รีพอร์ทโดยไครสัน (Krison. 1997: 23) ในปี ค.ศ. 1997 พบว่าตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงมีเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นสารประกอบประเภทเซรามิกแล้วถึง 288,347 ชนิด ในเดือนเมษายน ค.ศ. 2000 กลุ่มนักฟิสิกส์ในห้องวิจัยนานาชาติรอร์แลนด์ เบิร์กเลย์ ร่วมกับมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียที่ได้พบตัวนำยวดยิ่งที่ทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงอยู่ในกลุ่มบิสมัท-สตรอนเชียม-แคลเซียม-คิวเพรท ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$) โดยใช้เทคนิคการโด๊ปซึ่งจะทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มจากเดิม 88 K เป็น 95 K จากภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงที่มีระนาบ CuO



ภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมีระนาบ CuO ซ้อนเป็นชั้นๆ ของ
ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

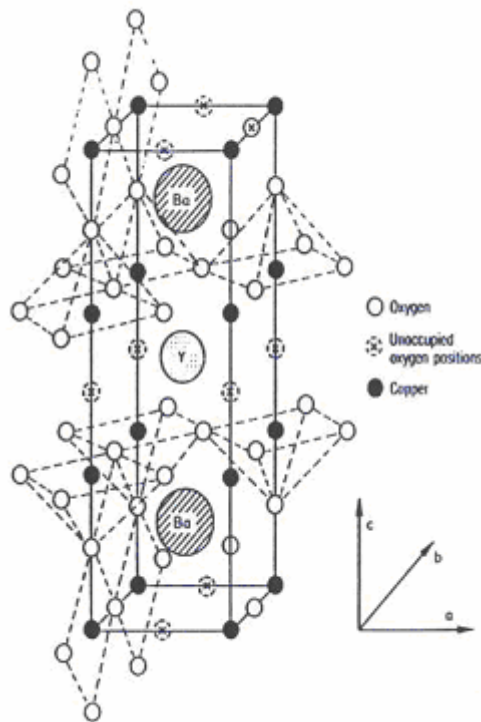
ที่มา: Buckel. (1991): *Fundamental and Applications*.p:295.



ภาพประกอบ 7 แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมีระนาบ CuO ซ้อนเป็นชั้นๆ ของ
ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Hg-Ba-Ca-CuO ซึ่งยังไม่ได้เจือด้วย Tl

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

การศึกษาโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงของสารประกอบเซรามิกได้ทำให้ทราบ ว่าโครงสร้างของสารประกอบได้ประกอบด้วยระนาบของ Cu-O_2 ที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ ดังภาพประกอบ 6 และในระหว่างชั้นนั้นมีอะตอมของโลหะชนิดอื่นคั่นอยู่ซึ่งอะตอมนี้เองจะทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการนำไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นได้ในระนาบของ Cu-O_2 โดยมี อิเล็กตรอนของอะตอมคอปเปอร์ (Cu) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งอีกประการ หนึ่งในการลดของอุณหภูมิก็ได้ทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนไปซึ่งการที่โครงสร้างของผลึก เปลี่ยนไปนี้เองเป็นสาเหตุที่ทำให้สารกลุ่มนี้แสดงสมบัติเป็นตัวนำยวดยิ่งได้ เพราะฉะนั้นสภาพนำ ยวดยิ่งจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระนาบ Cu-O_2 ที่มีอยู่ในโมเลกุล จึงทำให้กล่าวได้ว่าการนำ ไฟฟ้าของอิเล็กตรอนตัวนำยวดยิ่งในสองมิติ



ภาพประกอบ 8 แสดงโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงของสารประกอบประเภทเซรามิก ออกไซด์

ที่มา: Buckel. (1991): *Fundamental and Applications*.p:298.

นอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์พบว่าคู่คูเปอร์ในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงมีเลขควอนตัมของ โมเมนตัมเชิงมุม $\ell=2$ จึงเรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีเลขควอนตัมของโมเมนตัมเชิงมุมเท่ากับสองนี้ว่า ตัวนำยวดยิ่งแบบคลื่น “ดี” (d-wave superconductors) (Myers. 1997: 452)

ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎี BCS ที่ใช้อธิบายกรณีอิเล็กตรอนสองตัวที่จะคู่กันเป็นคูคูเปอร์ในลักษณะที่ทำให้โมเมนตัมเชิงมุมลัพธ์เป็นศูนย์ $\ell=0$ ซึ่งเรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีโมเมนตัมเชิงมุมเท่ากับศูนย์นี้ว่า ตัวนำยวดยิ่งแบบคลื่น “เอส” (s-wave superconductors) ทฤษฎี BCS สามารถอธิบายสมบัติต่างๆ ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำได้สอดคล้องกับการทดลองแต่สำหรับตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงนั้น ยังไม่อาจสรุปได้แน่ชัดว่าเกิดจากสาเหตุใด

1.4 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อสามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่งในกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นเองได้โดยใช้วิธี Solid state reaction
2. วัดค่าอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งได้โดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นเอง
3. เพื่อศึกษาสมบัติพื้นฐานบางประการของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงในกลุ่ม Y-Ba-CuO

1.5 ความสำคัญของการวิจัย

ทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้าง กระแสวิกฤตและอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งในกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่งในกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นเองได้
2. สามารถสร้างชุดอุปกรณ์เพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตและอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งในกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นเองได้
3. สามารถศึกษาสมบัติด้วยเครื่อง XRD(X-Ray Diffraction), SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), TEM (Transmission Electron Microscopy)

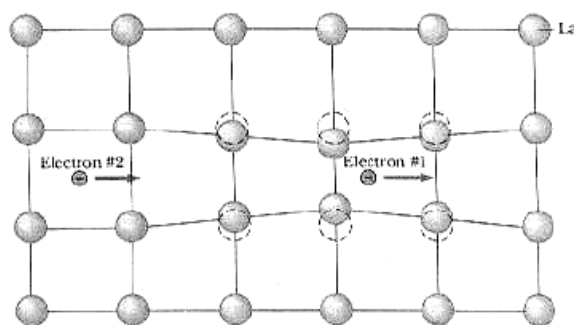
บทที่ 2

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่นับว่าได้ประสบความสำเร็จในการอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันสองทฤษฎีคือทฤษฎีบีซีเอส (BCS theory) (Bardeen, Cooper; & Schrifter. 1959:1175-1204) และทฤษฎีของกินซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginberg-Landau theory) (Poulter.1991:1-47) โดยแต่ละทฤษฎีนั้นได้เริ่มต้นจากแนวคิดที่ต่างกัน คือทฤษฎีบีซีเอสเป็นทฤษฎีที่สามารถอธิบายสภาพนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิวิกฤตต่ำๆ ได้ดี แต่ถ้าตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ ทฤษฎีบีซีเอสจะให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองและสำหรับทฤษฎีของกินซ์เบิร์กและแลนดาวสามารถที่จะอธิบายตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ ได้ดี ซึ่งจะให้ผลสอดคล้องกับการทดลองในบริเวณรอบๆ อุณหภูมิวิกฤตเท่านั้น ในช่วงที่ไกลออกไปจากอุณหภูมิวิกฤตทฤษฎีของกินซ์เบิร์กและแลนดาวจะให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองซึ่งนอกจากนี้แนวคิดเริ่มต้นของทั้งสองทฤษฎีนี้ได้เริ่มต้นมาจากคนละแนวคิดกล่าวคือแนวคิดทฤษฎีบีซีเอสนั้นได้เริ่มต้นจากการพิจารณาระบบในระดับจุลภาค (Microscopic) ส่วนในทฤษฎีของกินซ์เบิร์กและแลนดาวนั้นจะเริ่มอธิบายระบบในระดับมหภาค (Macroscopic) ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของทั้งสองทฤษฎีนี้ต่อไป

2.1 ทฤษฎีบีซีเอส (BCS theory)

ทฤษฎีบีซีเอสนับเป็นทฤษฎีที่ประสบความสำเร็จในการอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำได้ถูกเสนอโดยบาร์ดีน คูเปอร์ และชริฟเฟอร์ (Bardeen, Cooper; & Schrifter. 1959:1175-1204) ทฤษฎีนี้เรียกโดยย่อว่าทฤษฎีบีซีเอสโดยนำอักษรของผู้เสนอมาเป็นชื่อของทฤษฎี ซึ่งได้อธิบายกลไกที่สำคัญที่ทำให้ตัวนำปกติเป็นตัวนำยวดยิ่งได้คือ การจับคู่กันของอิเล็กตรอนหรือที่เรียกกันว่าคู่อคูเปอร์ (Cooper pairs) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีอิเล็กตรอนหมายเลขที่ 1 เคลื่อนที่เข้าไปในแลตทิซ (lattice) จะทำให้เกิดอันตรกิริยากับโครงผลึกซึ่งจะทำให้แลตทิซเกิดการเสียรูป ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 แสดงการเสีรูปทรงของแลตทิซเมื่ออิเล็กตรอนทำอันตรกิริยากับออสอนบวกใน
โครผลึก

ที่มา: Tsuei & Kirtley. (1996): *Scientific American*.p: 6.

อันตรกิริยาแบบนี้เป็นแบบอิเล็กตรอน-แลตทิซ-อิเล็กตรอน (electron-lattice –electron) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไประหว่างกลุ่มออสอนที่มีประจุบวกที่มีอยู่ในแลตทิซซึ่งอิเล็กตรอนดังกล่าวจะดึงดูดออสอนบวกในบริเวณรอบๆ ให้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้จึงเป็นสาเหตุทำให้แลตทิซเกิดการเสีรูปและทำให้บริเวณรอบๆ อิเล็กตรอนจะมีความหนาแน่นของออสอนบวกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ส่งผลกับอิเล็กตรอนหมายเลขที่ 2 ที่มีอยู่ในบริเวณเดียวกันจะถูกกลุ่มออสอนบวกดึงดูดเข้าไปจึงทำให้ดูเหมือนว่าอิเล็กตรอนตัวแรกดึงดูดตัวหลังซึ่งโดยปกติแล้วเมื่อออสอนบวกที่มีอยู่ในแลตทิซจะสั่นจะทำให้เกิดคลื่นเกิดขึ้นซึ่งคลื่นเกิดจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าไปในแลตทิซแล้วไปรบกวนออสอนบวกในแลตทิซที่สั่นอยู่เรียกสถานะกระตุ้นของแลตทิซนี้ว่าโฟนอน (phonon) การแลกเปลี่ยนโฟนอนระหว่างกันและกันของอิเล็กตรอนทำให้เกิดแรงดึงดูดที่สามารถที่จะเอาชนะอันตรกิริยาการผลักแบบคูลอมบ์ได้ จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถรวมกันเป็นคูคูเปอร์ได้ ซึ่งคูคูเปอร์นี้ประกอบด้วยคู่อิเล็กตรอนที่มีขนาดโมเมนตัมและสปินที่เท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกันและมีระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนคู่หนึ่งๆ ที่เรียกว่าความยาวอาพันธ์ (Coherent length, ξ) แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ ออสอนบวกในโครผลึกมีการสั่นเนื่องมาจากอิทธิพลจากความร้อนทำให้อันตรกิริยาผลักแบบคูลอมบ์มีมากกว่าอันตรกิริยาดึงดูดอิเล็กตรอนจึงไม่สามารถจับคู่กันได้

และเมื่ออิเล็กตรอนสองตัวมาจับคู่กันทำให้อิเล็กตรอนนั้นต้องสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งจึงเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างของพลังงาน (energy gap, Δ) สำหรับตัวนำยวดยิ่งที่เป็นไปตามทฤษฎีบีซีเอสจะมีโมเมนตัมเชิงมุมลัพธ์เป็นศูนย์ ($\ell=0$) เรียกตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ว่าตัวนำยวดยิ่งชนิดคลื่นเอส (s-wave) โดยมีช่องว่างพลังงานที่ผิวเฟอร์มิเกิดขึ้นได้สองลักษณะคือ ช่องว่างพลังงานที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic) และช่องว่างพลังงานที่ขึ้นกับทิศทาง (anisotropic)

ตามทฤษฎีบีซีเอสได้กำหนดแฮมิลโทเนียนของอิเล็กตรอนในตัวนำยวดยิ่งเป็น

$$H_{BCS} = \sum_{K\sigma} \varepsilon_K c_{K\sigma}^+ c_{K\sigma} + \sum_{KK'} V_{KK'} c_{K\uparrow}^+ c_{-K\downarrow}^+ c_{-K'\downarrow} c_{K'\uparrow} \quad \text{.....(2.1)}$$

เมื่อ ε_K คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน
 $c_{K\sigma}^+$ คือตัวนำเนินการสร้าง (Creation operator)
 $c_{K\sigma}$ คือตัวนำเนินการทำลาย (Annihilation operator)
 $V_{KK'}$ คือพลังงานศักย์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนสองตัวที่เป็นกลไกในการเกิดสภาพนำยวดยิ่ง
 σ คือดัชนีของสปิน

และพลังงานของคูคูเปอร์เป็น

$$E_K = \left(\varepsilon_K^2 + \Delta(T) \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ ε_K คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน
 $\Delta(T)$ คือช่องว่างพลังงานของที่อุณหภูมิ T
 มีสมการของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิที่ศูนย์เคลวินเป็น

$$\Delta(0) = 2\omega_D e^{-\frac{1}{\lambda}} \quad \text{.....(2.3)}$$

เมื่อ ω_D คือความถี่เดอบาย
 และมีสมการของอุณหภูมิวิกฤตเป็น

$$T_c = 1.13\omega_D e^{-\frac{1}{\lambda}} \quad \text{.....(2.4)}$$

เมื่อ λ คือค่าคงที่ของอันตรกิริยาดึงดูดของอิเล็กตรอนกับโฟนอน

โดย T_c แปรผันตาม ω_D และ ω_D แปรตาม $M^{-\frac{1}{2}}$

เมื่อ M คือมวลไอโซโทป และสมการนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ไอโซโทปได้ซึ่งจากทฤษฎีบีซีเอส จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ไอโซโทปเป็น

$$\alpha = \frac{1}{2} \quad \text{.....(2.5)}$$

แสดงว่าตามทฤษฎีบีซีเอสกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งที่มี อันตรกิริยาอิเล็กตรอน-โฟนอนเป็นกลไกสำคัญให้ค่าสัมประสิทธิ์ของไอโซโทปเป็น 0.5

จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2001 อะคิมิตสึและนากะมะซึ (Akimitsu; & Nagamatsu.

2000:1) นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นได้ค้นพบตัวนำชนิดใหม่คือแมกนีเซียมไดโบไรด์ (MgB_2) มีอุณหภูมิวิกฤต 40 K ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตมากกว่าเกือบสองเท่าของไนโอเบียมเจอร์มาเนียมซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมที่มี T_c สูงสุดคือ 23.3 K ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงอุณหภูมิวิกฤต T_c และสนามแม่เหล็กวิกฤต $H_c(0)$ ของตัวนำยวดยิ่ง

สาร	$T_c(K)$	$H_c(0)(\text{เทสลา})$
โลหะ		
Al	1.17	0.0105
Sn	3.72	0.0305
Pb	7.19	0.0803
Hg	4.15	0.0411
Nb	9.25	0.0206
V	5.40	0.0141
สารประกอบ Binary		
V_3Ga	16.5	27
V_3Si	17.1	25
Nb_3Al	20.3	34
Nb_3Ge	23.3	38
สารประกอบอื่น		
$U_3(\text{heavy fermion})$	0.53	2.1
$Rb_2C_{60}(\text{fullerene})$	31.3	≈ 30
สารประกอบ Cuprate		
$La_{2-x}Sr_xCuO_4(x \approx 0.15)$	39	≈ 45
$YBa_2Cu_3O_7$	92	≈ 140
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	89	≈ 107
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125	≈ 75
(Grosso, & Pastori. 2000:666)		
แมกนีเซียมไดโบไรด์	40	$H_c // ab(0)=14-39$
(Buzea, & Yamashita. 2001:26)		$H_c // c(0)=2-24$

ที่มา: Buzea; & Yamashita. (2001): *Review of Superconducting property of MgB_2* . p : 115-116.

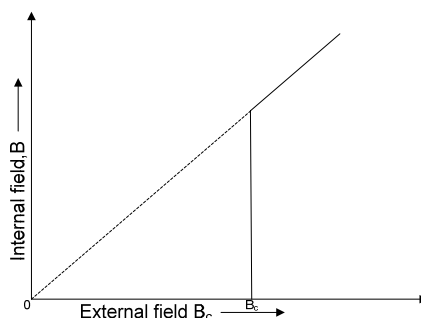
2.2 ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginberg-Landau theory, GL-theory)

ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ (phase transition) จากสภาพการนำปกติไปเป็นสถานะนำยวดยิ่งที่บริเวณอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง โดยแนวคิดเริ่มต้นของทฤษฎีนี้ได้มาจากการพิจารณาตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบ (order parameter) โดยตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบจะมีค่าที่ต่างกันไปแล้วแต่ปรากฏการณ์ที่ต้องการอธิบายโดยมีสมบัติสำคัญของตัวแปรที่บอกความเป็นระเบียบคือ ต้องมีค่าเป็นศูนย์เมื่อมีค่ามากกว่าอุณหภูมิวิกฤตและมีค่าจำกัดเมื่ออุณหภูมิมียุคต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต เช่น ในกรณีที่สารแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic) มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นสารแม่เหล็กพารา (Paramagnetic) ใช้ค่าแมกนีไทเซชัน (Magnetization) เป็นตัวแปรที่ใช้บ่งบอกความเป็นระเบียบเพราะเมื่อให้ความร้อนกับสารแม่เหล็กเฟอร์โรจนถึงอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) สารแม่เหล็กเฟอร์โรซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันไม่เป็นศูนย์จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นสารแม่เหล็กพารา ซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันเป็นศูนย์

สมบัติทางแม่เหล็กเป็นสมบัติที่ใช้ในการจำแนกตัวนำยวดยิ่งได้โดยทั่วไปแล้วจะสามารถจำแนกตัวนำยวดยิ่งได้เป็นสองประเภทตามสมบัติของแม่เหล็กคือ

2.3 ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 (Type I Superconductors)

โดยทั่วไปอุณหภูมิและสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงๆจะสามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้ถ้าสามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยที่อุณหภูมินั้นมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กภายนอกและสนามแม่เหล็กภายในเป็นไปตามภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กภายนอก (B_c) และสนามแม่เหล็กภายใน (B_i) เมื่ออุณหภูมิคงที่

ในกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (B_c) ตัวนำจะอยู่ในสถานะการนำสภาพปกติสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถทะลุผ่านตัวนำเข้าไปได้ แต่สำหรับกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตตัวนำจะอยู่ในสถานะการนำยวดยิ่ง สนามแม่เหล็กภายในมีค่าเป็นศูนย์การเปลี่ยนสถานะในลักษณะนี้คือการเปลี่ยนสถานะของตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 จากทฤษฎีกินเบิร์กและแลนดาวค่าความหนาแน่นของพลังงานอิสระในสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้เป็น

$$f_s = f_n + a|\psi|^2 + \frac{1}{2}b|\psi|^4 + \frac{1}{2m^*} \left| \left(-i\hbar \vec{\nabla} + \frac{e^*}{c} \vec{A} \right) \psi \right|^2 + \frac{h^2}{8\pi} \quad \dots(2.6)$$

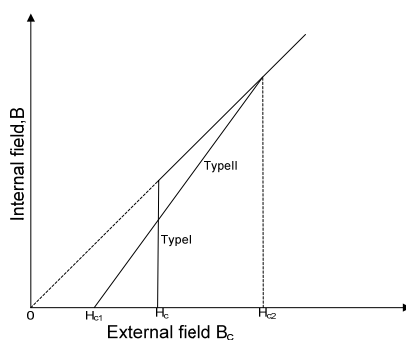
เมื่อ $\frac{h^2}{8\pi}$ คือ ความหนาแน่นพลังงานของสนามแม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งของตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 เป็น

$$H_c^2 = -\frac{4\pi a^2}{b} \quad \dots(2.7)$$

เมื่อ a และ b คือ ค่าคงตัวที่สามารถหาได้จากการทดลอง

2.4 ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 (Type II Superconductors)

สำหรับตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายในและสนามแม่เหล็กภายนอกดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 เปรียบเทียบการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กภายในและค่าสนามแม่เหล็กระหว่างตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

ที่มา: Buckel. (1991): *Fundamental and Applications*.p : 18.

เมื่อ $H > H_{c2}$ ตัวนำยวดยิ่งอยู่ในสถานะการณของนำปกติและถ้าสนามแม่เหล็กมีค่า $H < H_{c2}$ ตัวนำยวดยิ่งจะแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์คือสนามแม่เหล็กภายในตัวนำมีค่าเป็นศูนย์และอีกสถานะหนึ่งคือ ($H_{c1} < H < H_{c2}$) ตัวนำยวดยิ่งจะอยู่ในสถานะผสมระหว่างการนำแบบยวดยิ่งและการนำปกติโดยฟลักซ์แม่เหล็กสามารถทะลุผ่านได้บางส่วนเรียก H_{c1} ว่าเป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตที่หนึ่ง (Lower critical magnetic field; The first critical magnetic field) และเรียก H_{c2} ว่าเป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สอง (Upper critical magnetic field; The second critical magnetic field) จะสามารถหาค่าของ H_{c1} และ H_{c2} โดยใช้ทฤษฎีกินซ์เบิร์กแลนดาวได้ดังนี้

2.4.1 สนามแม่เหล็กวิกฤตบน

เริ่มต้นจากการพิจารณาในกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอก H มีค่าคงตัวและมีทิศทางอยู่ในแกน Z จะได้ค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตบนมีค่าเท่ากับ

$$H_{c2} = \frac{2m^*c}{\hbar e^*} |a| \quad \dots(2.8)$$

เมื่อ a และ c คือ ค่าคงตัวที่สามารถหาได้จากการทดลอง

2.4.2 สนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง

พิจารณาสถานแม่เหล็กที่มีค่ามากกว่าค่า H_{c1} ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กที่ทะลุผ่านเข้าไปในตัวนำยวดยิ่งมีค่าสม่ำเสมอจะได้ว่าค่า $\psi = 0$ สำหรับทุกๆ ตำแหน่งดังนั้นจะพิจารณาฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งไม่สม่ำเสมอแต่ถูกต้องอยู่กับที่ และมีการแทรกซึมอย่างสมมาตรซึ่งจะมีค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตล่างเป็น

$$H_{c1} \approx \frac{1}{2} \frac{\hbar c}{e^*} \frac{1}{\lambda^2} \ln \kappa \quad \dots(2.9)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการเกิดภาวะนำยวดยิ่งที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการวิจัยที่ได้ศึกษาถึงกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงโดยได้นำตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้มาทดสอบเพื่อวัดหาสมบัติพื้นฐานบางประการของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มดังกล่าวนี้ซึ่งได้มีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้เพื่อใช้ในการทดลองซึ่งมีรายละเอียดเรียงตามหัวข้อดังต่อไปนี้

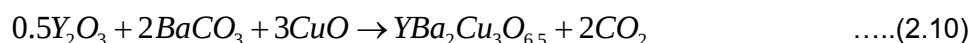
2.5 การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

เนื่องจากตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO เป็นตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มแรกๆ ที่ถูกค้นพบขึ้นในปี ค.ศ. 1987 โดยชูและคณะ (Chu; et al. 1987: 405) ซึ่งจากนั้นเป็นต้นมาได้มีการเผยแพร่ถึงวิธีการในการเตรียมของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้อย่างแพร่หลายทางอินเทอร์เน็ต ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกศึกษาการนำเสนอวิธีการเตรียมของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มดังกล่าวของบางกลุ่มวิจัยดังนี้

1. ในปี ค.ศ. 2003 บริษัทโคโรราโดฟิวเจอร์ไซน์ (Colorado Futurescience. 1988: online) ได้นำเสนอวิธีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ไว้โดยมีวัสดุอุปกรณ์ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ดังนี้

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1) ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) | 2) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) |
| 3) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) | 4) เตาเผาอุณหภูมิสูง |
| 5) ถ้วยอลูมินา | 6) ออกซิเจน |
| 7) ไนโตรเจนเหลว | |

ในการคำนวณหาสัดส่วนของมวลเป็นกรัมของสารตั้งต้นจากปฏิกิริยาทางเคมีของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งมีสูตรทางเคมีดังนี้คือ



จากปฏิกิริยาทางเคมีดังกล่าว จะสามารถคำนวณหาสัดส่วนของมวลเป็นกรัมออกมาได้จากสมการทางเคมี โดยแสดงให้เห็นว่าจากสูตรของ Y_2O_3 จะหมายถึง มีจำนวนของยิทเทรียมอยู่ 2 อะตอม และมีจำนวนของออกซิเจนอยู่ 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมยิทเทรียมมีค่าเท่ากับ 88.9059 ซึ่งจะหมายถึงยิทเทรียม 88.9509 กรัมจะมี 6.02×10^{23} อะตอม ส่วนออกซิเจนมีมวลอะตอมเท่ากับ 15.9996 จะหมายถึงออกซิเจน 15.9996 กรัม จะมี 6.02×10^{23} อะตอม ดังนั้นสำหรับยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) จะสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น

ในส่วนของยิทเทรียม : $Y_2 = 2 \times 88.9059 = 177.8118$

ในส่วนของออกซิเจน : $O_3 = 3 \times 15.9996 = 47.9988$

ดังนั้นมวลโมเลกุลในส่วนของ Y_2O_3 มีค่าเท่ากับ $177.8118 + 47.9988 = 225.8106$

ในส่วนของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) จะประกอบด้วยแบเรียม 1 อะตอม คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม ซึ่งมวลอะตอมของแบเรียมมีค่าเท่ากับ 137.3300 มวลอะตอมของคาร์บอน 12.0110 มวลอะตอมของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 3×15.9996 มีค่าเท่ากับ 47.9988

ดังนั้นมวลโมเลกุลในส่วนของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) มีค่าเท่ากับ $137.3300 + 12.0110 + 47.9988 = 197.3398$ กรัม และในส่วนของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) จะประกอบ

ด้วยคอปเปอร์ 1 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอมมวลอะตอมของคอปเปอร์มีค่าเท่ากับ 63.5460 และมวลอะตอมของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 15.9996

ดังนั้นมวลโมเลกุลในส่วนของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) มีค่าเท่ากับ
 $63.5460 + 15.9996 = 79.5456$

จะได้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมจากปฏิกิริยาเคมีนี้คือ

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) : $0.5 \times 225.8806 = 112.9403$ กรัม

แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) : $2 \times 197.3398 = 394.6796$ กรัม

คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) : $3 \times 79.5456 = 238.6368$ กรัม

ในทางปฏิบัติสามารถใช้อัตราส่วนของมวลที่ทำให้ให้น้อยลง ซึ่งทำได้โดยนำข้อมูลข้างบนมาหารตลอดด้วย 10 จะได้ว่า

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) เท่ากับ 11.29 กรัม

แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) เท่ากับ 39.47 กรัม

คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เท่ากับ 23.86 กรัม

ข้อควรระวังในการใช้สารเคมีโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) เป็นสารที่เป็นอันตรายดังนั้นในการผสมสารเคมีจึงควรมีหน้ากากกันฝุ่นและถุงมือเพื่อป้องกันอันตรายจากสารเคมีดังกล่าว

ในการสังเคราะห์ตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO มีด้วยกัน 4 ขั้นตอนด้วยกันคือ

- การผสมสารเคมี (Mixing the chemical)
- การเผาเริ่มต้น (Calcination)
- การเผาขั้นกลาง (The intermediate firing)
- การใส่ออกซิเจน (The Oxygen annealing)

ซึ่งมีรายละเอียดเรียงตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1.1) การผสมสารเคมี (Mixing the Chemicals)

การผสมสารเป็นกระบวนการเริ่มแรกของกระบวนการเตรียมตัวนำยิ่งยวดซึ่งจะต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการนี้โดยนำยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารดังกล่าวมีลักษณะเป็นผงโดยใช้สัดส่วนของมวลเป็นกรัมดังนี้ คือ

ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) เท่ากับ 11.29 กรัม

แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) เท่ากับ 39.47 กรัม

คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เท่ากับ 23.86 กรัม

ผสมสารทั้งสามให้เข้ากันในครกอลูมินาจนได้สารที่มีสีเทาจากนั้นนำไปสู่กระบวนการ

การเผาที่ 2

1.2) การเผาเริ่มต้น (Calcination)

นำสารสีเทาที่ได้จากข้อ 1 ใส่ในถ้วยอลูมินาแล้วเริ่มต้นกระบวนการเผาที่มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 925-950 °C เป็นเวลา 18 - 24 ชั่วโมง ทั้งนี้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 950 °C กระบวนการเผาเริ่มต้นนี้เป็นกระบวนการการขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)

สารที่ได้จากกระบวนการเผาครั้งนี้จะได้สารที่มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนสีดำมี รูพรุน แต่ถ้ามีสีเขียวแทรก แสดงว่าขั้นตอนของการผสมยังไม่ดีพอจากนั้นนำสารที่ได้ไปสู่กระบวนการเผาครั้งที่ 3

1.3) การเผาขั้นกลาง (The intermediate firing)

นำสารที่ได้จากกระบวนการที่ 2 ไปบดให้เป็นผงละเอียดด้วยครกอลูมินา แล้วใส่กลับไป ในถ้วยอลูมินาอีกครั้ง แล้วนำไปเผาในขั้นตอนต่อไปโดยให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอจนถึงอุณหภูมิ 500 °C แล้วเริ่มให้ออกซิเจนเข้าไปในเตา การใส่ออกซิเจนนี้ เรียกว่า Oxygen annealing จนอุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการนี้จะอยู่ที่ 950 °C แล้วคงที่อุณหภูมินี้ไว้ อย่างน้อย 18 ชั่วโมง

จากนั้นลดอุณหภูมิลง ซึ่งการลดอุณหภูมิก็คือเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ควรลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ อย่างสม่ำเสมอ คือช่วงอุณหภูมิจาก 950 °C ถึง 400 °C การลดลงของอุณหภูมิจะต้องไม่มากกว่า 100 °C ต่อชั่วโมง จนกระทั่งอุณหภูมิตั้ง 400 °C อัตราการลดลงของอุณหภูมิ อาจจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 200 °C ต่อชั่วโมงได้จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง

เมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำสารที่ได้ไปบดอีกครั้งจะได้เป็นผงสีดำสนิท ไปขึ้นรูปด้วยการอัดให้แน่นก่อนที่จะนำไปเผาดังกระบวนการต่อไป ในกระบวนการเผาครั้งที่ 4

1.4) การใส่ออกซิเจน (The oxygen annealing)

นำสารได้จากกระบวนการที่ 3 ใส่ในถ้วยอลูมินาอีกครั้งแล้วนำไปเผาซึ่งการให้อุณหภูมิแก่สารในขั้นตอนนี้ จะเพิ่มอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ จนถึงอุณหภูมิระหว่าง 950 -1000 °C อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 950 °C แล้วคงที่อุณหภูมินี้ไว้ 18 ชั่วโมง ถ้าอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 1000 °C จะเป็นการเสี่ยงต่อการทำลายโครงสร้างของสารดังกล่าวและอาจจะทำให้สารติดกับถ้วยอลูมินาได้ แล้วเริ่มให้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 950 °C นี้เท่านั้น

การลดลงของอุณหภูมิมี่ความจำเป็นอีกเช่นกันคือ ควรลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ และอย่างสม่ำเสมอภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน อัตราการลดลงของอุณหภูมิไม่ควรเกิน 100 °C ต่อชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ 950-900 °C และจะต้องใส่ออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง และการลดอุณหภูมิลงจาก 900 °C ถึง 300 °C และต้องแน่ใจว่าออกซิเจนจะต้องเข้าถึงสารที่เผาอยู่ตลอดเวลา

ถ้าอากาศภายในเตาไม่มีออกซิเจนมากพอเมื่ออุณหภูมียังคงสูงกว่า 400 °C สารนั้นอาจจะสูญเสียออกซิเจนที่มีความจำเป็นต่อโครงสร้างของสารได้เมื่ออุณหภูมิตั้ง 400 °C จะเพิ่มอัตราการลดลงของอุณหภูมิได้ แล้วลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง

ในทางปฏิบัติพบว่าแล้วการเริ่มต้นในการผสมและการบดสารแต่ละครั้งในแต่ละของกระบวนการเผาเป็นสิ่งที่สำคัญในการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้

2. ในปี ค.ศ. 2003 กลุ่ม Inorganic chemistry Laboratory.(Inorganic chemistry Laboratory. 2003: online) ได้มีการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ดังนี้

2.1 คำนวณสัดส่วนมวลของยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยนำสารทั้งสามผสมให้เข้ากันในครกอลูมินาและควรจะคลุกสารทั้งสามในตู้ดูดควันเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของสารดังกล่าว

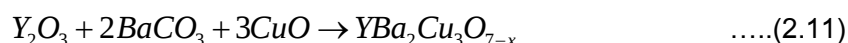
2.2 นำสารที่ผสมเข้ากันแล้วจากกระบวนการขั้นต้นไปบดแล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นรูปเม็ด

2.3 ระวังอย่าให้เม็ดแตกเพราะว่าเม็ดดังกล่าวเปราะและหักง่าย

2.4 จากนั้นนำไปใส่ในถ้วยอลูมินาแล้วเริ่มการเผาสารที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา $100^{\circ}C$ ทุกๆ 10 นาทีจนถึงอุณหภูมิ $900^{\circ}C$ คงที่อุณหภูมินี้ไว้ 15 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิของเตาลงจาก $900^{\circ}C$ ถึง $500^{\circ}C$ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะใช้เวลาประมาณ 1 วัน แล้วปิดฝาเตา แล้วลดอุณหภูมิของเตาลงอีกครั้งจนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง

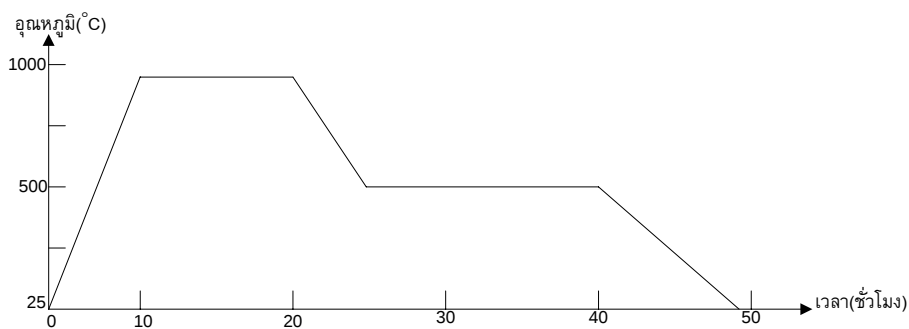
3. ในปี ค.ศ. 2006 ชุนีและคณะ (Suny; et al. 2006: online) ซึ่งได้มีกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ดังนี้

จากปฏิกิริยาทางเคมี



นำยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งจากปฏิกิริยาทางเคมีสามารถคำนวณมวลเป็นกรัมออกมาได้จากนั้นเทสารแต่ละชนิดใส่แต่ละปิกเกอร์ โดยต้องแน่ใจว่าแต่ละปิกเกอร์นั้นจะต้องแห้งและสะอาดแล้วเทสารทั้งสามลงในครกอลูมินาแล้วใช้สากบดให้เข้ากันในตู้ดูดควันใช้เวลาประมาณ 10 นาที ถ้าสารยังจับตัวเป็นก้อนอยู่ อาจจะใช้ช้อนตักสารบดให้ละเอียดได้เมื่อดูด้วยสายตาผ่งที่ได้จากการผสมจนไม่จับตัวกันเป็นก้อนและต้องไม่เห็นสารที่มีสีดำปรากฏอยู่ซึ่งสุดท้ายแล้วผลจากการผสมจะต้องเป็นเนื้อเดียวกันและมีสีเทา

นำผงสีเทาดังกล่าวไปอัดเป็นรูปเม็ดการอัดขึ้นรูปเป็นรูปเม็ดในตอนแรกนี้ สารที่ได้จะมีความเปราะและเกิดการแตกหักง่ายซึ่งเป็นเรื่องที่ต้องระมัดระวัง จากนั้นนำไปใส่ในถ้วยอลูมินาแล้วนำไปสู่กระบวนการเผาซึ่งมีการเพิ่มและการลดอุณหภูมิดังนี้



ภาพประกอบ 12 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาของการเผาสารกลุ่ม Y-Ba-CuO

ที่มา: Suny; et al.(1995). Material Chemistry-Superconductor . p :1-3.

จากภาพประกอบ 12 ให้ความร้อนแก่สารโดยเริ่มต้นการเผาที่อุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิ 25°C แล้วเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 930°C แล้วคงที่อุณหภูมินี้ไว้ 10-12 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิ 500°C เริ่มให้ออกซิเจนเป็นเวลา 10-12 ชั่วโมง หรือ อาจจะใช้ ออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศก็ได้จากนั้น หยุดการให้ออกซิเจนแล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ อีกครั้งจนอุณหภูมิลดถึงอุณหภูมิห้องเมื่อเสร็จสิ้นจากกระบวนการเผาแล้วจะได้สารที่มีสีดำที่จับตัวกันเป็นก้อนแข็งและมีรูพรุนซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าเป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์และมีขั้นตอนการผสมสารเข้ากันได้ดีส่วนถ้ามีสีเขียวมสุมอยู่แสดงว่าการผสมสารในขั้นตอนแรกและการเผาสารยังไม่ดีพอ

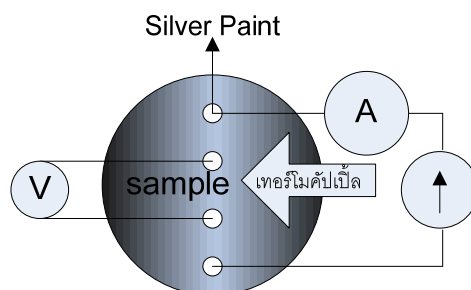
ข้อควรระวังของสารที่ใช้ในการเตรียมนำยวดยี่งสารที่ใช้เตรียมบางชนิดเป็นสารที่เป็นอันตรายควรหลีกเลี่ยงการสูดดมและอย่าให้สารเคมีเข้าตาและถูกกับผิวหนังโดยตรง

2.6 วิธีการหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยี่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ข้อหนึ่งไว้ว่าจะต้องสร้างชุดอุปกรณ์เพื่อใช้วัดหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยี่งกลุ่มนี้ได้โดยผู้วิจัยได้ค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตซึ่งมีอยู่หลายวิธีด้วยกันดังนี้

1. ในปี ค.ศ. 1997 ลีออนโรสซาโน (Leon Rossno.1997:1024-1026) ได้นำเสนอวิธีการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยี่งโดยนำตัวนำยวดยี่งมาต่อขั้วการวัดแบบ 4 ขั้ว ดังภาพประกอบ 13 เพื่อที่จะวัดความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งการต่อขั้วการวัดใช้การต่อแบบ 4 จุดนี้ เรียกว่า Four points probe โดยได้ทำขั้วการวัดด้วย Silver paint โดย 2 ขั้วด้านนอกจะใส่ไฟฟ้ากระแสตรงส่วนอีก 2 ขั้ว ด้านในวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่ออยู่ใน

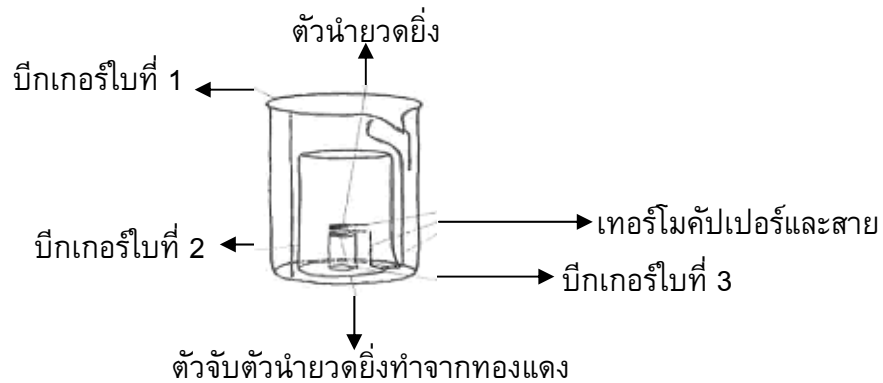
สภาพนำวยดยิ่ง ซึ่งตัวนำวยดยิ่งจะมีค่าของแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ในภาวะดังกล่าวและค่าของอุณหภูมิสามารถอ่านได้จากเทอร์โมคัปเปอเรอร์



ภาพประกอบ 13 แสดงตัวนำวยดยิ่ง (S) และการต่อขั้วการวัดแบบ 4 ขั้ว

ที่มา: Leon Rossano. (1997). *American Journal of Physic.* p : 1024-1026.

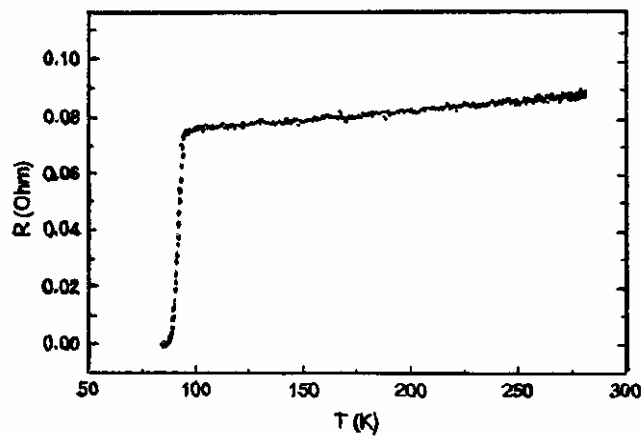
เมื่อเตรียมตัวนำวยดยิ่งและอุปกรณ์การวัดได้ดังภาพประกอบ 13 เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อมาก็คือการสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิโดยได้ใช้อุปกรณ์ที่มีในห้องปฏิบัติการมาใช้งานซึ่งประกอบด้วยบีกเกอร์จำนวน 3 ใบ โดยบีกเกอร์ใบที่ 1 มีปริมาตร 500 ml ใช้บรรจุไนโตรเจนเหลว เพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิบีกเกอร์ใบที่ 2 มีปริมาตร 150 ml ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวนำวยดยิ่งกับไนโตรเจนเหลวในบีกเกอร์ใบที่ 1 และบีกเกอร์ใบที่ 3 เป็น บีกเกอร์ใบที่อยู่ในบีกเกอร์ใบที่ 2 ซึ่งมีปริมาตร 5 ml ใช้เป็นฐานเพื่อตั้งตัวนำวยดยิ่งและมีตัวจับตัวนำวยดยิ่งทำด้วยทองแดงโดยตัวนำวยดยิ่งและตัวจับตัวนำวยดยิ่งนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm และมีความหนา 4 mm จึงจะสามารถยึดจับตัวนำวยดยิ่งได้ดี โดยมีกระบวนการทำการทดลองดังนี้ เริ่มจากเทไนโตรเจนเหลวลงในบีกเกอร์ใบที่ 1 จนเกือบท่วม บีกเกอร์ใบที่ 2 ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังของบีกเกอร์ใบที่ 2 กับตัวนำวยดยิ่งและจะต้องไม่ให้ไนโตรเจนเหลวสัมผัสกับตัวนำวยดยิ่งในบีกเกอร์ใบที่ 3 ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้บีกเกอร์ 3 ใบ

ที่มา: Leon Rossano. (1997). *American Journal of Physics*. p :1024-1026.

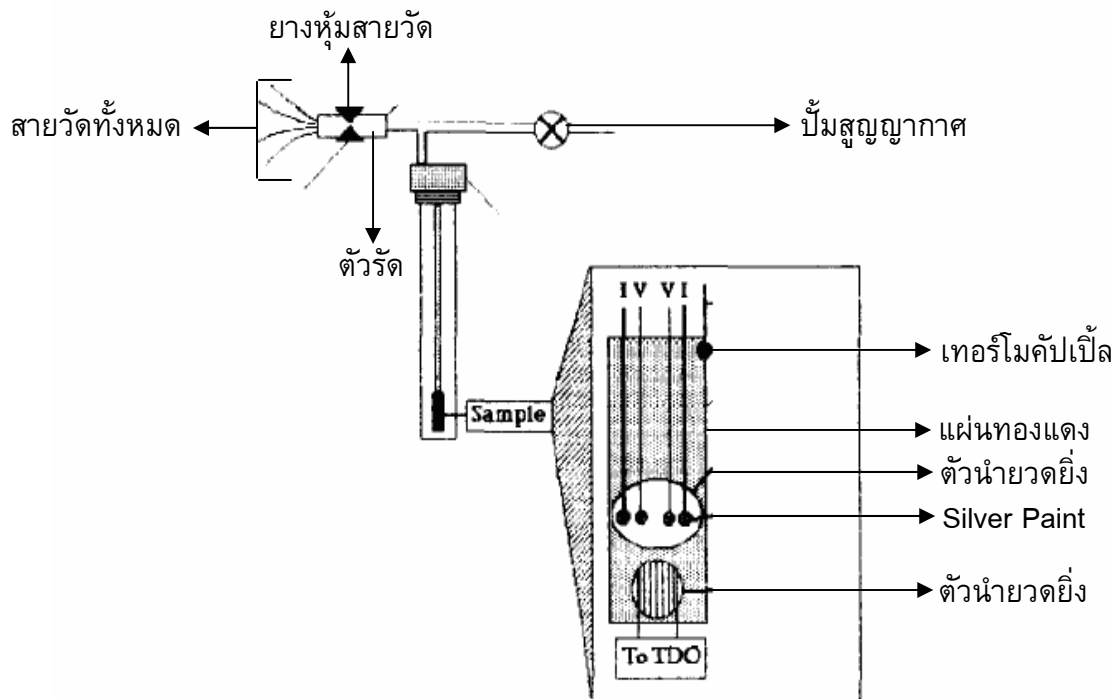
ผลการทดลองที่ได้จากภาพประกอบ 14 แสดงให้เห็นว่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปยังที่อุณหภูมิ 95 K ตัวนำยวดยิ่งแสดงสภาพของตัวนำปกติอยู่แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิประมาณ 91 K คืออุณหภูมิดังกล่าวนี้เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานเป็นศูนย์ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงตามอุณหภูมิ จากภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 แสดงความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

ที่มา: Leon Rossano. (1997). *American Journal of Physics*. p: 1024-1026.

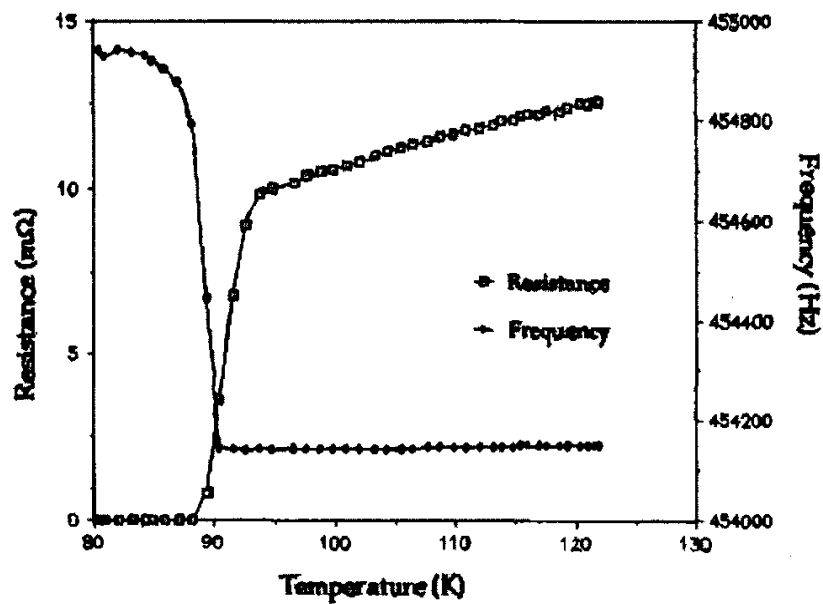
2. ในปี ค.ศ. 1988 เฟดเดอร์ริกและคณะ (Frederick; et al. 1988: 980-982) ได้ทดลองศึกษาหาค่าอุณหภูมิวิกฤตจากภาพประกอบ 16 โดยมีตัวนำยวดยิ่งอยู่ 2 ตัวอย่าง ซึ่งนำไปติดกับแผ่นทองแดงที่อยู่บริเวณเดียวกัน ตัวนำยวดยิ่งตัวแรกจะใช้วิธีการต่อขั้วการวัดแบบ 4 ขั้ว หรือที่เรียกว่า Four Points Probe เพื่อใช้ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าขณะที่เป็นเกิดสภาพนำยวดยิ่งแล้วเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับแผ่นทองแดงเพื่อวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะเกิดภาวะดังกล่าว ส่วนตัวนำยวดยิ่งตัวที่ 2 ต่อเข้ากับวงจร TDOS หรือ Tunnel Diode Oscillators ซึ่งใช้ในการวัดความถี่ขณะเกิดสภาพนำยวดยิ่งดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤต

ที่มา: Frederick; et al. (1988). *American Journal of Physic.* p : 980-982.

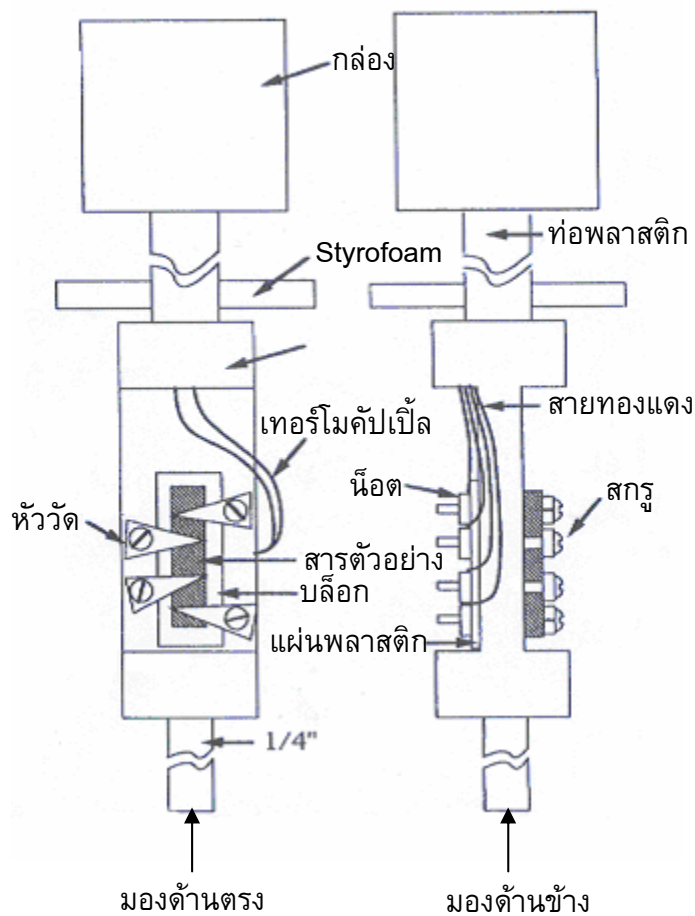
ผลการทดลองที่ได้ปรากฏว่าในขณะที่เกิดสภาพนำยวดยิ่งการเปลี่ยนของอุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเป็นมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของตัวนำยวดยิ่งอยู่ที่ประมาณ 90 K และในขณะเดียวกันความถี่ของวงจร TDOS ที่วัดได้จะมีค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดในขณะที่เกิดสภาพนำยวดยิ่งซึ่งก็เป็นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงข้ามกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งที่ลดลงของในขณะที่เกิดสภาพนำยวดยิ่งดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของสาร $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และความถี่ของวงจร TDOS

ที่มา: Frederick; et al. (1988). *American Journal of Physic.* p : 980-982.

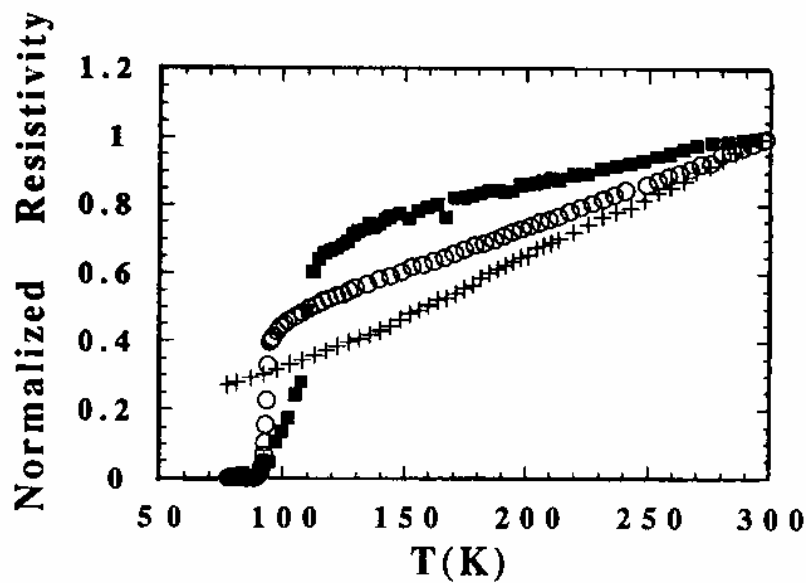
3. แวนเดอร์วูต วิลลิงแฮมและมอริส (Vandervoort, Willingham; & Morris. 1995: 759-760) ได้ทดลองศึกษาวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของการวัดแบบ 4 จุด หรือ Four Points Probe โดยขั้วการวัด 2 ขั้วภายนอกจะให้ไฟฟ้ากระแสตรงและอีก 2 จุด ภายในวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งจากออกแบบเครื่องมือการวัดความต้านทานไฟฟ้านี้จะหลีกเลี่ยงการบัดกรีระหว่างตัวนำยิ่งยวดกับขั้วการวัดซึ่งจะการใช้การสัมผัสกันระหว่างขั้วการวัดกับตัวนำยิ่งยวดดังแสดงในภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แสดงวัสดุอุปกรณ์ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยิ่งยวด

ที่มา: Vandervoort, Willingham; & Morris.(1995). *American Journal of Physic.* p : 759-760.

จากผลการทดลองพบว่า $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ซึ่งมีการลดความต้านทานอย่างทันทีทันใดจนเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 90 K มีความต้านทานลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ส่วน $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_8$ การลดลงของกราฟยังไม่ชัดเจนเท่าที่ควรอาจเนื่องจากมีสิ่งเจือปนในสารพบว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้จะอยู่ที่ประมาณ 110 K สำหรับทองแดงแสดงเป็นพบว่าความต้านทานลดลงตามอุณหภูมิเช่นเดียวกันดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ แสดงเป็นรูปวงกลม $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-x}$ แสดงเป็นรูปสี่เหลี่ยม และทองแดงแสดงเป็นรูปกากบาทของ Vandervoort, Willingham; & Morris.

ที่มา: Vandervoort, Willingham; & Morris. (1995). *American Journal of Physics*. p : 759-760.

2.7 ผลของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีอิทธิพลต่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

เนื่องจากตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO เป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง เมื่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่มดังกล่าวนี้ถูกหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวทำให้เกิดภาวะนำยวดยิ่งเกิดขึ้นหลังจากนั้นจะใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปแล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดผลปรากฏว่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความต้านทานในภาวะดังกล่าวเป็นศูนย์ด้วยซึ่งจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม แต่ถ้ากระแสที่ใส่เข้าไปมีค่ามากกว่าค่าหนึ่งที่ตัวนำยวดยิ่งจะสามารถรับได้ตัวนำยวดยิ่งนี้จะกลายเป็นตัวนำปกติกระแสไฟฟ้าที่ทำลายภาวะนำยวดยิ่งเรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่ากระแสวิกฤต

บริษัท PHYWE จำกัด (PHYWE. (1999):1-3) ได้ทดลองศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีอิทธิพลต่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นมาซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการวัดสมบัติดังกล่าวดังนี้

วัตถุประสงค์ในการทดลองหาค่าของกระแสวิกฤตมีดังนี้

- 1) ตัวนำยวดยิ่ง
- 2) เทอร์โมคัปเปอ์

- 3) ขาดัง
- 4) ขดลวดเฮมโฮล์ท 1 คู่
- 5) แท่งแม่เหล็ก
- 6) ถังโฟม
- 7) มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล
- 8) แหล่งจ่ายไฟ

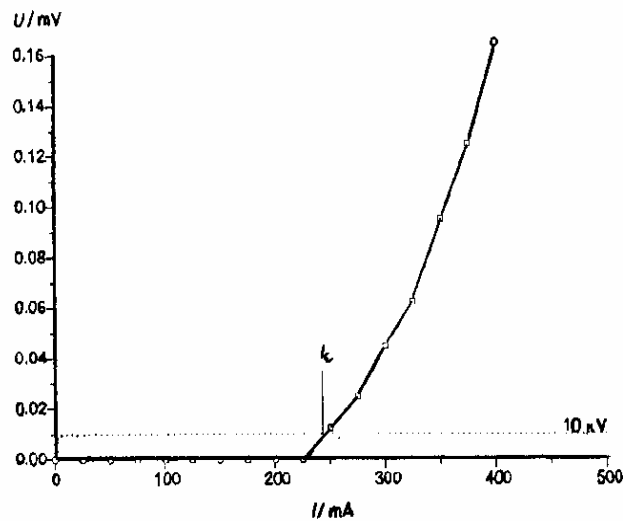
ซึ่งมีวิธีการทดลองอย่างง่ายในการหาค่ากระแสวิกฤตโดยการใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปแล้วสังเกตแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 แสดงการหาค่าของกระแสวิกฤตของบริษัท PHYWE จำกัด

ที่มา: PHYWE. (1999). *Influence of current and B – field*. p :1-3.

ผลปรากฏว่าเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 230 mA จะสามารถตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าได้ซึ่งมีค่า $10 \mu V$ ซึ่งเมื่อสามารถตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าได้ก็จะแสดงให้เห็นว่าสภาพนำยวดยิ่งได้ถูกทำลายซึ่งสามารถแสดงการประมาณค่าของกระแสวิกฤตได้ ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แสดงการประมาณค่าของกระแสฮอลล์ของบริษัท PHYWE จำกัด

ที่มา: PHYWE. (1999). *Influence of current and B – field*. p :1-3.

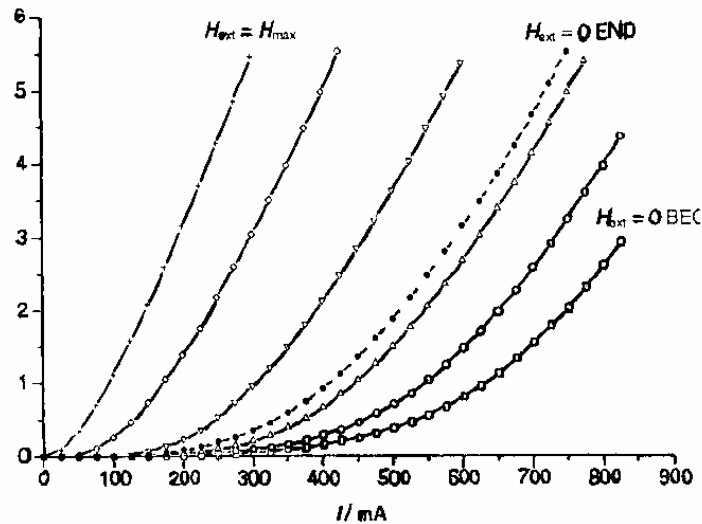
อีกสิ่งหนึ่งที่สามารถทำลายภาวะนำยวดยิ่งได้คือสนามแม่เหล็กโดยสนามแม่เหล็กที่ได้จะได้อมาจากการนำขดลวดเฮมโฮล์ทต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟซึ่งขดลวดเฮมโฮล์ทเป็นแหล่งกำเนิดที่ให้สนามแม่เหล็กที่มีค่าสม่ำเสมอและในการทดลองจะต้องตั้งตัวนำยวดยิ่งให้อยู่ตรงกึ่งกลางของขดลวดเฮมโฮล์ทเพื่อที่จะให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับตัวนำยวดยิ่งแล้ววัดค่าของกระแสฮอลล์ที่เกิดขึ้นจากการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปโดยได้ติดตั้งอุปกรณ์ตามภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 แสดงการวัดและอุปกรณ์ในการวัดค่ากระแสฮอลล์จากขดลวดเฮมโฮล์ท

ที่มา: PHYWE. (1999). *Influence of current and B – field*. p :1-3.

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอเข้าไปแล้ววัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นผลปรากฏว่ากระแสและแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นใส่สนามแม่เหล็กที่มีค่าต่างๆ กัน แล้ววัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะได้กราฟที่มีลักษณะที่แตกต่างกันดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 แสดงกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดเฮมโฮล์ท

ที่มา: PHYWE. (1999). *Influence of current and B – field*. p :1-3.

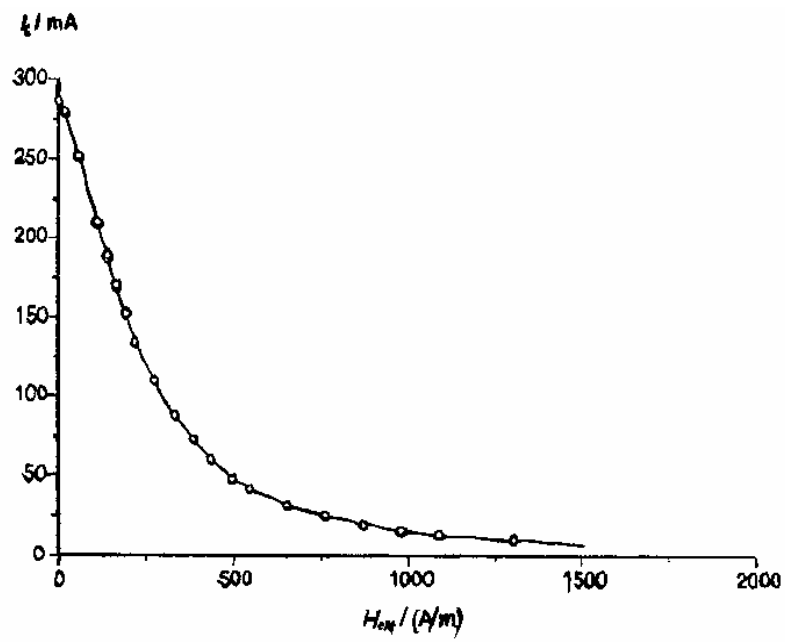
จากนั้นนำค่าของสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดเฮมโฮล์ทมาคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (2.12)

$$H = 0.715 \frac{nI}{r} \quad \dots\dots(2.12)$$

โดยทราบ

เมื่อ n มีค่าเท่ากับ 154 เป็นจำนวนของรอบขดลวดเฮมโฮล์ทแต่ละขด
 r เป็นรัศมีของขดลวดมีค่าเท่ากับ 0.2 m
 I เป็นกระแสไฟฟ้า

จะได้กราฟความสัมพันธ์แบบจุดต่อจุดดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 แสดงค่าของกระแสวิกฤตที่ได้จากขดลวดเฮมโฮล์ท

ที่มา: PHYWE. (1999). *Influence of current and B – field*. p :1-3.

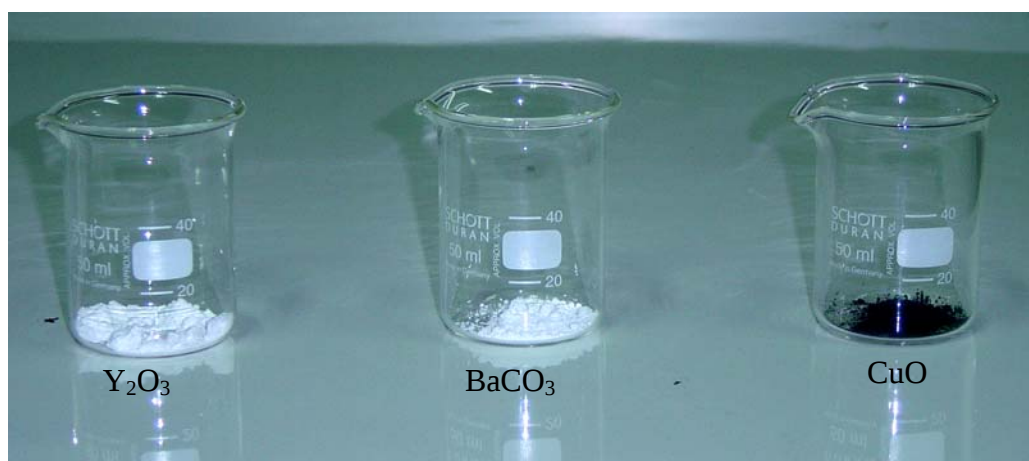
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการโดยได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นมาโดยใช้กระบวนการเผาแบบต่างๆ ดังแสดงในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการทดลองและได้วัดสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งตามหัวข้อดังต่อไปนี้

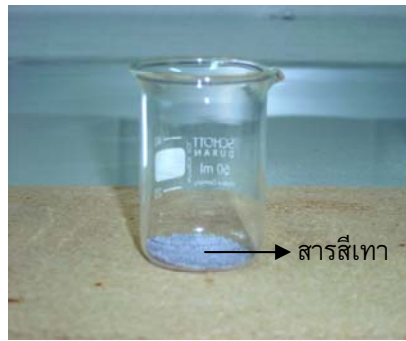
3.1 การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

ผู้วิจัยนำสารตั้งต้นตามสัดส่วนของมวลเป็นกรัมโดยประกอบด้วยยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) จำนวน 11.2905 g แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) จำนวน 39.4678 g และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) จำนวน 23.8636 g ซึ่งสารทั้งสามมีสีก่อนการผสมดังนี้



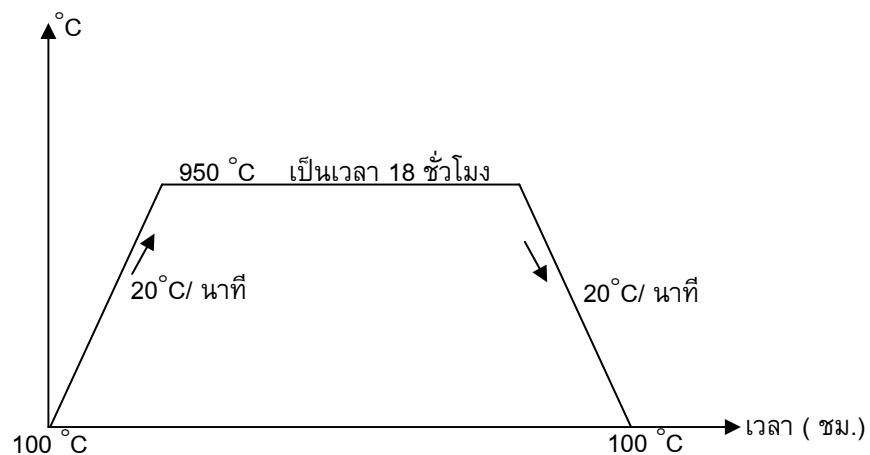
ภาพประกอบ 25 แสดงสีของสารก่อนการผสม

จากนั้นได้นำสารตั้งต้นทั้งสามมาคลุกให้เข้ากันในครกอลูมินาแล้วจะได้สารที่มีสีเทาและมีเนื้อเดียวกันตลอดจากภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 แสดงสารสีเทาเมื่อผสมเข้ากันแล้วก่อนการเผา

ให้นำสารที่ผสมเข้ากันดังกล่าวนำไปใส่ในถ้วยอลูมินาซึ่งเป็นถ้วยที่ทนความร้อนสูงแล้วนำไปวางในเตาเผาอุณหภูมิสูงเพื่อเตรียมการเผาซึ่งก่อนกระบวนการเผาจะต้องอุ่นเตาเผาให้ให้มีอุณหภูมิ 100°C ก่อนจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาด้วยอัตรา 20°C ต่อนาทีจนอุณหภูมิของเตาเผาสูงถึง 950°C แล้วคงที่อุณหภูมิดังกล่าวไว้ 18 ชั่วโมงแล้วค่อยๆลดอุณหภูมิลงอีกครั้งหนึ่งด้วยอัตรา 20°C ต่อนาที จนอุณหภูมิของเตาเผาลดลงมาถึงอุณหภูมิ 100°C แล้วนำสารที่ได้จากการเผออกจากเตาซึ่งมีภาพแสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 1 ดังนี้



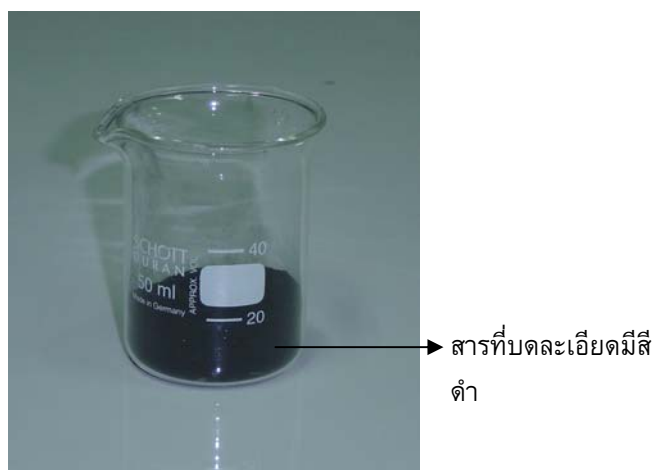
ภาพประกอบ 27 แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 1

สารที่ได้จากกระบวนการเผาครั้งที่ 1 มีรูปรูณสีดําเกาะตัวกันแน่นดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 แสดงลักษณะของสารที่ได้จากการเผาครั้งที่ 1

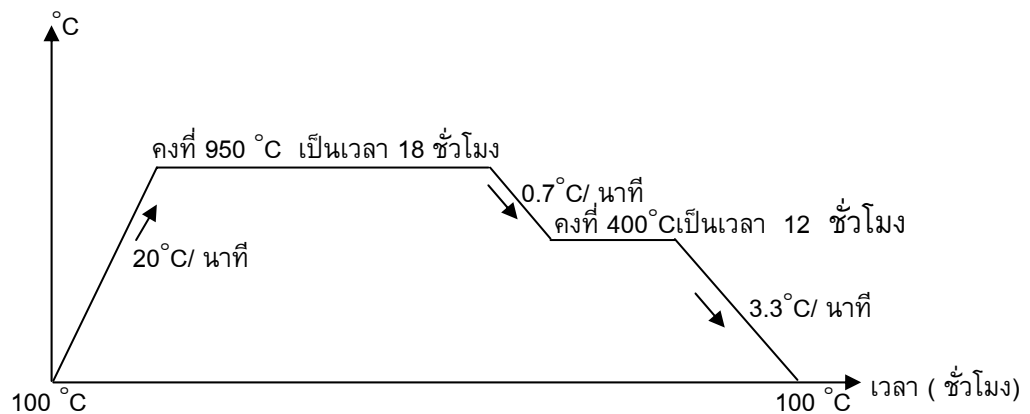
จากนั้นนำสารที่ได้จากการเผาครั้งที่ 1 ไปบดด้วยครกอลูมินาจะได้สารเป็นผงละเอียดสีดำ ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 แสดงสารที่บดเป็นผงละเอียด

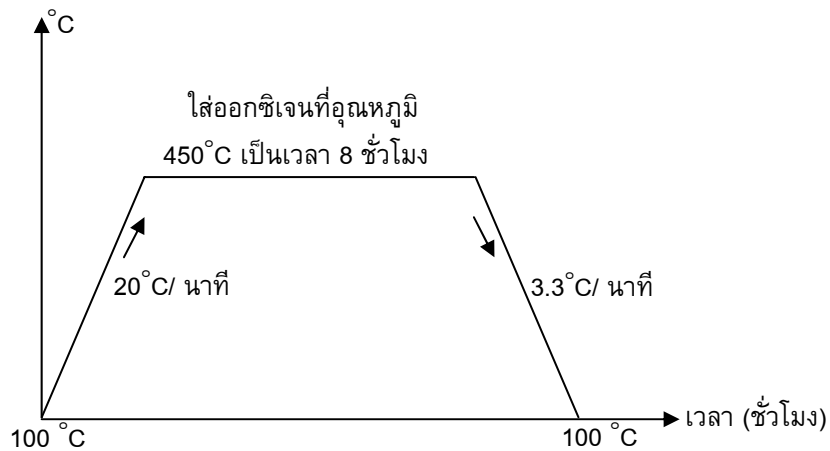
แล้วนำสารที่เป็นผงละเอียดดังภาพประกอบ 29 นำไปแบ่งออกเป็น 4 ส่วน เพื่อแบ่งเป็นสารออกเป็น 4 ตัวอย่าง โดยแต่ละสารตัวอย่างมีน้ำหนัก 30 g แล้วนำสารตัวอย่างทุกสารตัวอย่างไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกด้วยแรงอัด 250 kN เป็นเวลาครึ่งชั่วโมงทุกๆสารตัวอย่าง จะได้สารที่มีลักษณะที่เป็นแผ่นกลมสีดำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm และมีความหนา 5 mm แล้วนำสารตัวอย่างที่ได้จากการอัดแล้วไปทำการเผาครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ซึ่งแต่ละสารตัวอย่างมีกระบวนการเผาที่แตกต่างกันดังนี้

การเผาครั้งที่ 2



ภาพประกอบ 30 แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 2

การเผาครั้งที่ 3



ภาพประกอบ 31 แสดงกระบวนการเผาครั้งที่ 3

สารตัวอย่าง 1

การเผาครั้งที่ 2 ของสารตัวอย่างที่ 1 เริ่มต้นอุณหภูมิของการเผาที่อุณหภูมิ 100 °C จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาด้วยอัตรา 20 °C ต่อนาทีจนอุณหภูมิถึง 950 °C แล้วคงที่อุณหภูมินี้ไว้ 18 ชั่วโมง เมื่อครบ 18 ชั่วโมงแล้วจะเริ่มลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 0.7 °C ต่อนาทีจนอุณหภูมิเตาเผาลดลงถึงอุณหภูมิ 400 °C แล้วคงที่อุณหภูมินี้ไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 3.3 °C ต่อนาทีจนอุณหภูมิลดลงถึง 100 °C ก็เสร็จสิ้นในกระบวนการเตรียมสารตัวอย่าง 1

สารตัวอย่าง 2

การเผาครั้งที่ 2 ของสารตัวอย่างที่ 2 มีกระบวนการเผาครั้งที่ 2 เหมือนกับสารตัวอย่างที่ 1 แต่จะแตกต่างกันตรงเมื่ออุณหภูมิของเตาเผาลดลงถึง 400°C แล้วจะเปิดฝาเตาไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อเป็นการเติมออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศให้กับสารตัวอย่างจากนั้นจึงปิดฝาเตาแล้วลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 3.3°C ต่อนาทีจนอุณหภูมิเตาลดลงมาถึง 100°C ก็จะเสร็จสิ้นในกระบวนการเตรียมสารตัวอย่าง 2

สารตัวอย่าง 3

การเผาครั้งที่ 2 ของสารตัวอย่างที่ 3 มีกระบวนการเผาครั้งที่ 2 เหมือนกับสารตัวอย่างที่ 1 คือปิดฝาเตาเผาตลอดแต่จะเพิ่มการเผาครั้งที่ 3 เข้าไปซึ่งในการเผาครั้งที่ 3 นั้นจะเริ่มต้นการเผาที่อุณหภูมิ 100°C แล้วเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาด้วยอัตรา 20°C ต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 450°C เปิดฝาเตาไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อเป็นการเพิ่มออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศให้แก่สารตัวอย่างเมื่อครบ 8 ชั่วโมงแล้วปิดฝาเตาจึงลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 3.3°C ต่อนาที จนอุณหภูมิลดลงมาถึง 100°C ก็เสร็จสิ้นในกระบวนการเตรียมสารตัวอย่าง 3

สารตัวอย่าง 4

การเผาครั้งที่ 2 ของสารตัวอย่างที่ 4 ซึ่งมีกระบวนการเผาเหมือนกับสารตัวอย่างที่ 1 แต่จะเพิ่มการเผาครั้งที่ 3 เข้าไปโดยการเผาครั้งที่ 3 นั้นจะเริ่มต้นการเผาที่อุณหภูมิ 100°C แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20°C ต่อนาทีจนอุณหภูมิถึง 450°C แล้วเริ่มให้ออกซิเจนจากถังออกซิเจนด้วยอัตรา 1 litre/min ไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้แก่สารตัวอย่างเมื่อครบ 8 ชั่วโมงจึงหยุดให้ออกซิเจนแล้วจึงลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 3.3°C ต่อนาทีจนอุณหภูมิลดลงมาถึง 100°C ก็เสร็จสิ้นในการเตรียมสารตัวอย่าง 4

เมื่อสังเคราะห์สารตัวอย่างทั้ง 4 แล้วเสร็จจะได้สารที่มีความแกร่งมากกว่าสารที่ได้หลังการอัดจากนั้นนำสารตัวอย่างดังกล่าวไปทดสอบพบว่าสารตัวอย่างทุกชิ้นเป็นตัวนำยวดยิ่งจากนั้นนำตัวนำยวดยิ่งดังกล่าวไปทำขั้วการวัดสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2 การหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

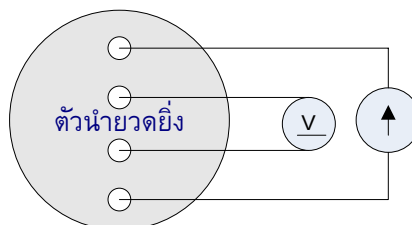
ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งนั้นจะต้องนำตัวนำยวดยิ่งไปทำขั้วการวัดแบบ 4 ขั้วซึ่งมีรายละเอียดวิธีการในการทำขั้วการวัดดังนี้

3.2.1 วิธีการทำขั้วการวัดตัวนำยวดยิ่งแบบ 4 ขั้ว (Four point probe)

มีวัสดุอุปกรณ์ดังนี้

- 1) ตัวนำวยดยั้ง
- 2) สายไฟอบน้ำยา
- 3) กาวตราซ้าง
- 4) กาวซิลิโคน
- 5) มีดคัตเตอร์
- 6) สกรู
- 7) กาวเงิน (Silver plant)

นำตัวนำวยดยั้งที่เตรียมได้ไปเจาะรูที่ผิวของตัวนำวยดยั้งเพื่อทำขั้วการวัดโดยใช้สกรูขนาดเล็กโดยให้ขั้วทั้ง 4 มีความลึก 2-3 mm แต่ละขั้วการวัดควรมีระยะห่าง 0.5 cm และอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันจากนั้นนำสายไฟอบน้ำยามีความยาวประมาณ 1.5 m มาขจัดปลายสายไฟออก 2-3 mm เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าขณะทำการวัดจากนั้นใส่สายไฟดังกล่าวลงไปในขั้วที่เจาะไว้แล้วนำกาวตราซ้างมาติดสายไฟฟ้าให้ติดกับตัวนำวยดยั้งแล้วนำกาวซิลิโคนมาเคลือบสายไฟควรระมัดระวังอย่าให้ไปสัมผัสกับขั้วของการวัดจากนั้นนำ Silver plant หรือกาวเงินมาป้ายที่ขั้วของการวัดเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าระหว่างสายไฟกับตัวนำวยดยั้งแล้วทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงเพื่อรอให้ Silver plant ขั้วการวัดแห้งดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 แสดงการต่อขั้วการวัดแบบ 4 ขั้ว

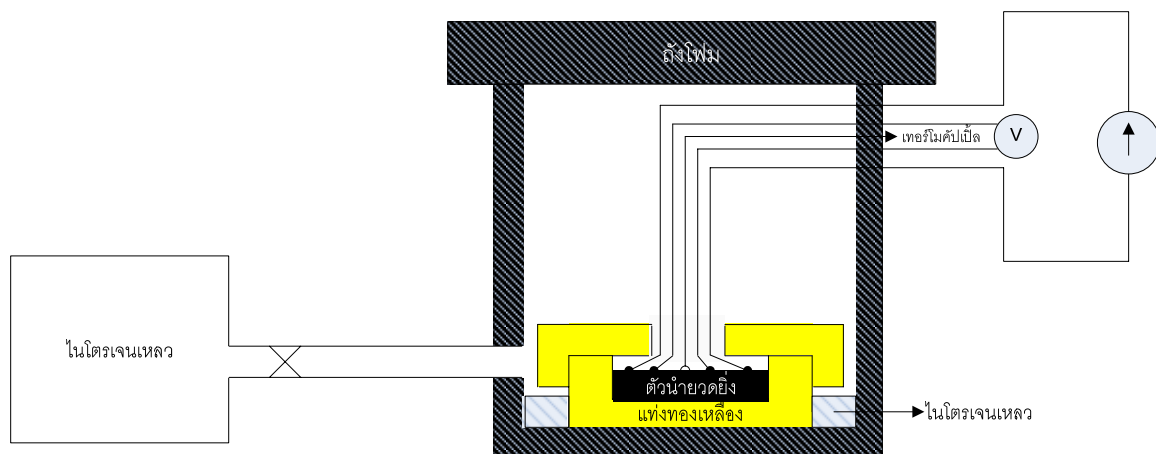
จากนั้นนำตัวนำวยดยั้งที่ทำขั้วแล้วไปทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำวยดยั้งแต่ละตัวซึ่งมีวัสดุอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤตดังนี้

- 1) ตัวนำวยดยั้ง
- 2) ถังโฟม
- 3) แท่งทองเหลือง
- 4) มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล
- 5) ไนโตรเจนเหลว
- 6) เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K และเทอร์โมมิเตอร์ยี่ห้อ Fluke รุ่น 51II

7) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Constant current source)

ซึ่งมีวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

นำตัวนำยวดยิ่งที่ต่อชั่วคราววัดแบบ 4 ขั้ว ไปติดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลให้แน่นกับผิวของตัวนำยวดยิ่งเพื่อวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ผิวของบริเวณที่วัดแล้วนำตัวนำยวดยิ่งไปวางบนแท่งทองเหลืองที่อยู่ในถังโฟม จากนั้นใส่ไนโตรเจนเหลวลงไปเพื่อทำให้เกิดการลดอุณหภูมิลงจนถึง 77 K แล้วเริ่มใส่กระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในสายไฟฟ้าสองเส้นด้านนอกแล้วสังเกตแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่มีค่าต่าง ๆ กันดังภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 แสดงวัสดุอุปกรณ์ในการหาอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

จากนั้นนำแท่งทองเหลืองออกไปเพื่อที่จะเตรียมการวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งมีรายละเอียดในการวัดดังต่อไปนี้

3.3 อิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

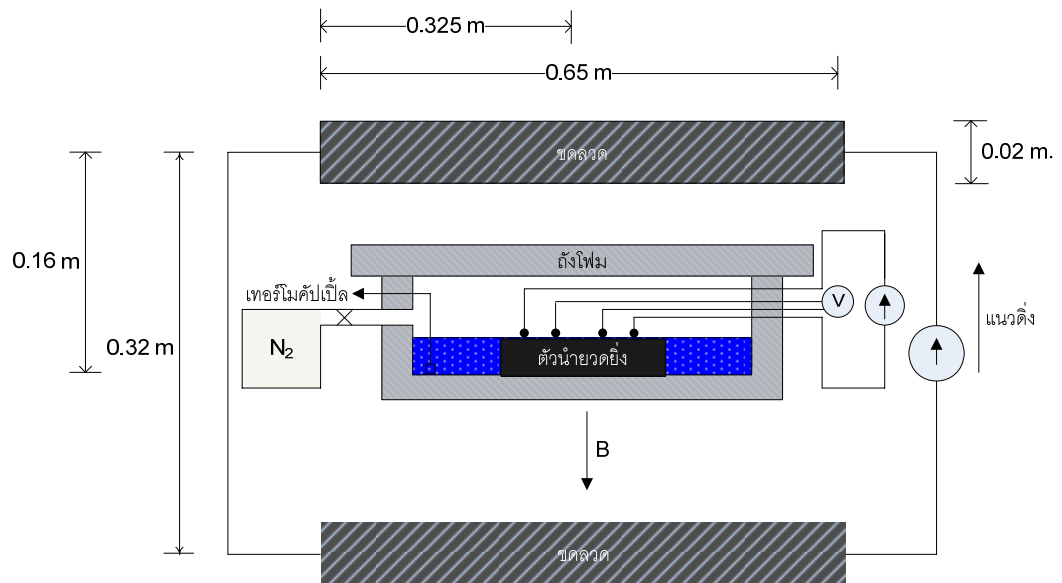
นำตัวนำยวดยิ่งที่วัดอุณหภูมิวิกฤตแล้วไปทดลองเพื่อหาว่าสนามแม่เหล็กส่งผลต่อตัวนำยวดยิ่งซึ่งมีวัสดุอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้

- 1) ตัวนำยวดยิ่ง
- 2) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด
- 3) ขดลวดเฮมโฮลส์
- 4) ไนโตรเจนเหลว
- 5) ถังโฟม

ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

นำตัวนำยวดยิ่งไปปิดชั่วคราวด้วยโฟมเพื่อป้องกันไม่ให้ไนโตรเจนเหลวเข้าไปสัมผัส

กับข้อควรระวังเพราะจะเกิดการลัดวงจรขึ้นได้จากนั้นนำตัวนำยวดยิ่งไปวางไว้ที่จุดกึ่งกลางของถังโฟมและอยู่ที่จุดกึ่งกลางของขดลวดเฮมโฮลท์ซึ่งมีจำนวนรอบของขดลวดจำนวน 72 รอบ และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 m แล้วใส่ไนโตรเจนเหลวลงไปในถังโฟมเพื่อทำให้เกิดภาวะนำยวดยิ่งจากนั้นใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวนำยวดยิ่งแล้วสังเกตแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะที่สนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดเฮมโฮลท์มีค่าที่ต่างกันเมื่ออุณหภูมิของระบบจะคงที่ที่ 77 K ดังภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 แสดงวัสดุอุปกรณ์ของอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

3.4 การวัดสมบัติของตัวนำยวดยิ่ง

นำสารที่ได้จากการเผาที่มีสมบัติเป็นตัวนำยวดยิ่งแล้วไปวัดสมบัติ ของตัวนำยวดยิ่งด้วยเครื่องมือวัดอื่นๆ ดังนี้โดยทำการวัดที่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ คือ

XRD (X-Ray Diffraction) รุ่น D8 ADVANCE ส่วนเครื่องมือต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องมือดังต่อไปนี้

1. SEM (Scanning Electron Microscopy) รุ่น JSM-5410LV
2. EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) รุ่น JSM-5410LV
3. TEM (Transmission Electron Microscopy) รุ่น JEM-200CX

เครื่องมือทั้งสามทำการวัดที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO
2. ทราบถึงโครงสร้างและสมบัติบางประการของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO
3. สร้างชุดอุปกรณ์เพื่อสาธิตการทดลองที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO
4. เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มบาง (Thin Film)
5. เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมตัวนำยวดยิ่งที่มีรอยต่อแบบโจเซฟสัน

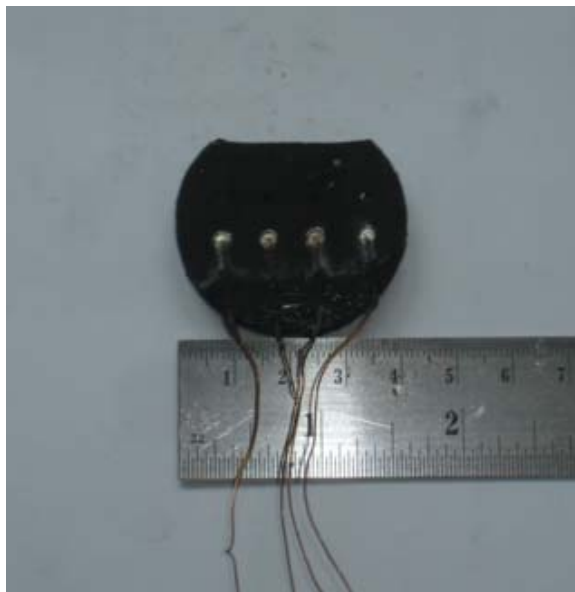
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนในบทที่ 3 ซึ่งได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ได้เสร็จสิ้นแล้ว โดยได้ผลการทดลองตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO จะได้ลักษณะตัวนำยวดยิ่งเป็นแผ่นกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm และมีความหนา 0.5 cm ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จะสามารถทำซ้ำการวัดแบบ 4 ขั้วได้ดังภาพประกอบ 35



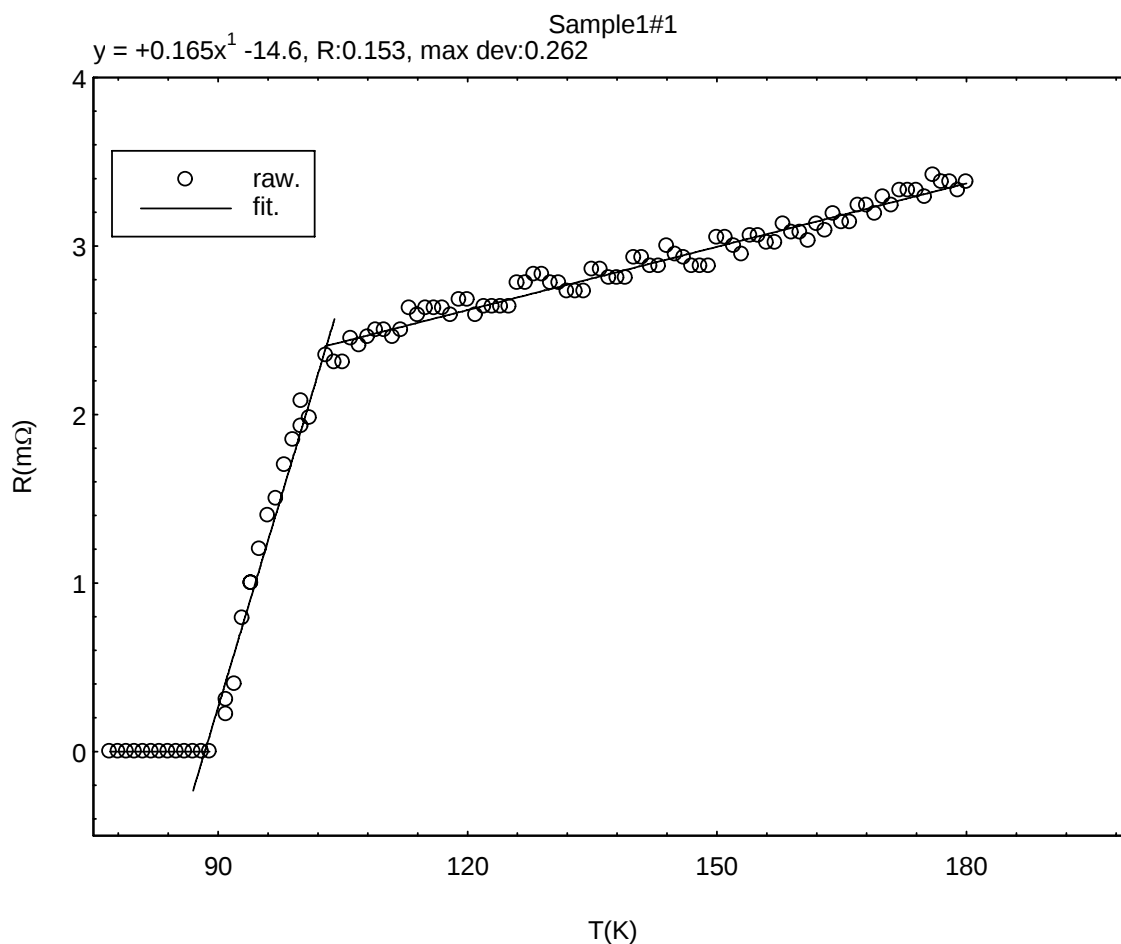
ภาพประกอบ 35 แสดงตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ที่เตรียมได้

จากนั้นนำตัวนำยวดยิ่งที่ได้ทำซ้ำดังภาพประกอบข้างต้นไปทดลองเพื่อวัดหาสมบัติต่างๆ ซึ่งได้ทำการทดลองตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.2 ผลการทดลองของการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดยี่ห้อ Y-Ba-CuO

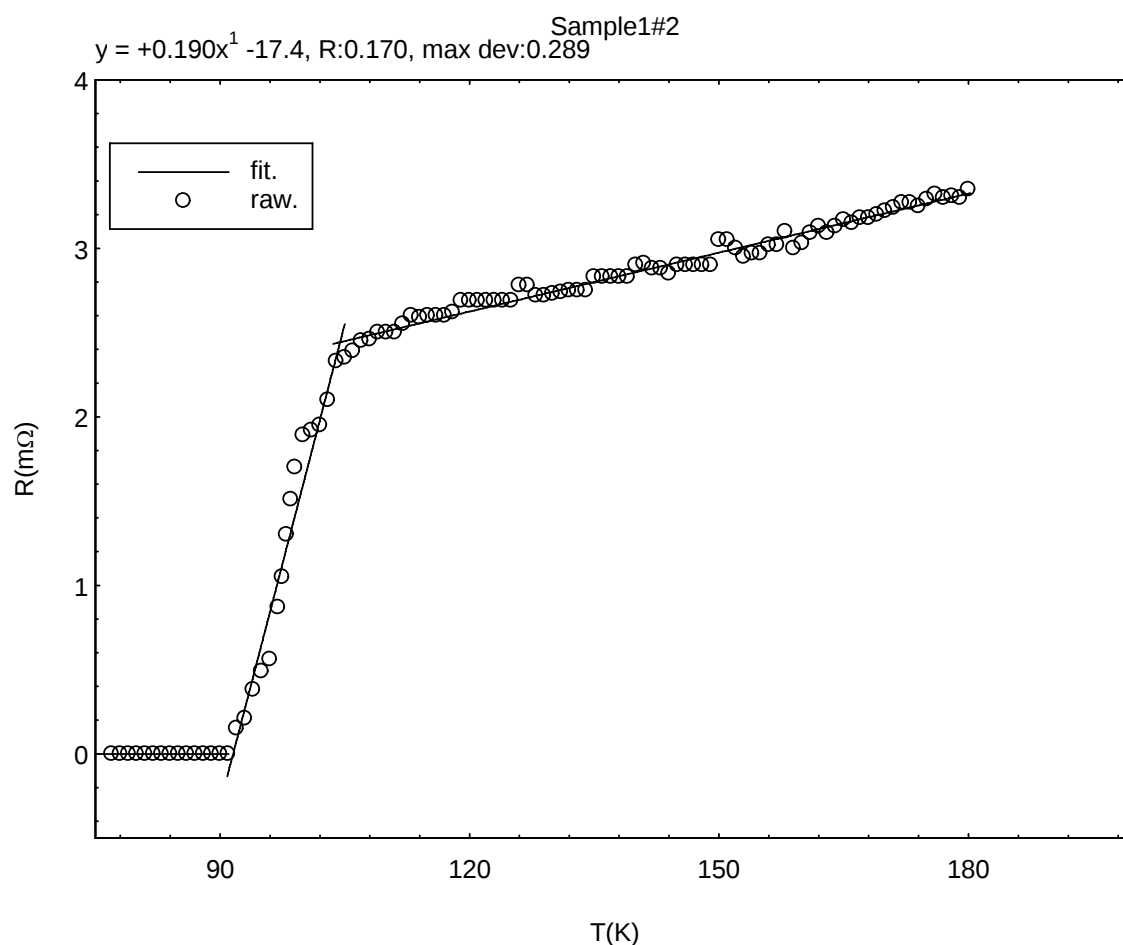
ผลของการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดยี่ห้อแต่ละหมายเลขจะทำการวัด 2 ครั้ง ซึ่งในแต่ละครั้งของการวัดจะให้ผลของอุณหภูมิวิกฤตที่แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดในการวัดอุณหภูมิวิกฤตดังนี้

การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดยี่ห้อหมายเลขที่ 1 ครั้งที่ 1 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.165x - 14.6$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำยิ่งยวดจะสามารถคำนวณค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำยิ่งยวดนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 89 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิดังภาพประกอบ 36



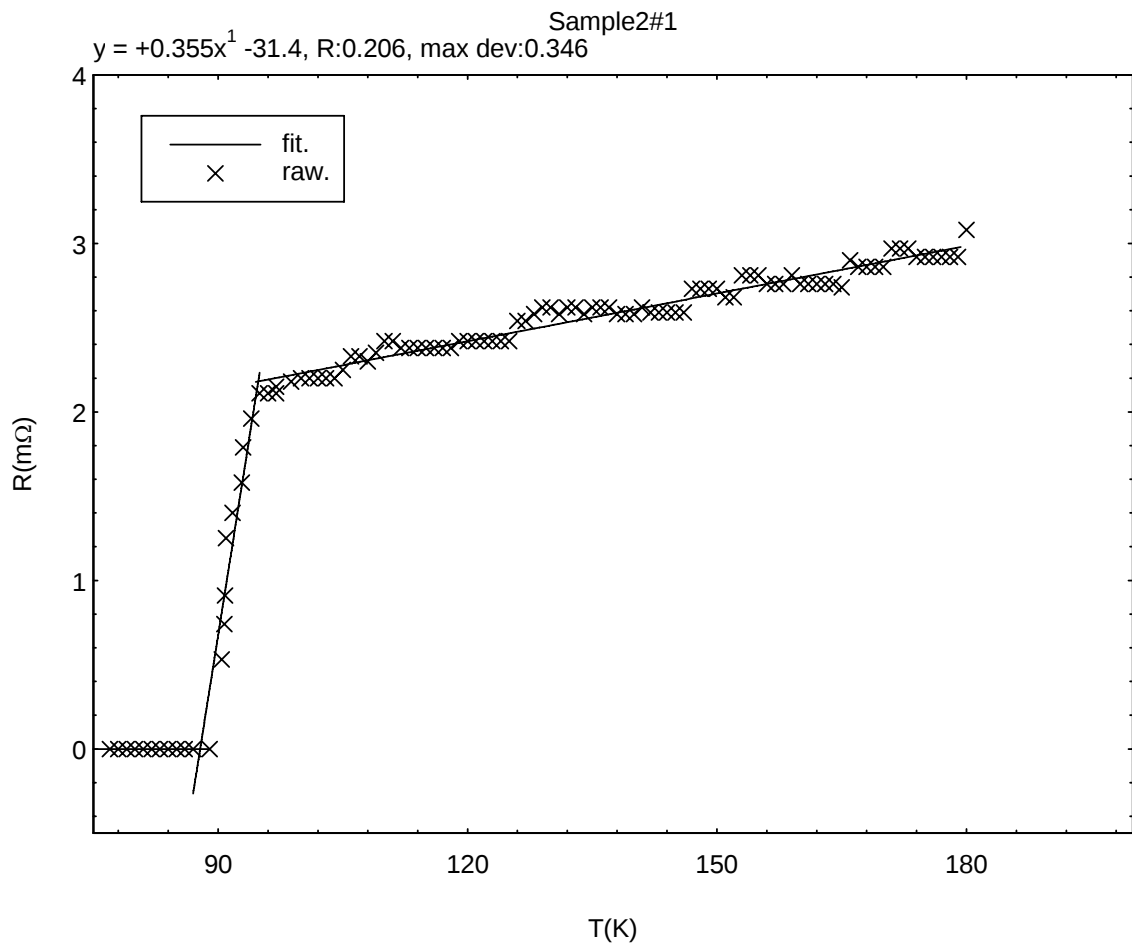
ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดยี่ห้อหมายเลข 1 วัดครั้งที่ 1

การวัดหาอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยิ่งยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 ครั้งที่ 2 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.190x - 17.4$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำยิ่งยวดจะสามารถคำนวณหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำยิ่งยวดนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 91 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิดังภาพประกอบ 37



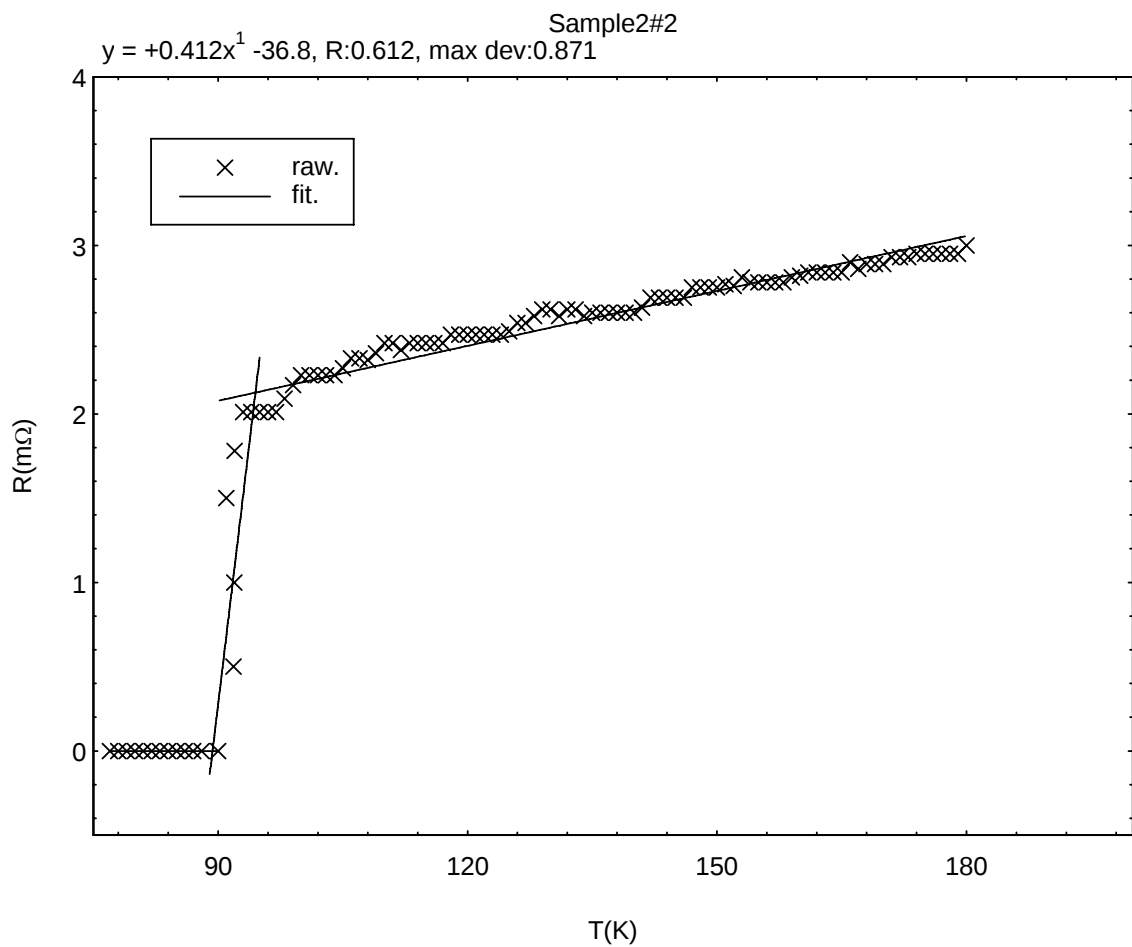
ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดหมายเลข 1 วัดครั้งที่ 2

การวัดหาอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยิ่งยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 ครั้งที่ 1 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.355x - 31.4$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำยิ่งยวดจะสามารถคำนวณหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำยิ่งยวดนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 89 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิดังภาพประกอบ 38



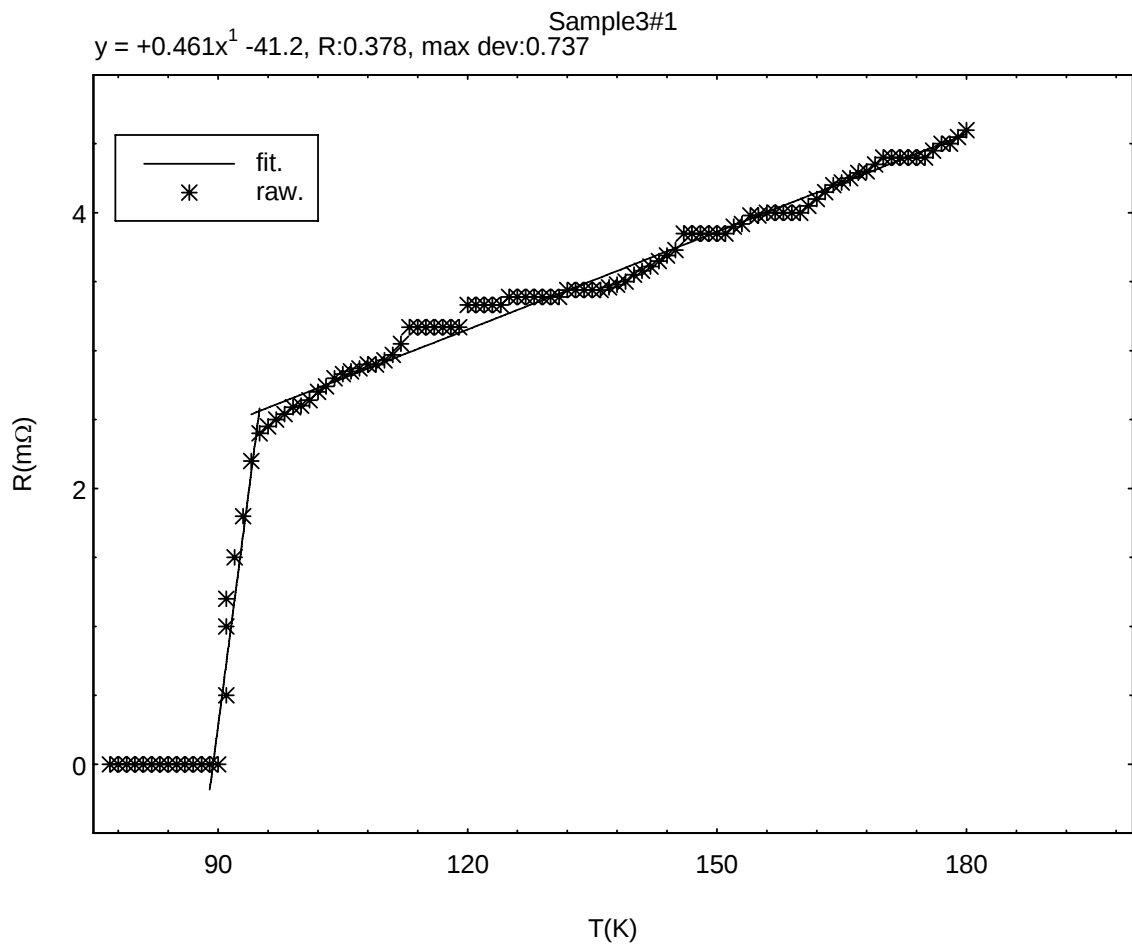
ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดยิ่งยวด หมายเลข 2 วัดครั้งที่ 1

การวัดหาอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยิ่งยวดยิ่งยวดหมายเลขที่ 2 ครั้งที่ 2 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.412x - 36.8$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำยิ่งยวดจะสามารถคำนวณหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำยิ่งยวดนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 90 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิตั้งภาพประกอบ 39



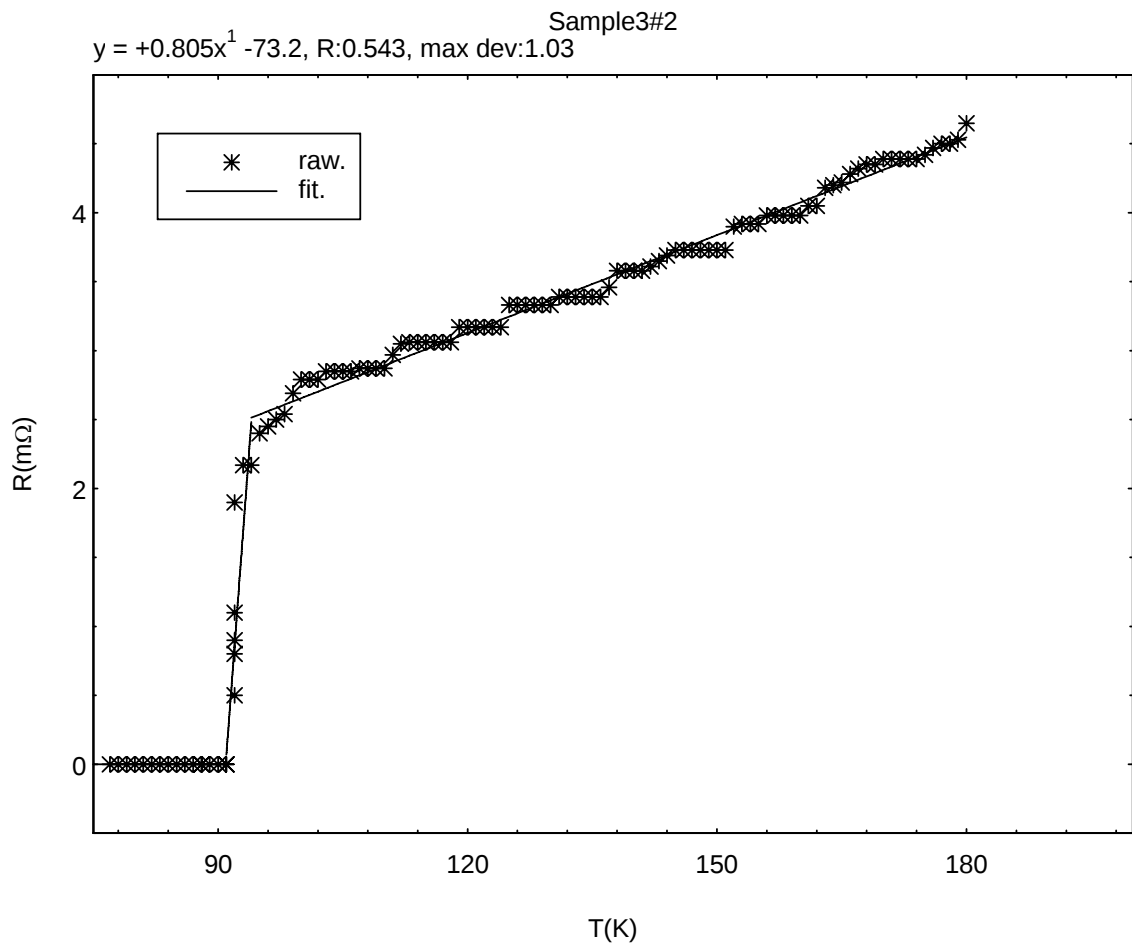
ภาพประกอบ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำวดยิ่ง
หมายเลข 2 วัดครั้งที่ 2

การวัดหาอุณหภูมิวิกฤตตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ครั้งที่ 1 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.461x - 41.2$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำวดยิ่งจะสามารถคำนวณหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำวดยิ่งนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 90 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิตั้งภาพประกอบ 40



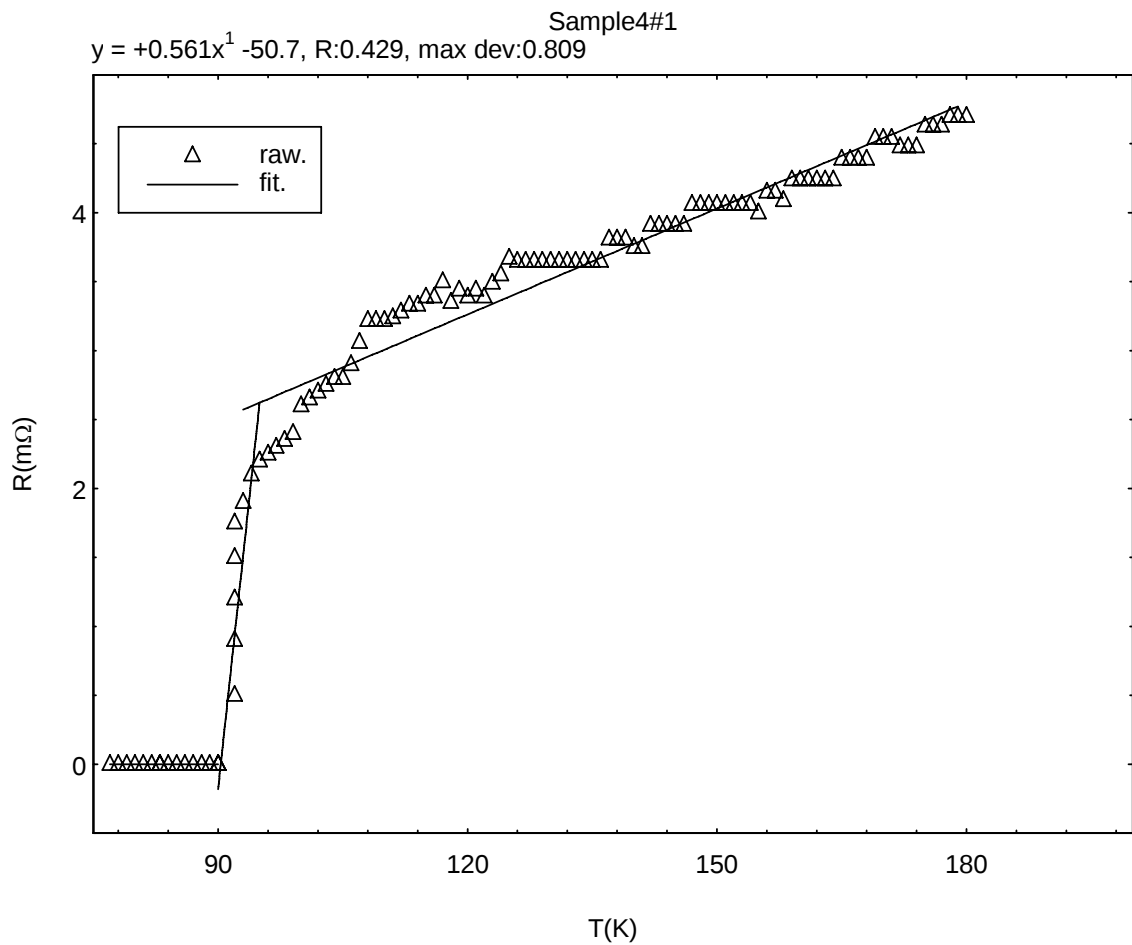
ภาพประกอบ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดยิ่ง
หมายเลข 3 วัดครั้งที่ 1

การวัดหาอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยิ่งยวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ครั้งที่ 2 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.805x - 73.2$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำยิ่งยวดจะสามารถคำนวณหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำยิ่งยวดนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 91 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิตั้งภาพประกอบ 41



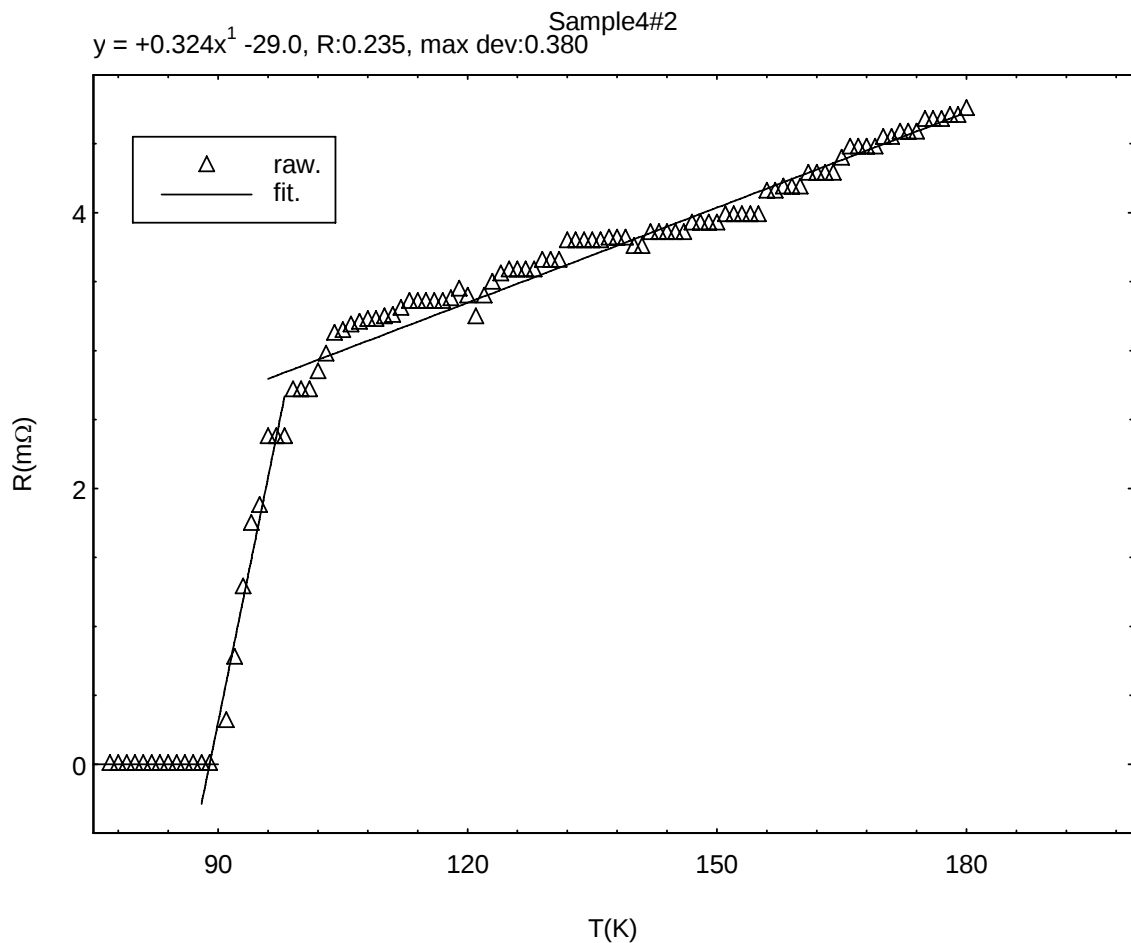
ภาพประกอบ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำวดยิ่ง
หมายเลข 3 วัดครั้งที่ 2

การวัดหาอุณหภูมิวิกฤตตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 4 ครั้งที่ 1 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.561x - 50.7$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำวดยิ่งจะสามารถคำนวณหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำวดยิ่งนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 91 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิตั้งภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดยิ่ง
หมายเลข 4 วัดครั้งที่ 1

การวัดหาอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยิ่งยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 ครั้งที่ 2 ผลปรากฏว่าจากสมการ $y = 0.324x - 29.0$ ซึ่งเป็นสมการของการเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติไปเป็นสภาพนำยิ่งยวดจะสามารถคำนวณหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้จากสมการเมื่อ $y = 0$ ตัวนำยิ่งยวดนี้มีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 91 K ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิตั้งภาพประกอบ 43



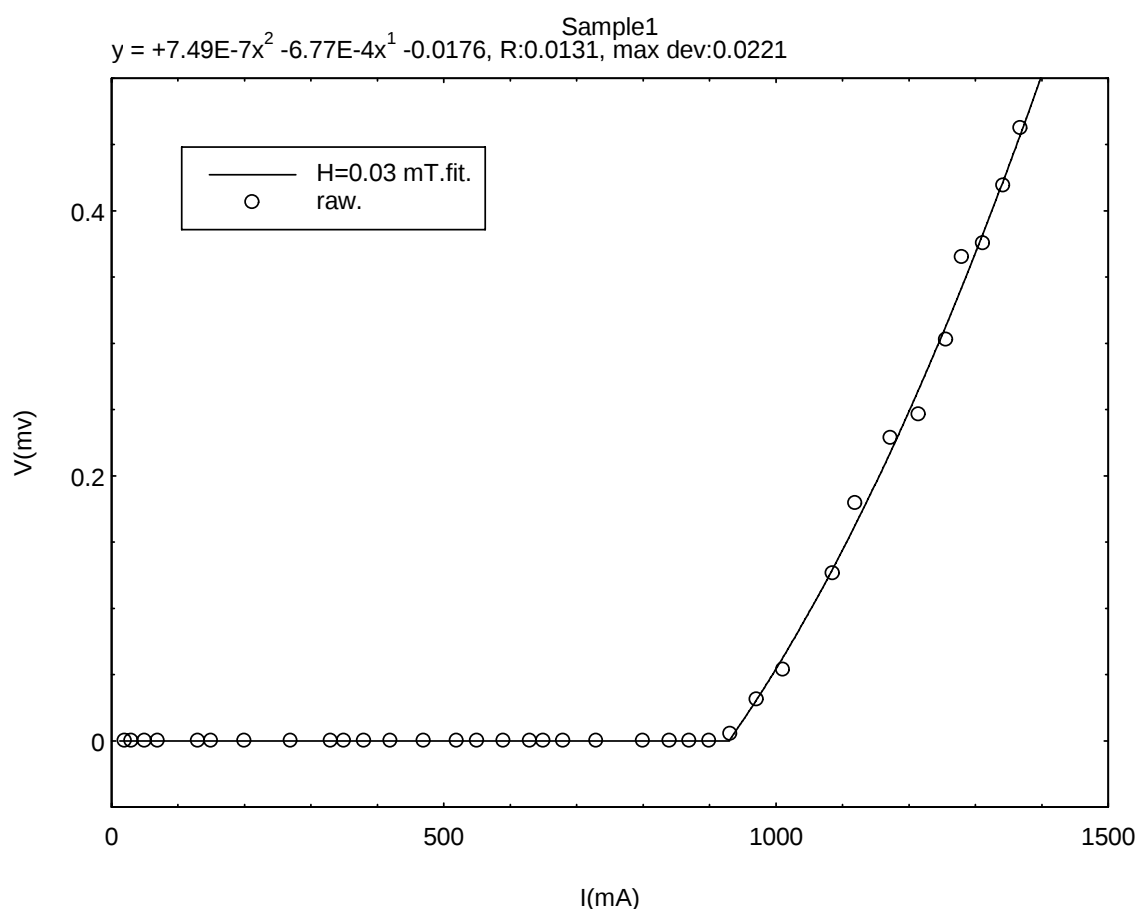
ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดยิ่ง
หมายเลข 4 วัดครั้งที่ 2

4.3 ผลของอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y-Ba-CuO

เมื่อตัวนำยิ่งยวดอยู่ในภาชนะนำยิ่งยวดซึ่งสามารถทำลายภาวะดังกล่าวได้อย่างหนึ่งคือ กระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ระบบที่ใช้ในการทดลองจะต้องกำหนดให้อุณหภูมิคงที่มีค่าเท่ากับ อุณหภูมิไนโตรเจนเหลวจากนั้นจะให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิดังกล่าวแล้วให้ สนามแม่เหล็กที่มีค่าสม่ำเสมอที่มีค่าต่างๆ ที่ได้จากขดลวดเฮมโฮลส์เข้าไปทำลายสภาพ นำยวดยิ่งยวดสนามแม่เหล็กที่ได้ให้ทิศทางลงโดยแสดงให้เห็นได้จากเข็มทิศและค่าสนามแม่เหล็กที่มี อยู่เดิมคือค่าสนามแม่เหล็กโลกซึ่งมีค่า 0.03 mT ซึ่งต้องบวกเพิ่มเข้าไปในทุกค่าของการวัดของ สนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดเฮมโฮลส์สามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดเฮมโฮลส์ด้วย Tesla Meter ซึ่งตัวนำยิ่งยวดแต่ละตัวอย่างมีกระบวนการเตรียมสารที่แตกต่างซึ่งจะมีค่าของ สนามแม่เหล็กที่ทำลายภาชนะนำยิ่งยวดที่แตกต่างกันด้วยโดยสามารถแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

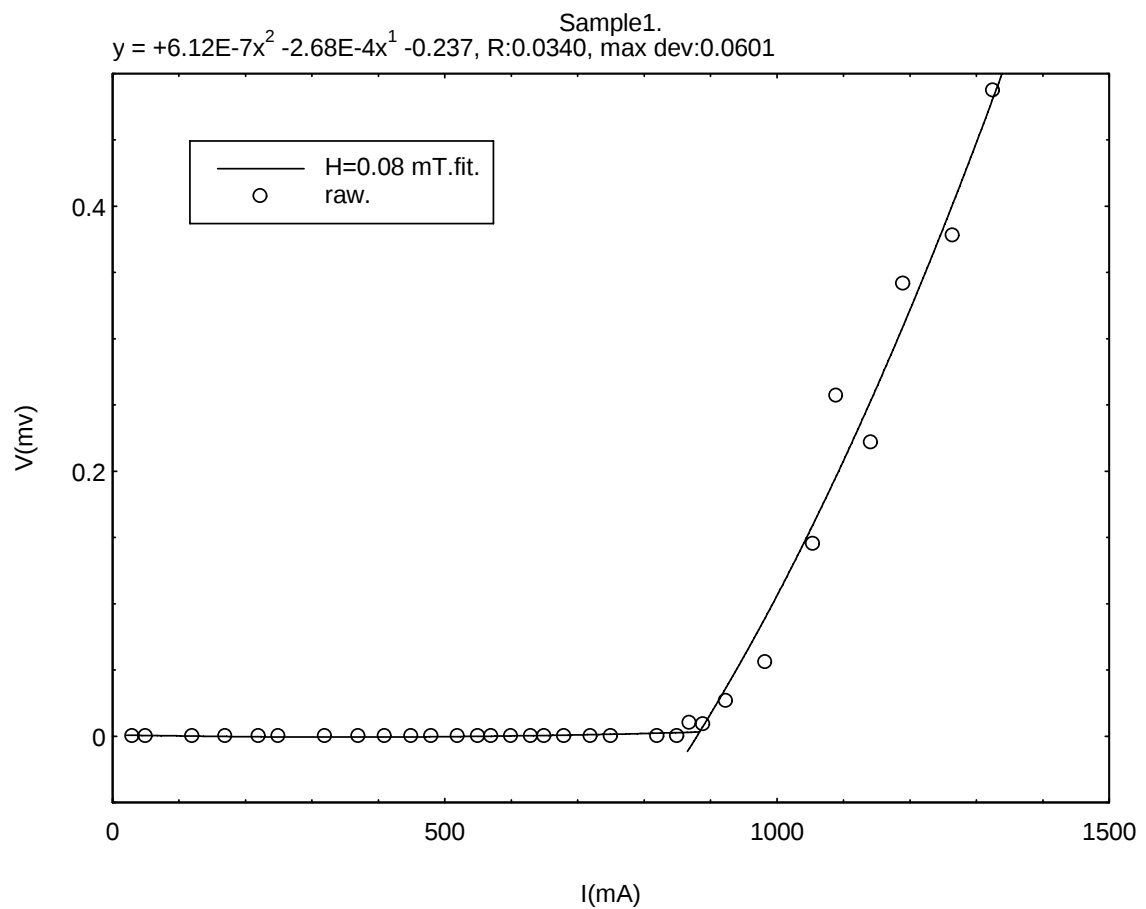
ตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1

การทดลองวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 โดยทดลองวัดค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าบนสารตัวอย่างและนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า จากการทดลองพบว่ากรณีที่สนามแม่เหล็กจากขดลวดเฮมโฮล์ทซ์มีค่าเป็น 0.03 mT นำจุดของผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาสมการแทนกลุ่มของจุด โดยใช้วิธี least square โดยให้ y แทนแรงดันไฟฟ้า x แทนกระแสไฟฟ้า จะได้สมการเป็น $y = 7.49E-7x^2 - 6.77E-4x - 0.0176$ สามารถคำนวณหาค่าวัดค่ากระแสวิกฤตได้โดยกำหนดให้เมื่อ $y = 0$ จะได้ค่าเป็น 950 mA ดังภาพประกอบที่ 44



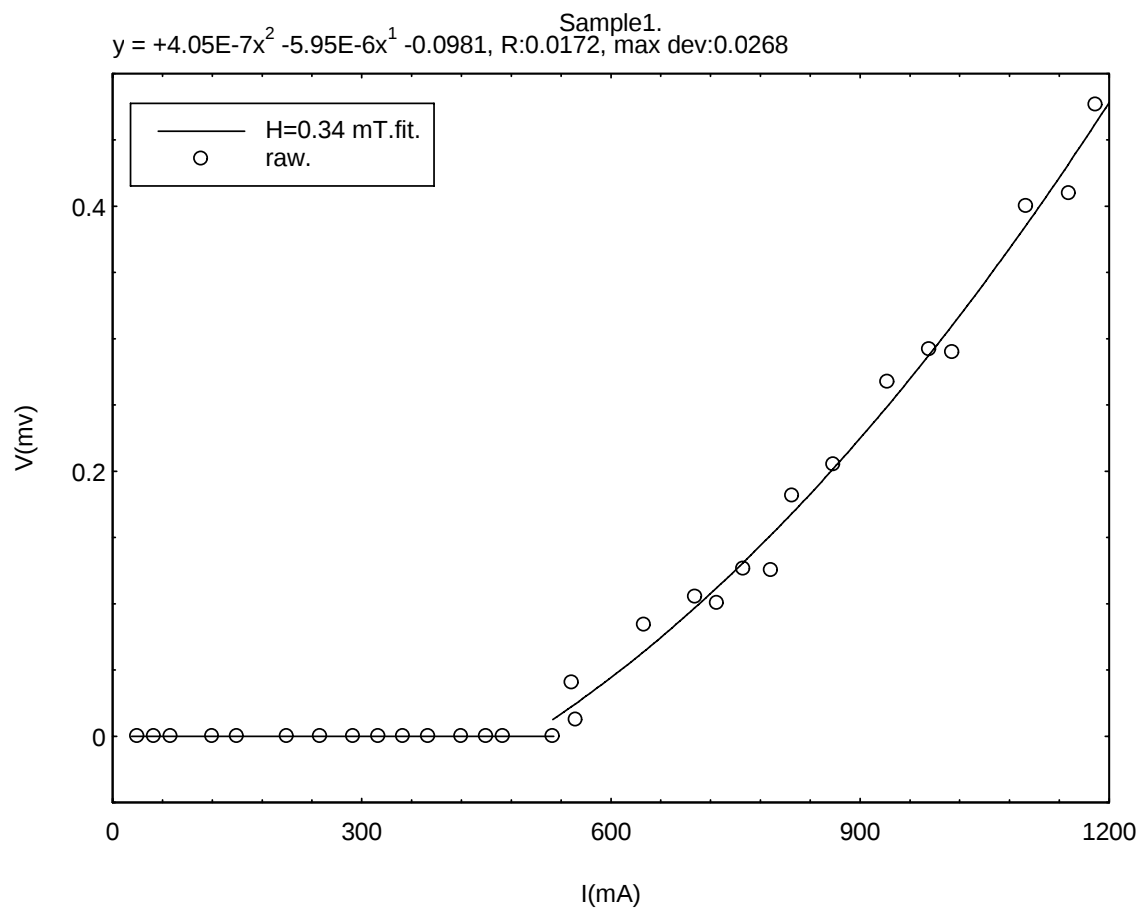
ภาพประกอบ 44 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 950 mA

จากนั้นเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น 0.08 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 6.12E-7x^2 - 2.68E-4x - 0.237$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 890 mA ดังภาพประกอบ 45



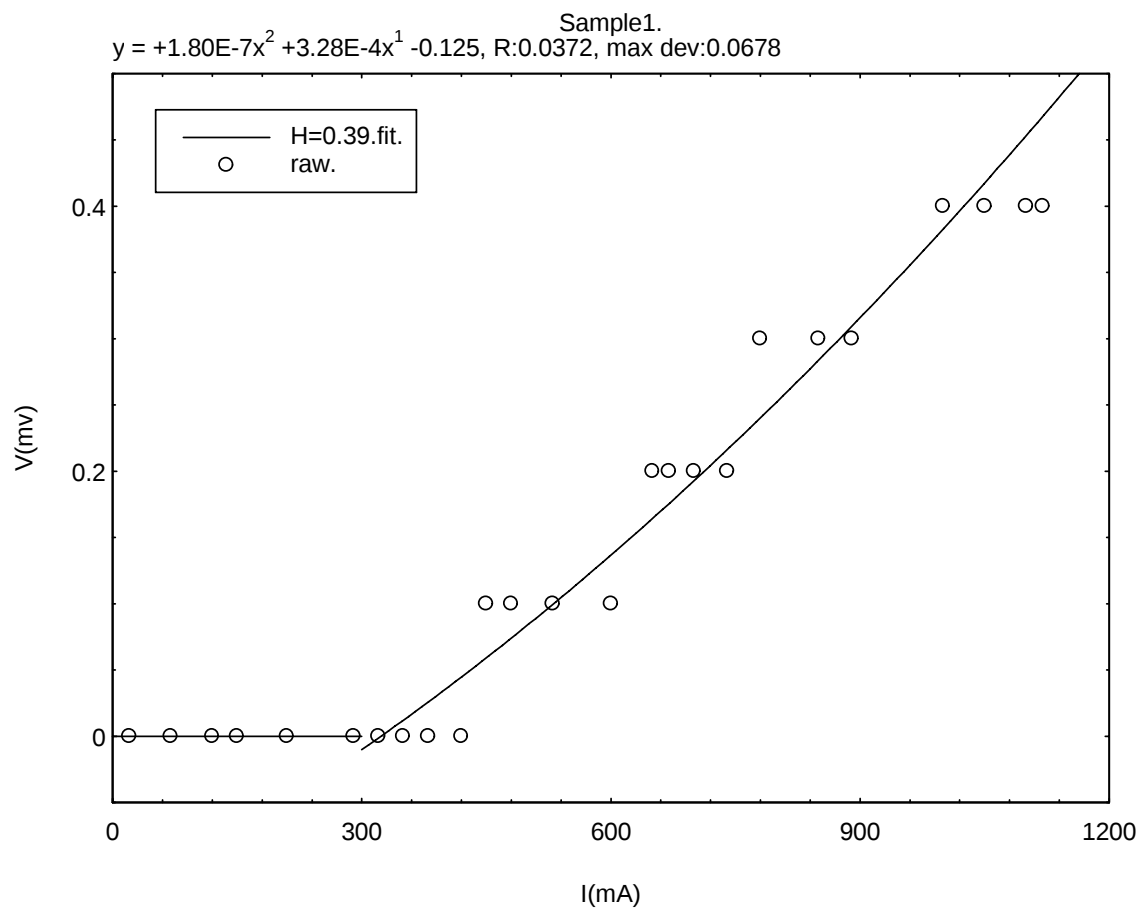
ภาพประกอบ 45 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.08 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 890 mA

เพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กให้มีค่าเป็น 0.34 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 4.05E-7x^2 - 5.95E-6x - 0.0981$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 550 mA ดังภาพประกอบ 46



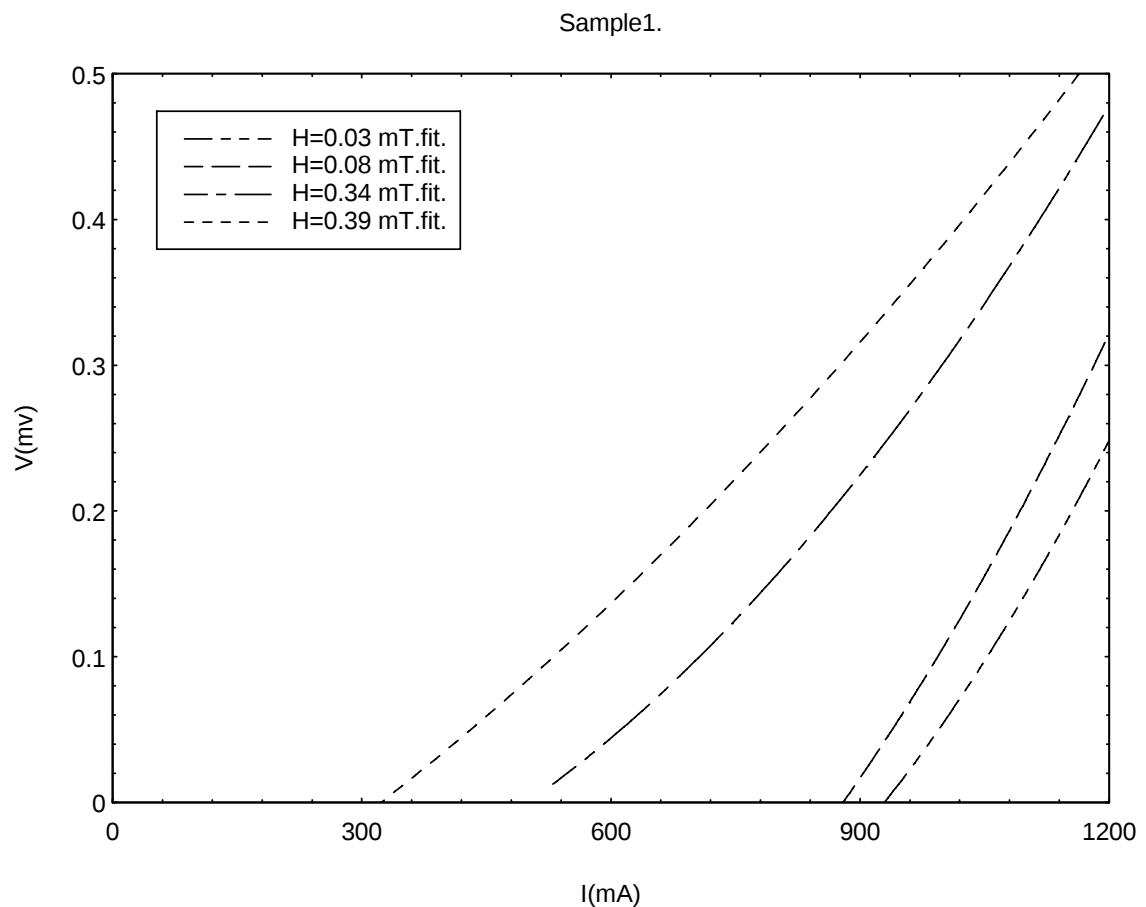
ภาพประกอบ 46 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.34 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 550 mA

เพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กให้มีค่าเป็น 0.39 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 1.80E-7x^2 - 3.28E-4x - 0.125$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 450 mA ดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.39 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 450 mA

จากผลการทดลองของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 ที่ผ่านมาพบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสวิกฤตที่ได้มีค่าลดลงดังภาพประกอบ 48

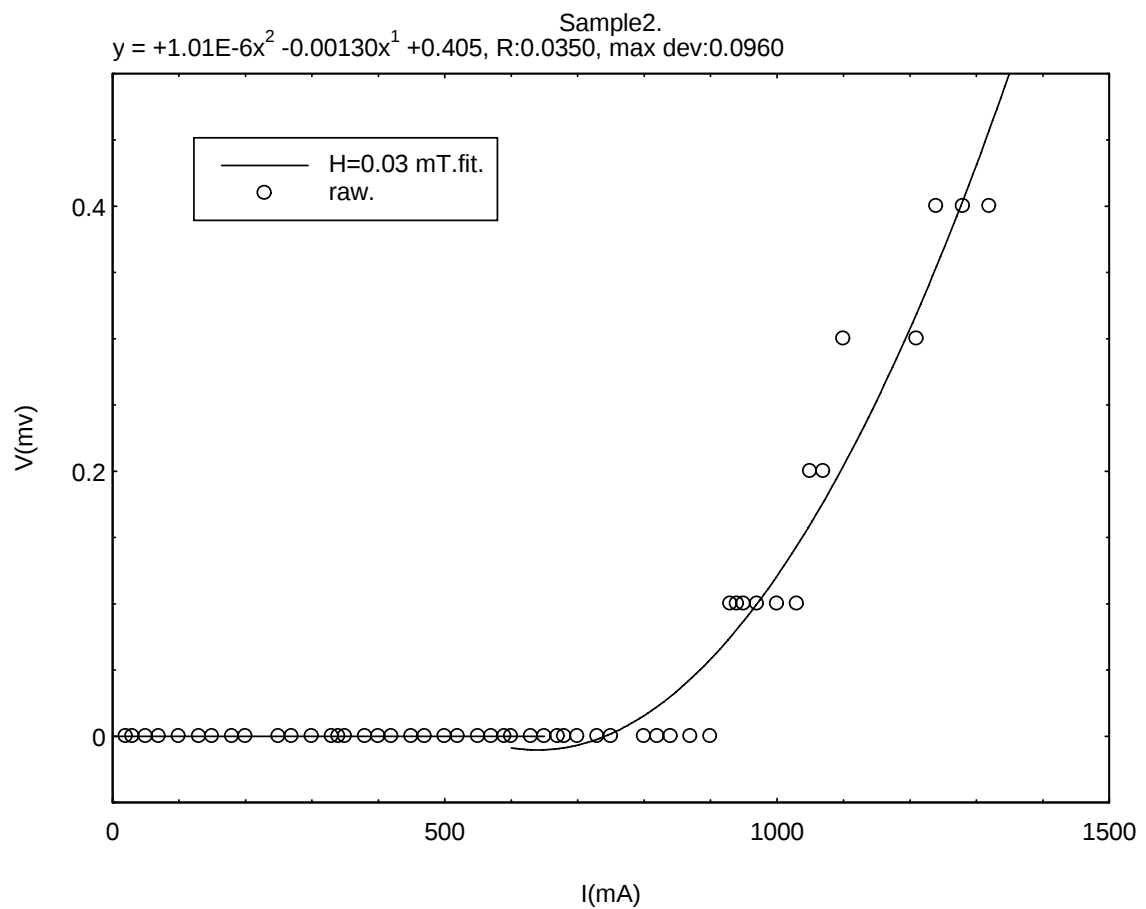


ภาพประกอบ 48 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งหมายเลข 1

จากภาพประกอบ 48 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่ 0.39 mT เป็นกราฟของสนามแม่เหล็กในสภาพปกติของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 1 ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่าสนามแม่เหล็กที่ 0.34 mT เป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 1

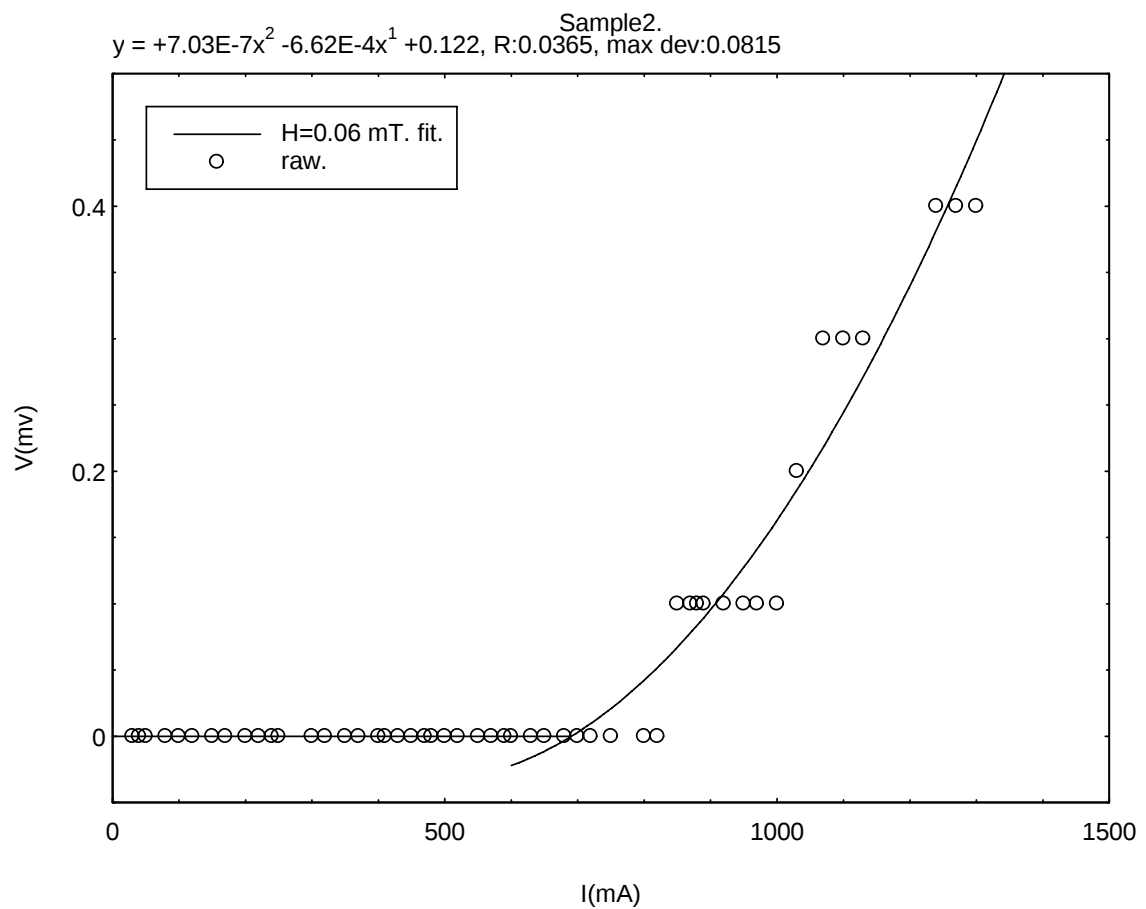
ตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 2

การทดลองวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 2 ใช้วิธีการวัดเดียวกับตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 1 จากการทดลองพบว่ากรณีที่สนามแม่เหล็กจากขดลวดเฮมโฮล์ทมีค่าเป็น 0.03 mT นำจุดของผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาสมการแทนกลุ่มของจุด โดยใช้วิธี least square โดยให้ y แทนแรงดันไฟฟ้า x แทนกระแสไฟฟ้าจะได้สมการเป็น $y = 1.01E - 6x^2 - 0.00130x + 0.405$ สามารถคำนวณหาค่าวัดค่ากระแสวิกฤตได้โดยกำหนดให้เมื่อ $y = 0$ จะได้ค่าเป็น 930 mA ดังภาพประกอบที่ 49



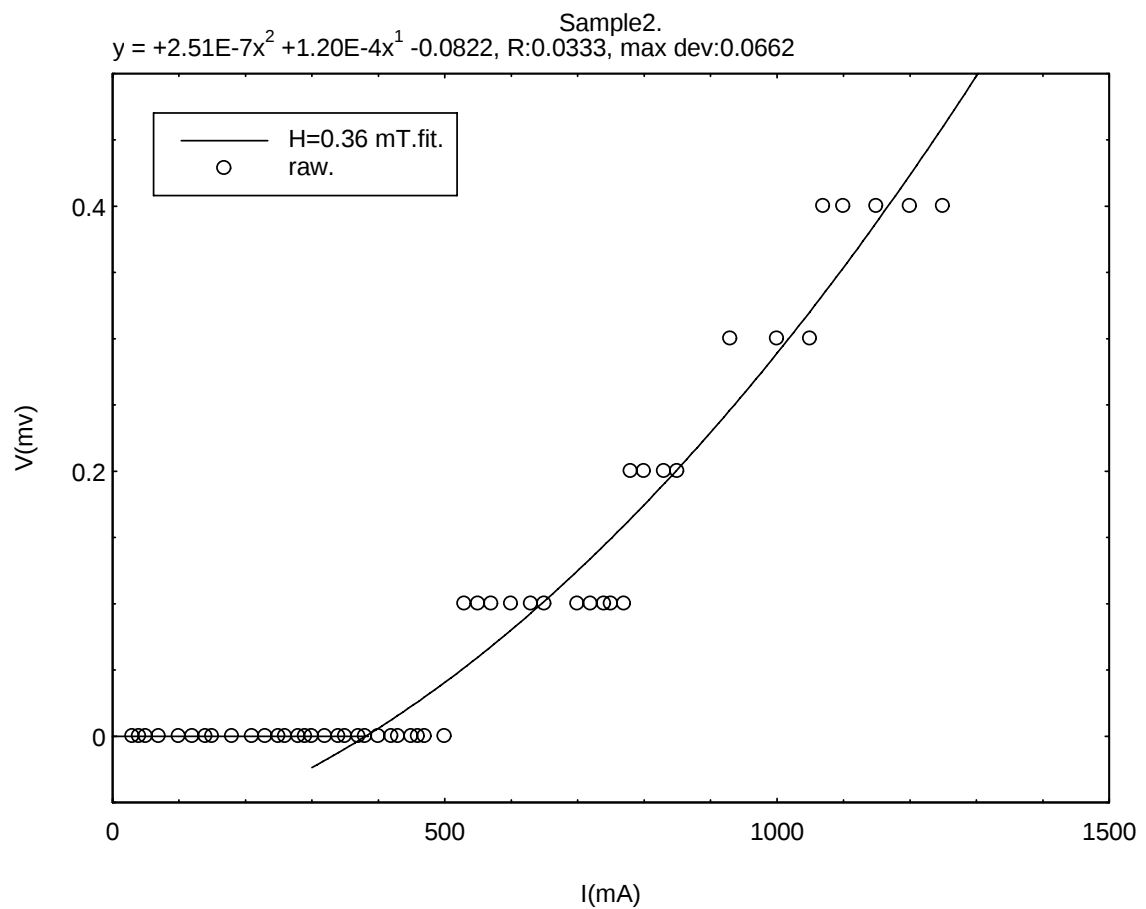
ภาพประกอบ 49 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 930 mA

เพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กให้มีค่าเป็น 0.06 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 7.03E-7x^2 - 6.62E-4x - 0.122$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 850 mA ดังภาพประกอบ 50



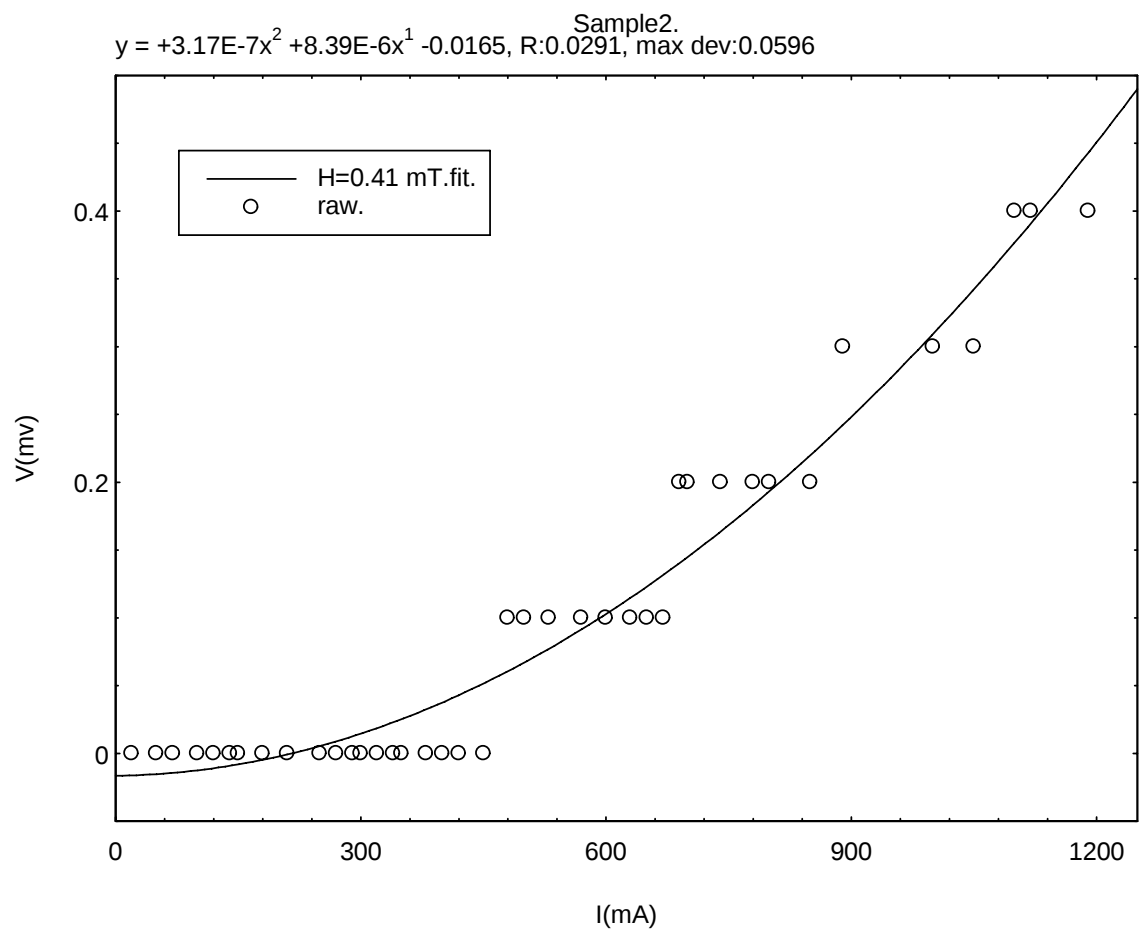
ภาพประกอบ 50 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.06 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 850 mA

เพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กให้มีค่าเป็น 0.36 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 2.51E-7x^2 - 1.2E-4x - 0.0822$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 550 mA ดังภาพประกอบ 51



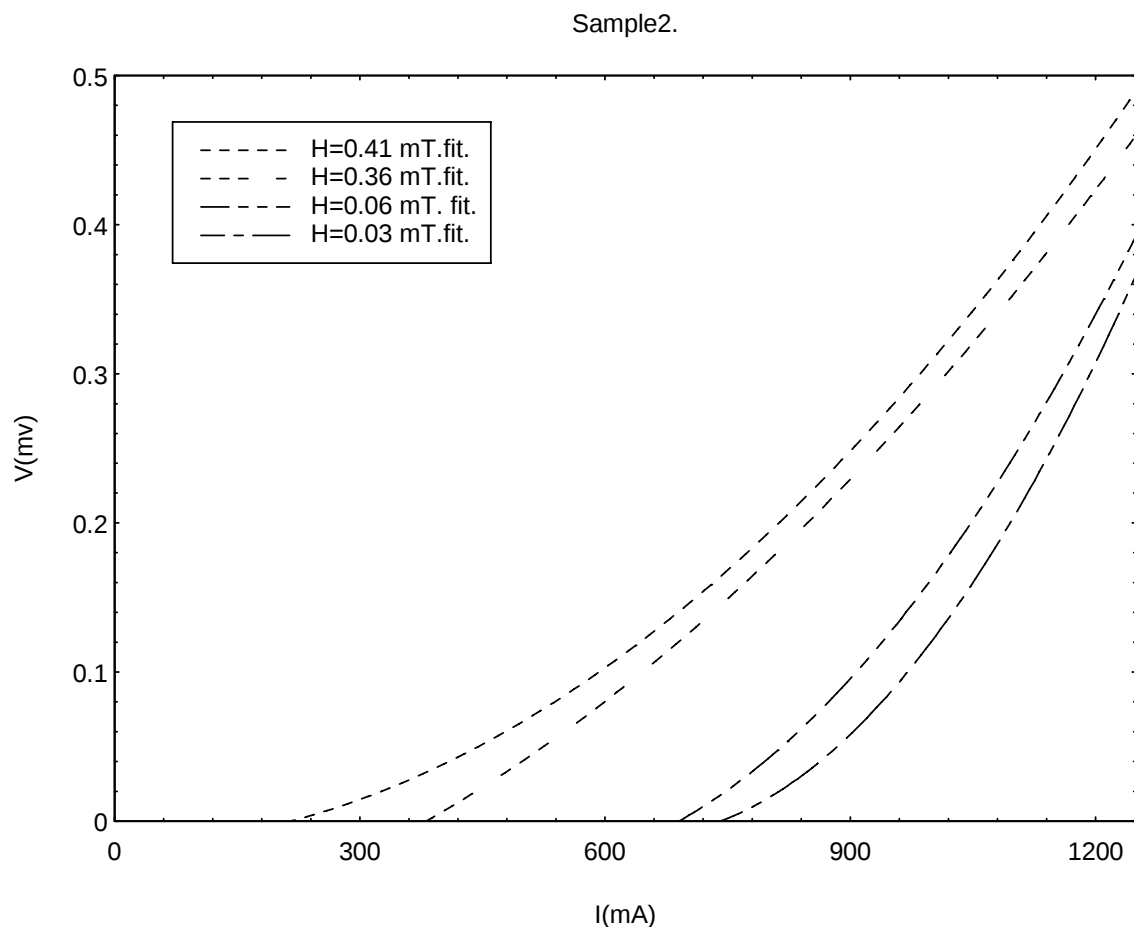
ภาพประกอบ 51 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.36 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 550 mA

เพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กให้มีค่าเป็น 0.41 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 3.17E-7x^2 - 8.39E-6x - 0.0165$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 450 mA ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 52 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.41 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 450 mA

จากผลการทดลองของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 พบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสวิกฤตที่ได้มีค่าลดลงดังภาพประกอบ 53

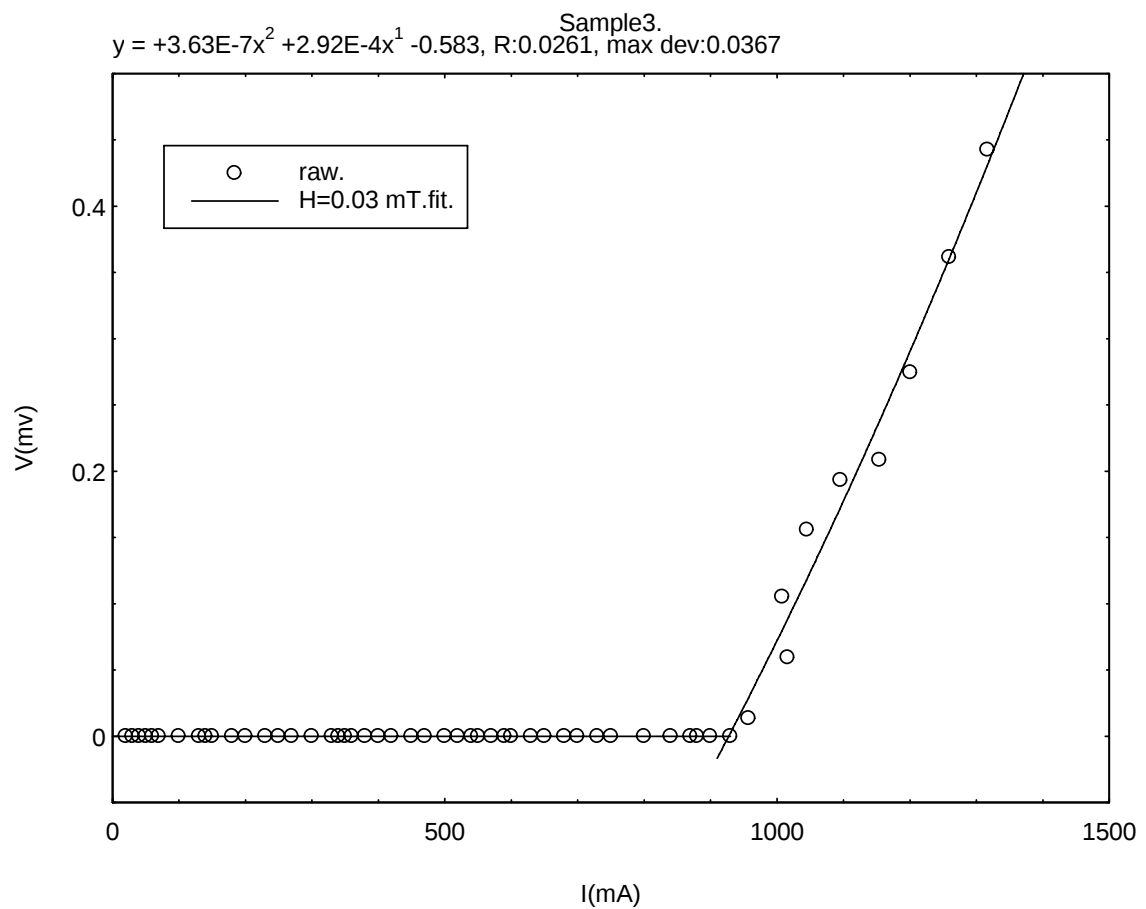


ภาพประกอบ 53 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งตัวหมายเลขที่ 2

จากภาพประกอบ 53 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่ 0.41 mT เป็นกราฟของสนามแม่เหล็กในสภาพปกติของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 2 ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่าสนามแม่เหล็กที่ 0.36 mT เป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 2

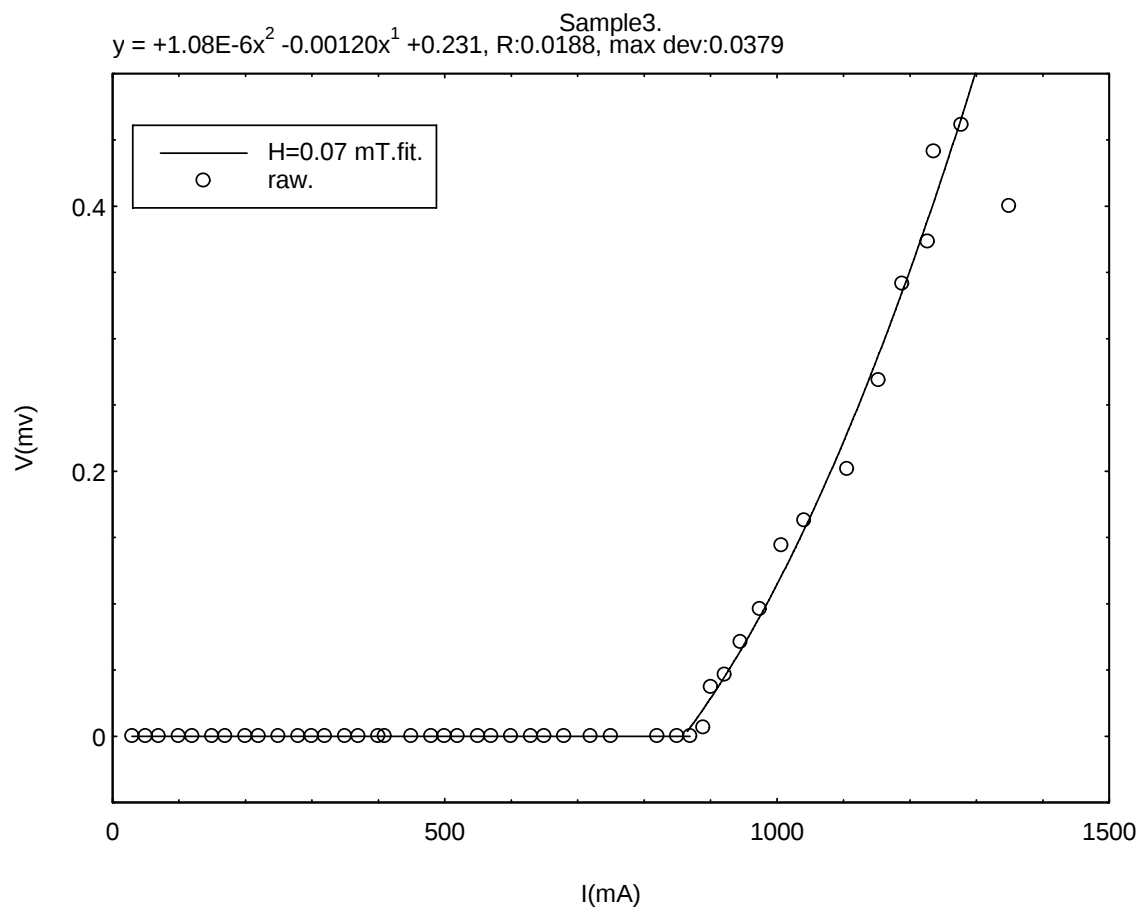
ตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3

การทดลองวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ใช้วิธีการวัดเดียวกับตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 1 จากการทดลองพบว่ากรณีที่สนามแม่เหล็กจากขดลวดเฮมโฮล์ทมีค่าเป็น 0.03 mT นำจุดของผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาสมการแทนกลุ่มของจุด โดยใช้วิธี least square โดยให้ y แทนแรงดันไฟฟ้า x แทนกระแสไฟฟ้าจะได้สมการเป็น $y = 3.63E - 7x^2 + 2.92E - 4x - 0.583$ สามารถคำนวณหาค่าวัดค่ากระแสวิกฤตได้โดยกำหนดให้เมื่อ $y = 0$ จะได้ค่าเป็น 980 mA ดังภาพประกอบ 54



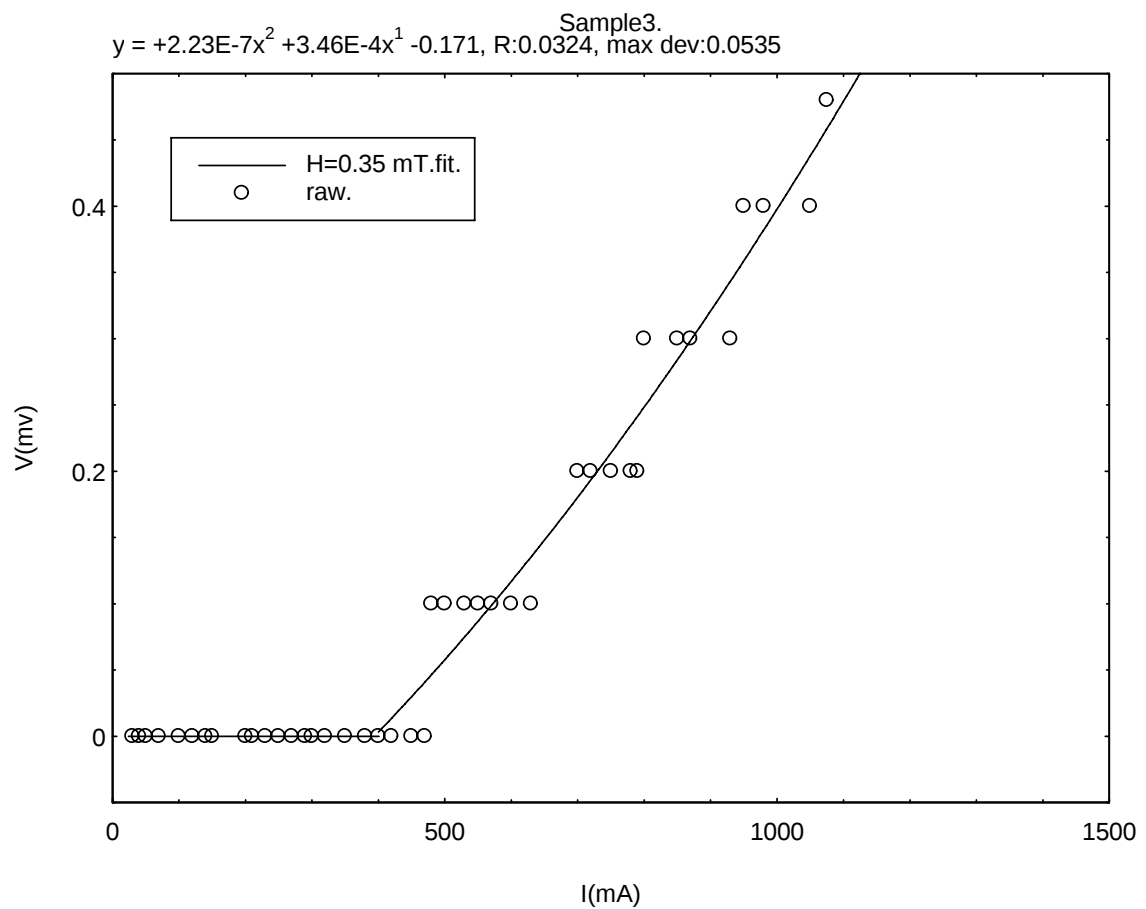
ภาพประกอบ 54 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่ากระแสวิกฤต 980 mA

จากนั้นเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเป็น 0.07 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 1.08E-6x^2 - 0.00120x + 0.231$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 900 mA ดังภาพประกอบ 55



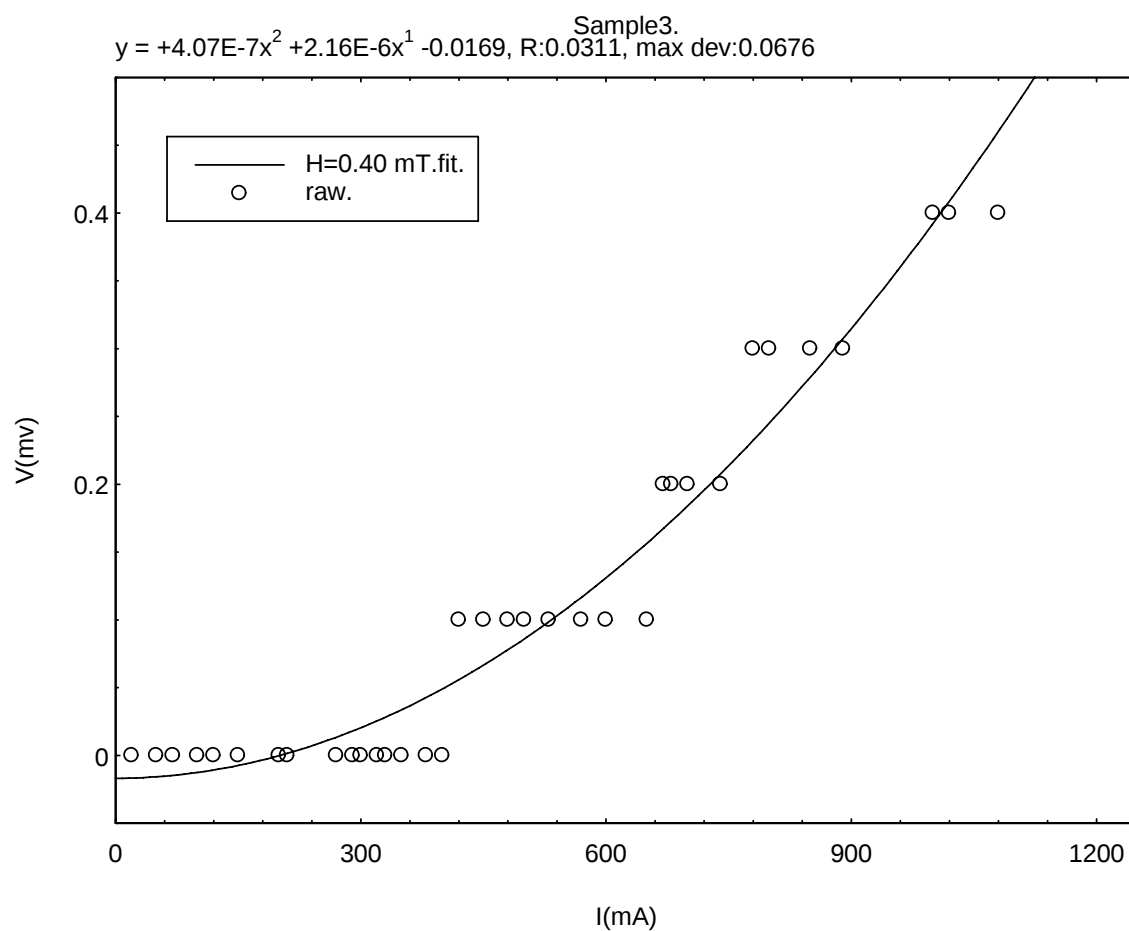
ภาพประกอบ 55 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.07 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 900 mA

จากนั้นเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเป็น 0.35 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 2.23E-7x^2 + 3.46E-4x - 0.171$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 480 mA ดังภาพประกอบ 56



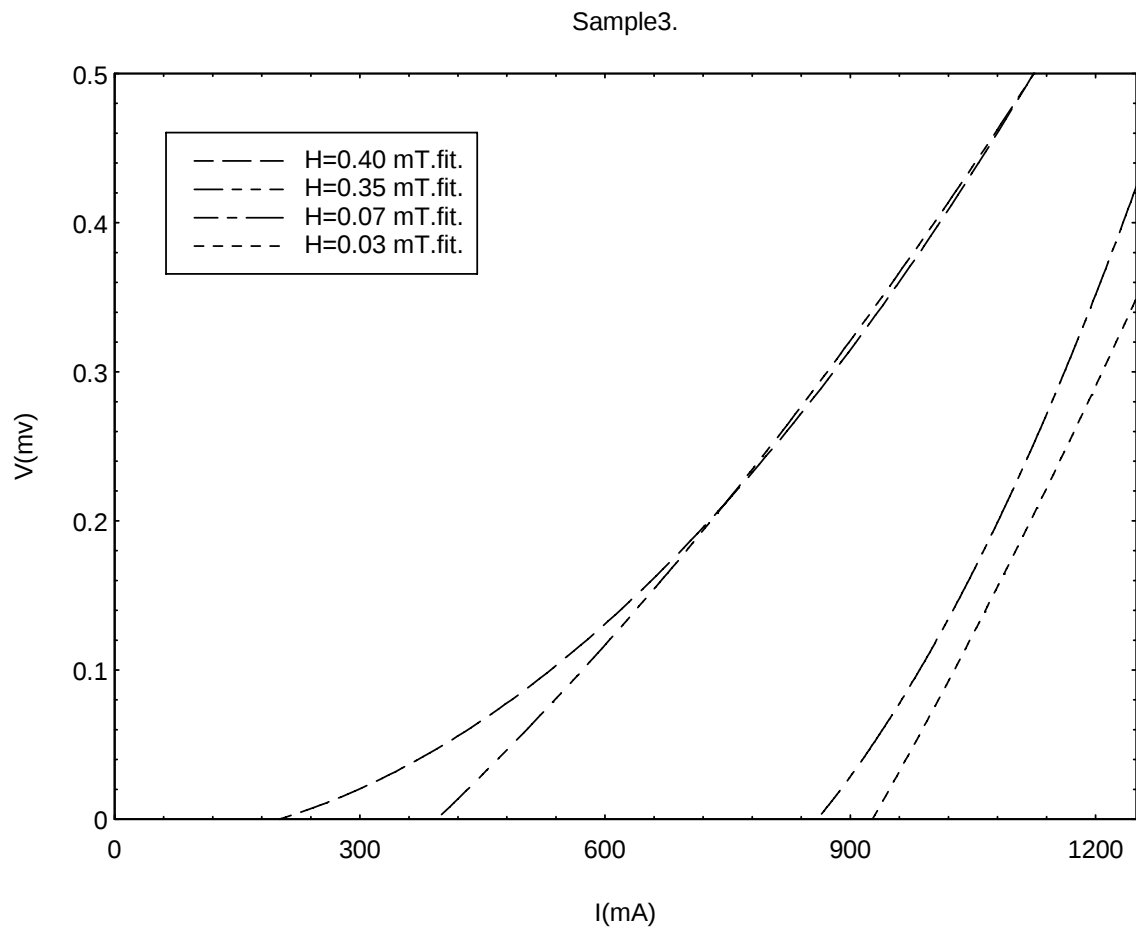
ภาพประกอบ 56 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.35 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 480 mA

จากนั้นเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเป็น 0.40 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 4.07E-7x^2 - 2.16E-6x - 0.0169$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 420 mA ดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 57 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.40 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 420 mA

จากการทดลองของตัวนำยิ่งยวดหมายเลขที่ 3 พบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสวิกฤตที่ได้มีค่าลดลงดังภาพประกอบ 58

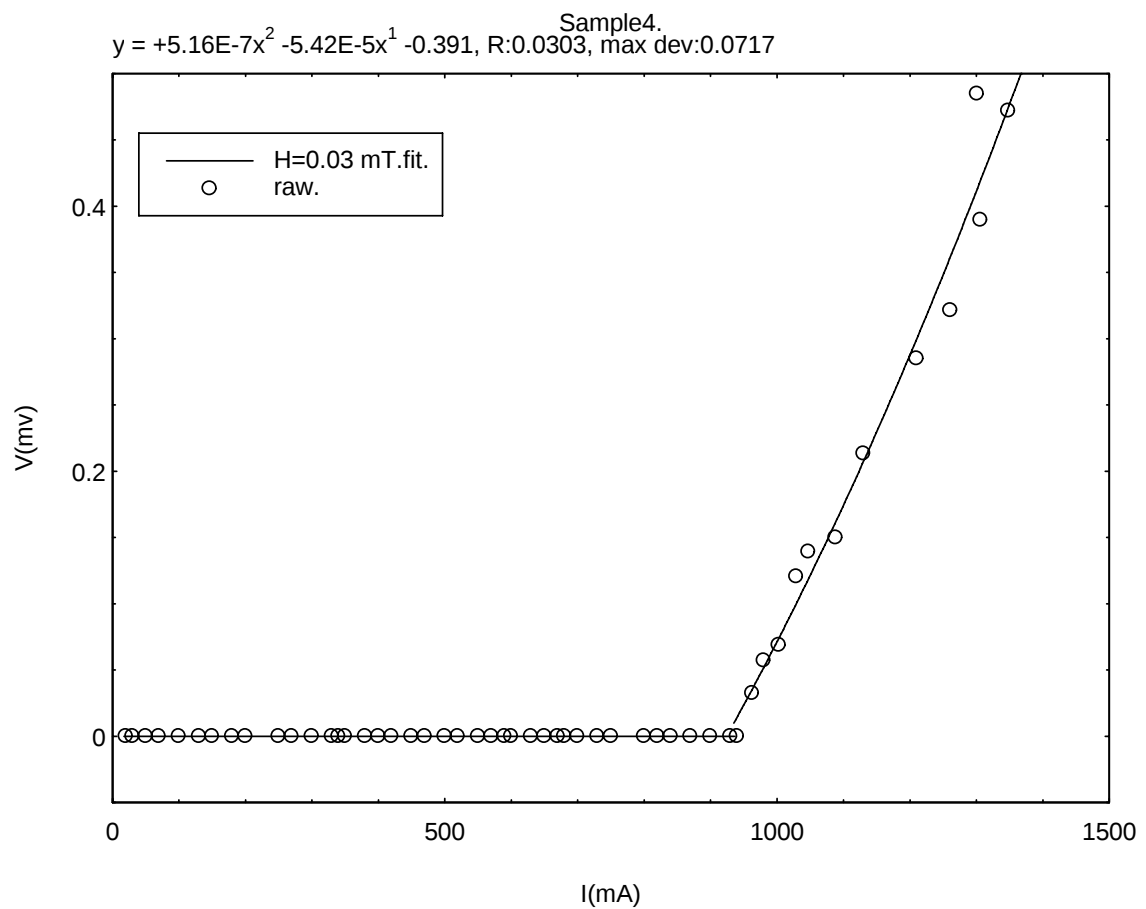


ภาพประกอบ 58 แสดงผลของอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งตัว หมายเลขที่ 3

จากภาพประกอบ 58 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่ 0.40 mT เป็นกราฟของสนามแม่เหล็กในสภาพปกติของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่าสนามแม่เหล็กที่ 0.35 mT เป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3

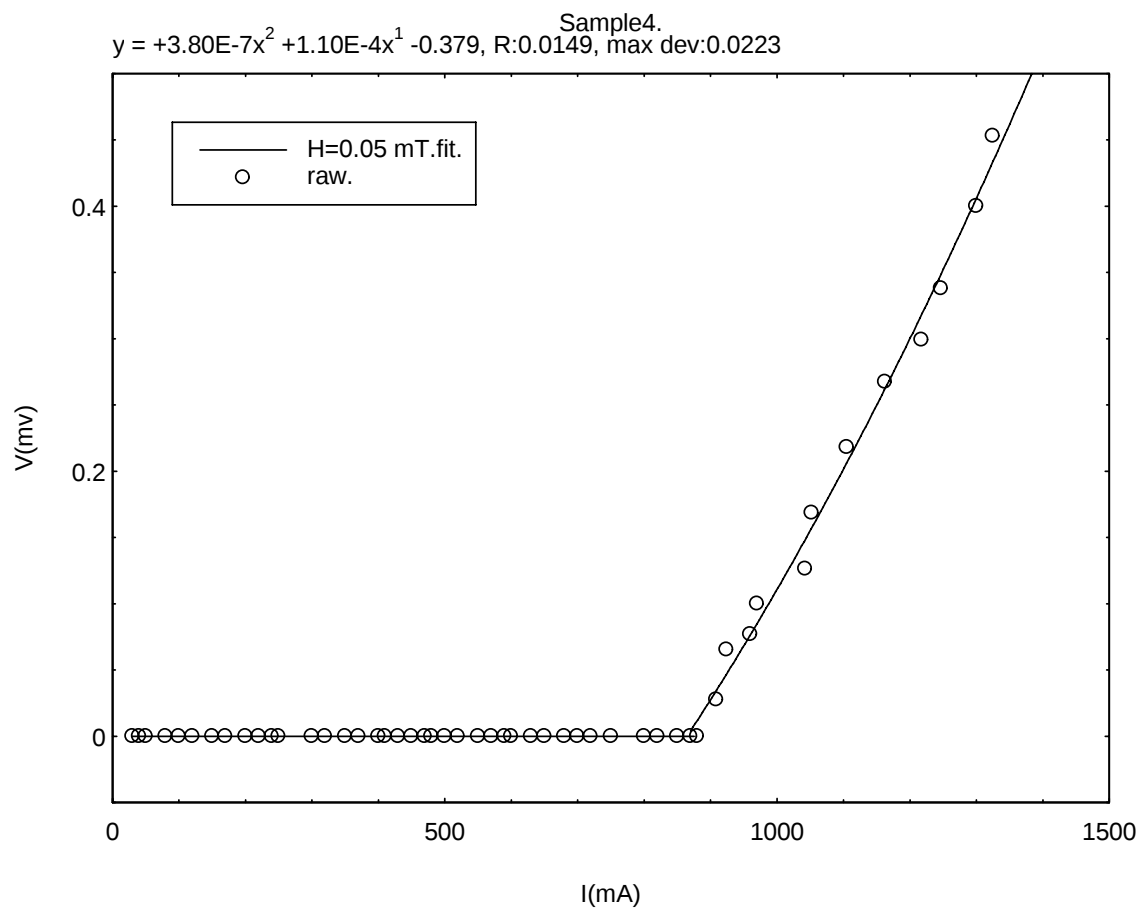
ตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 4

การทดลองวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 4 ใช้วิธีการวัดเดียวกับตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 1 จากการทดลองพบว่ากรณีที่สนามแม่เหล็กจากขดลวดเฮมโฮล์ทมีค่าเป็น 0.03 mT นำจุดของผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาสมการแทนกลุ่มของจุด โดยใช้วิธี least square โดยให้ y แทนแรงดันไฟฟ้า x แทนกระแสไฟฟ้าจะได้สมการเป็น $y = 5.16E - 7x^2 - 5.42E - 5x - 0.391$ สามารถคำนวณหาค่าวัดค่ากระแสวิกฤตได้โดยกำหนดให้เมื่อ $y = 0$ จะได้ค่าเป็น 950 mA ดังภาพประกอบ 59



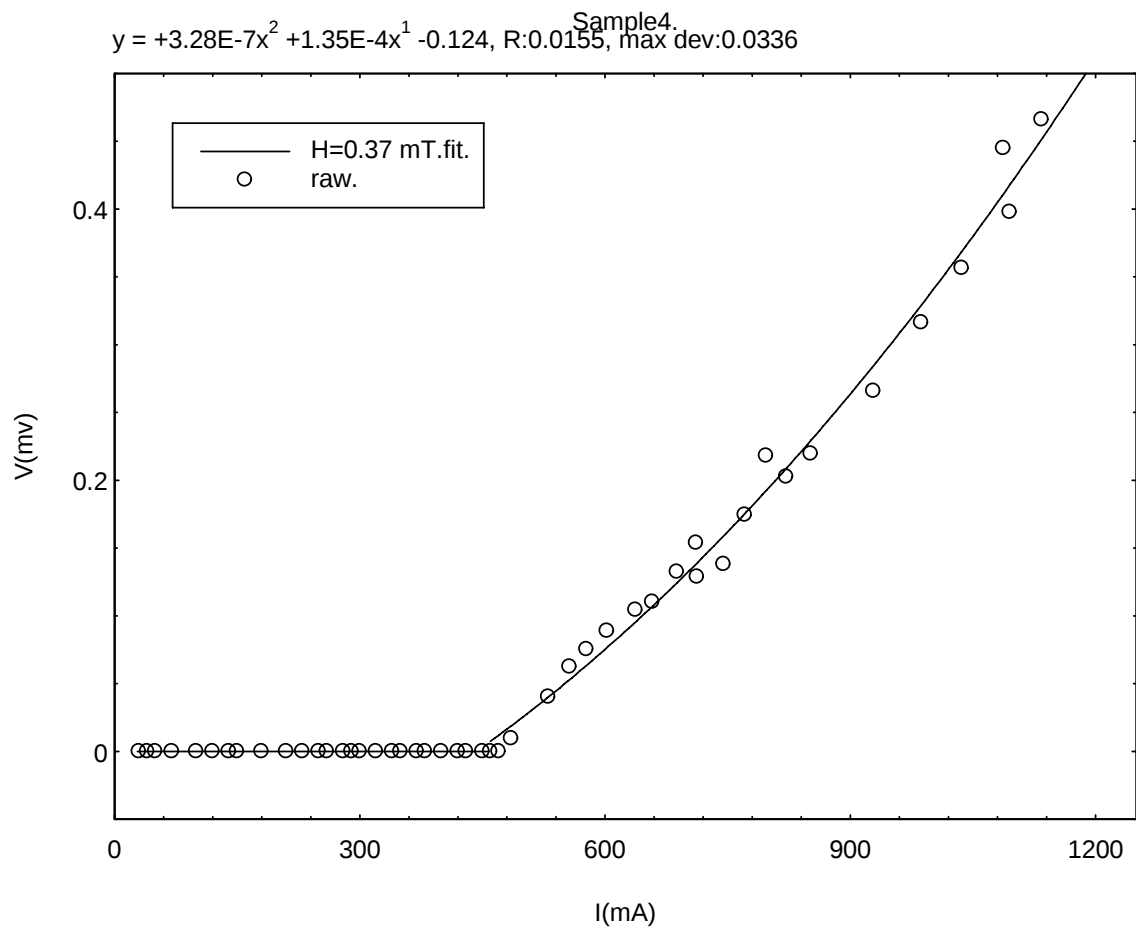
ภาพประกอบ 59 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.03 mT มีค่าของกระแสวิกฤต 950 mA

จากนั้นเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเป็น 0.05 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 3.80E-7x^2 - 1.10E-4x - 0.379$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 890 mA ดังภาพประกอบ 60



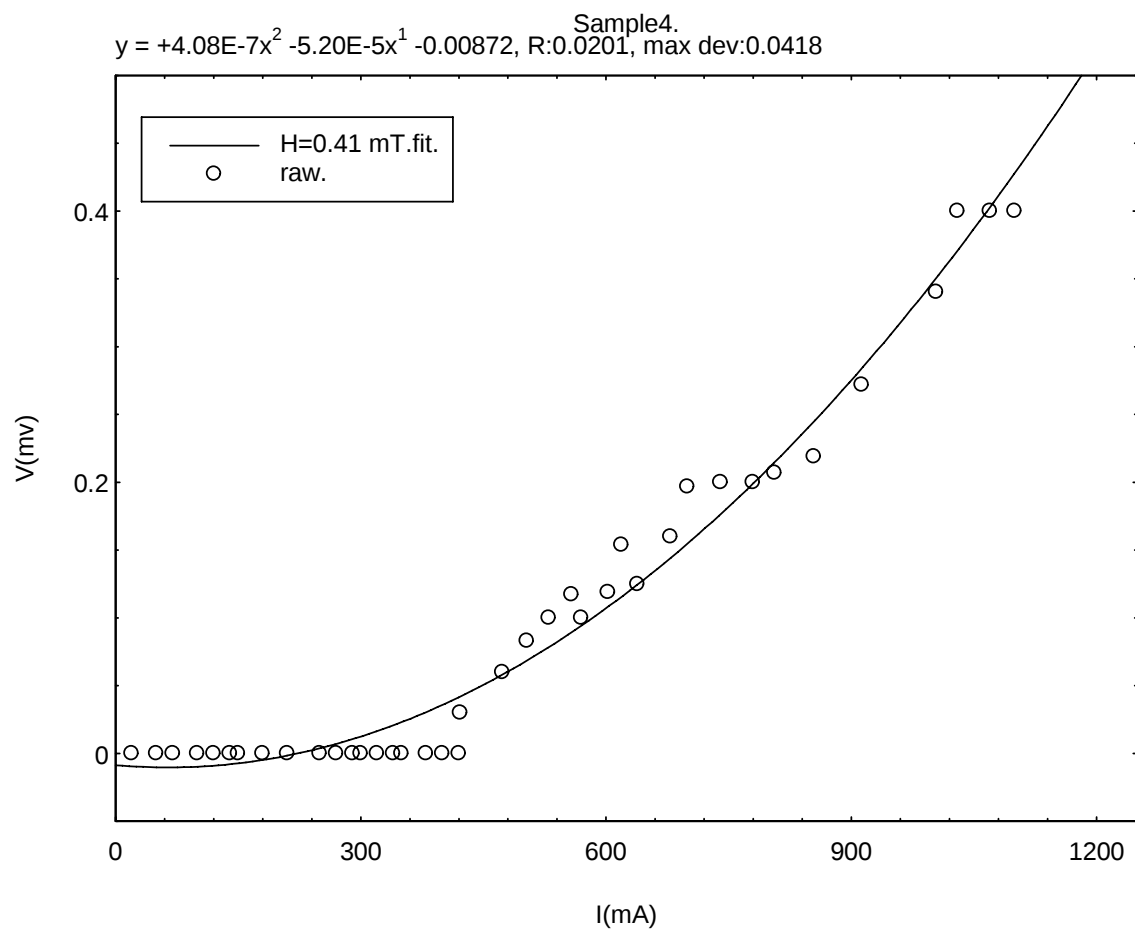
ภาพประกอบ 60 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.05 mT มีค่าของกระแสวิกฤต 890 mA

จากนั้นเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเป็น 0.37 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 3.28E-7x^2 - 1.35E-4x - 0.124$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 500 mA ดังภาพประกอบ 61



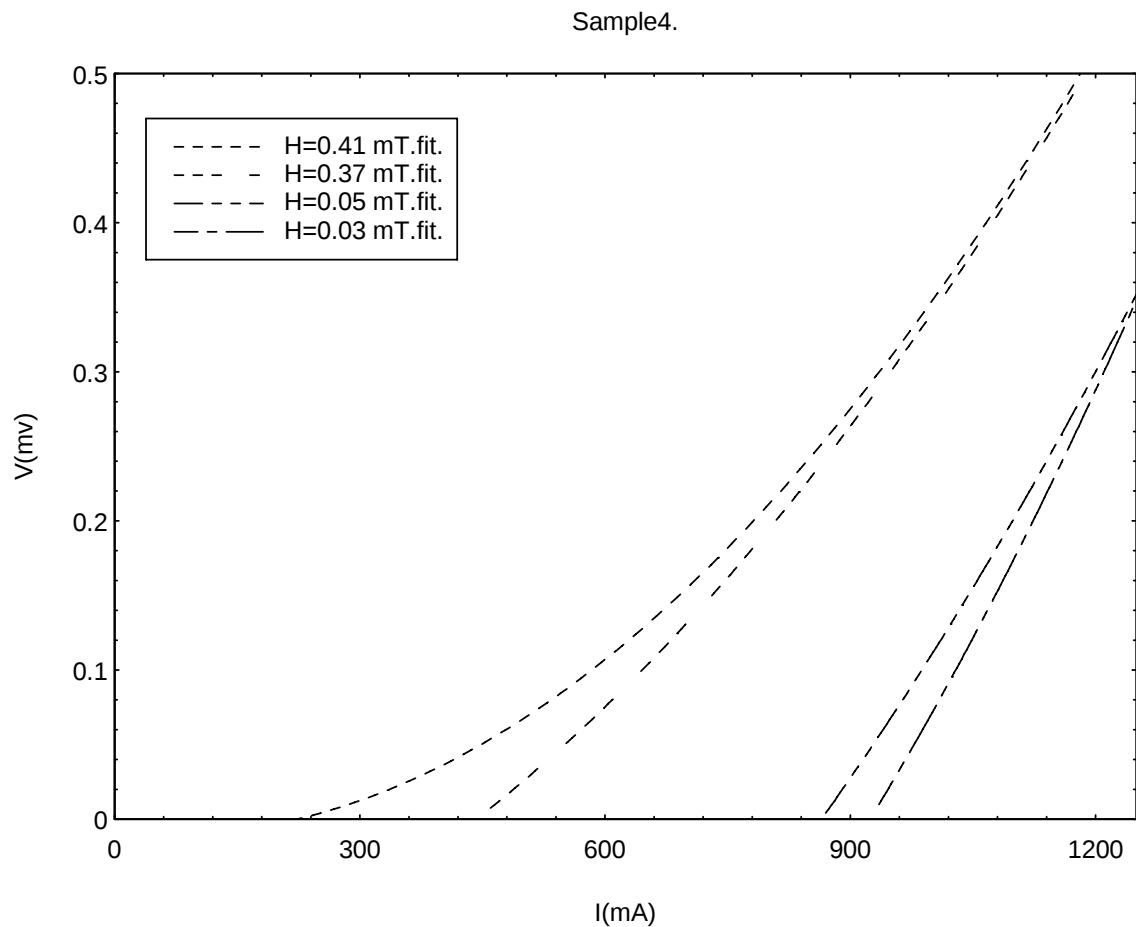
ภาพประกอบ 61 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.37 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 500 mA

จากนั้นเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเป็น 0.41 mT จะได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็น $y = 4.08E-7x^2 - 5.20E-5x - 0.00872$ จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่ากระแสวิกฤตได้เมื่อ $y = 0$ จะได้กระแสวิกฤตประมาณ 450 mA ดังภาพประกอบ 62



ภาพประกอบ 62 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.41 mT มีค่าของกระแสวิกฤตที่ 450 mA

จากผลการทดลองของตัวนำยิ่งยวดหมายเลขที่ 4 พบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสวิกฤตที่ได้มีค่าลดลงดังภาพประกอบ 63



ภาพประกอบ 63 แสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4

จากภาพประกอบ 63 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่ 0.41 mT เป็นกราฟของสนามแม่เหล็กในสภาพปกติของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่าสนามแม่เหล็กที่ 0.37 mT เป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4

4.4 การวัดด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction) เพื่อศึกษาโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

การวัดตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ด้วยเครื่อง XRD(X-Ray Diffraction) เป็นการศึกษารูปร่างของตัวนำยวดยิ่งโดยการยิงรังสีเอ็กซ์ไปยังสารที่ใช้ตรวจสอบโดยทราบค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่พุ่งตรงไปยังสารดังกล่าวจากนั้นรังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนเมื่อผ่านเข้าไปในผลึกของสารซึ่งจะทราบค่าของ d ของผลึกซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกอีกทั้งยังจะทราบค่ามุมที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่ได้จากการเคลื่อนที่ของ Detector ซึ่งกระบวนการเลี้ยวเบนดังกล่าวจะเป็นไปตามสมการของ Bragg คือ

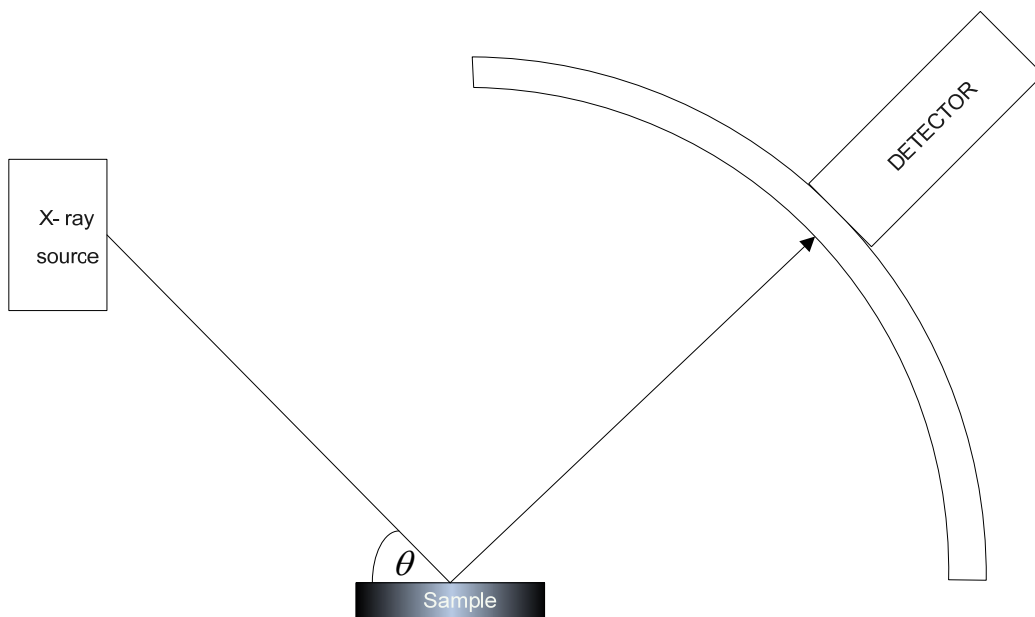
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots(4.1)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

θ คือ มุมที่ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

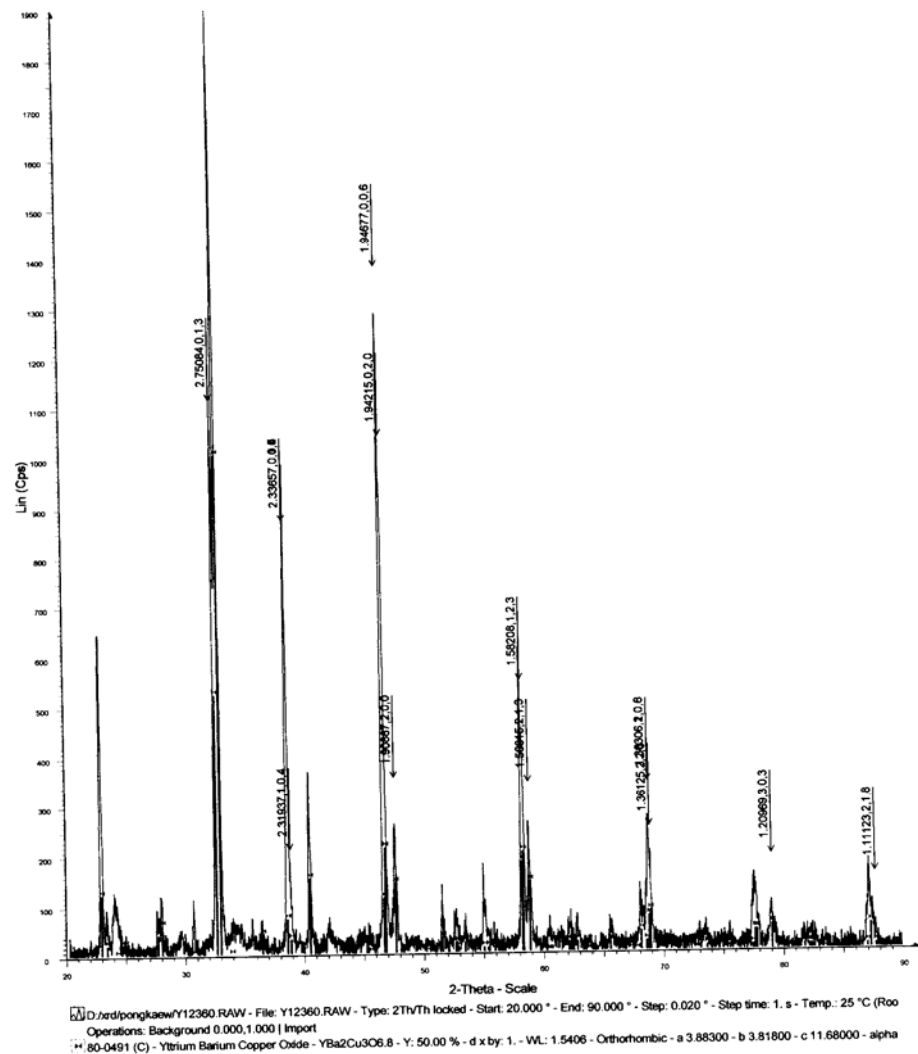
ซึ่งหลักการทำงานของเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction) ดังภาพประกอบ 64 ดังนี้



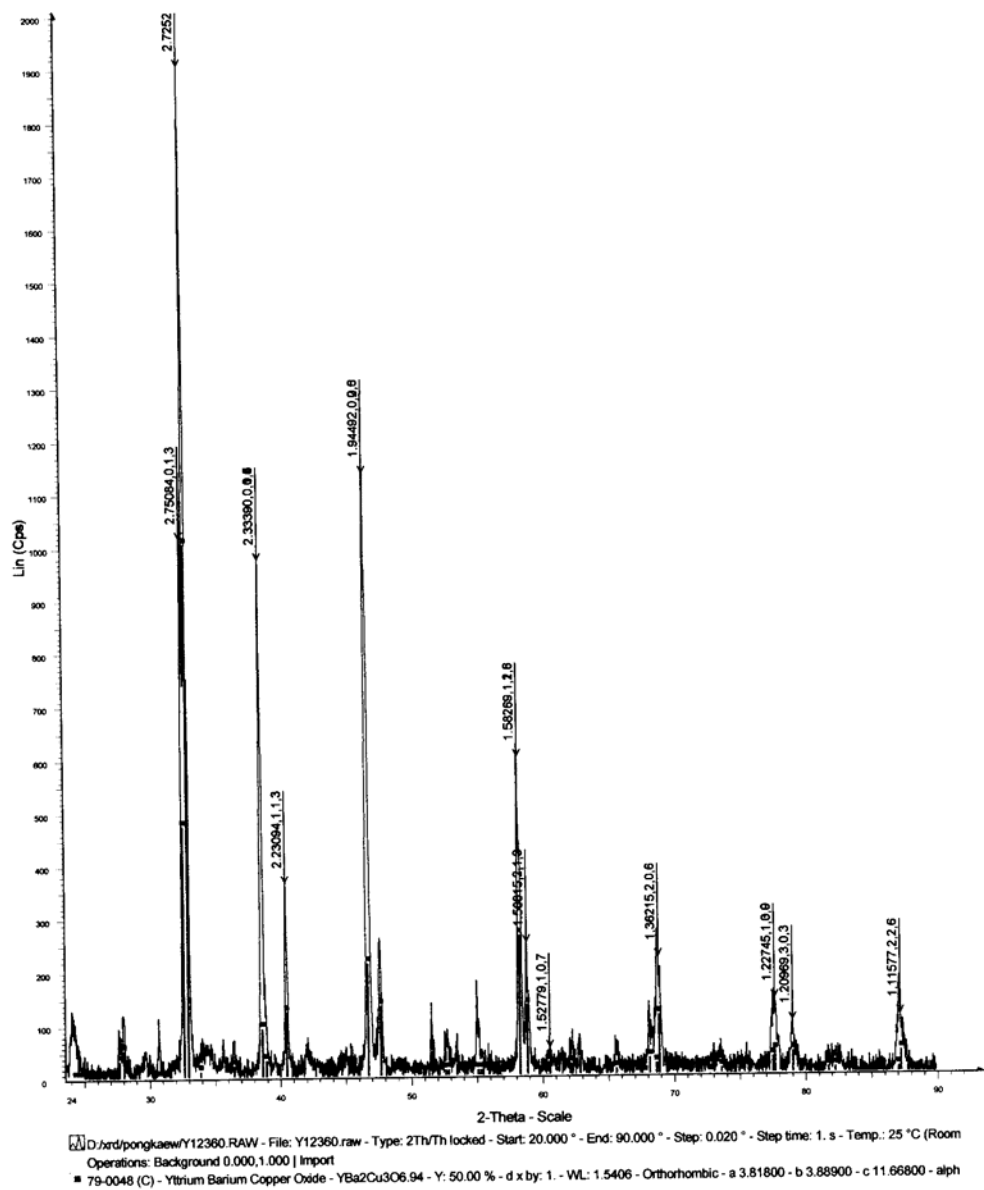
ภาพประกอบ 64 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction)

โดยในการทดลองผู้วิจัยนำตัวนำยวดยิ่งที่ได้จากการเผาขั้นตอนที่ 3 ซึ่งสารมีลักษณะเป็นแผ่นกลม นำสารบางส่วนมาบดด้วยครกอลูมินาให้เป็นผงละเอียด หลังจากนั้นนำผงดังกล่าวไปใส่ในตัวจับสารตัวอย่างแล้วอัดให้แน่นเพื่อที่จะทำการวัด โดยเครื่อง XRD ที่ใช้เป็นรุ่น มีความยาวคลื่น $K\alpha_1$ เท่ากับ $1.54061 \text{ \AA}$ ผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการวัดดังนี้ มุม 2θ เริ่มต้นจากมุม 20 องศาจนถึงมุม 90 องศา ใช้เวลาในการวัดแต่ละสารตัวอย่างตัวอย่างละ 1 ชั่วโมง โดยวัดที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุมการวัดของแต่ละสารตัวอย่างดังนี้

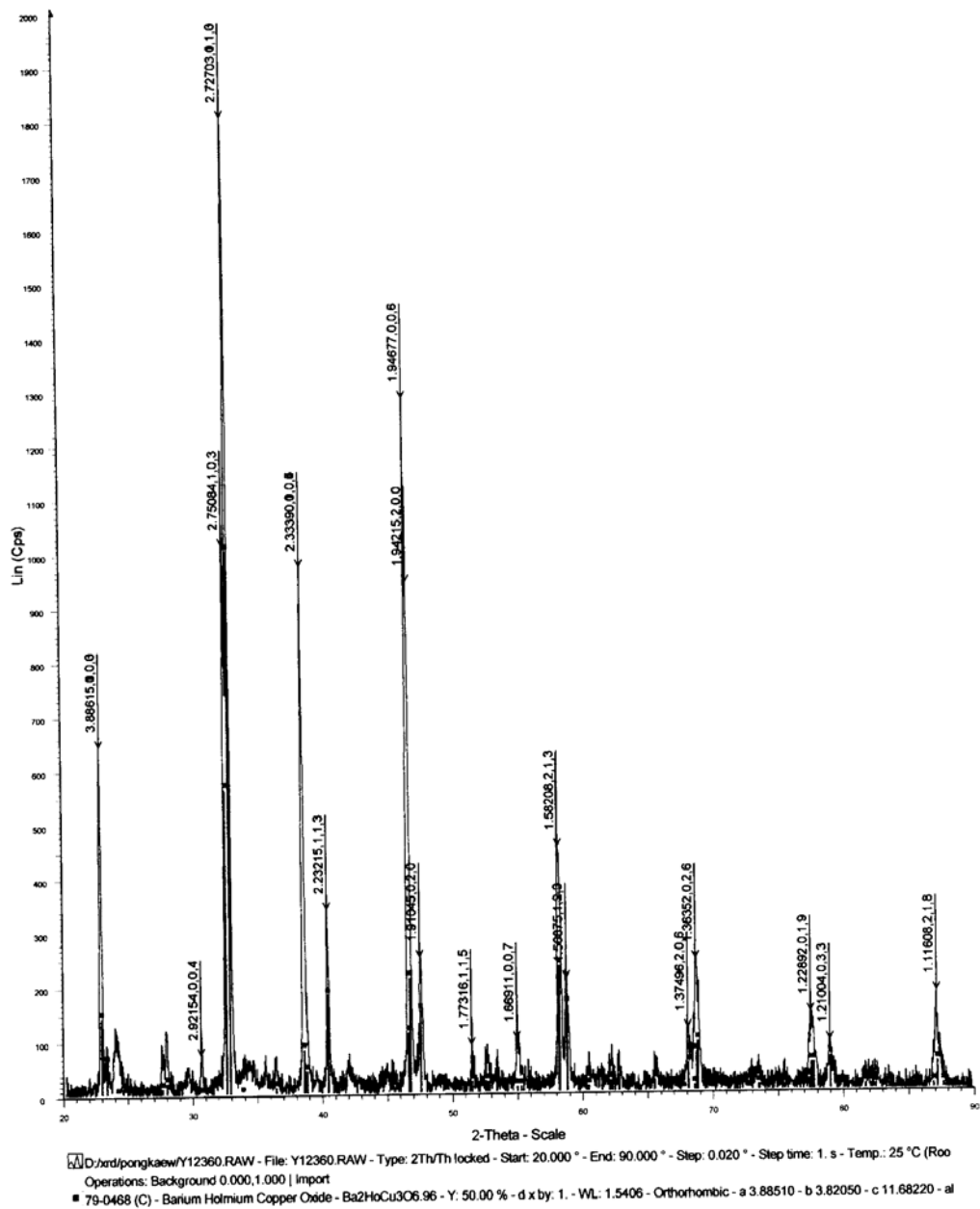
การวัดดังนี้ มุม 2θ เริ่มต้นจากมุม 20 องศาจนถึงมุม 90 องศา ใช้เวลาในการวัดแต่ละสารตัวอย่าง ตัวอย่างละ 1 ชั่วโมง โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 °C ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม การวัดของแต่ละสารตัวอย่างดังนี้



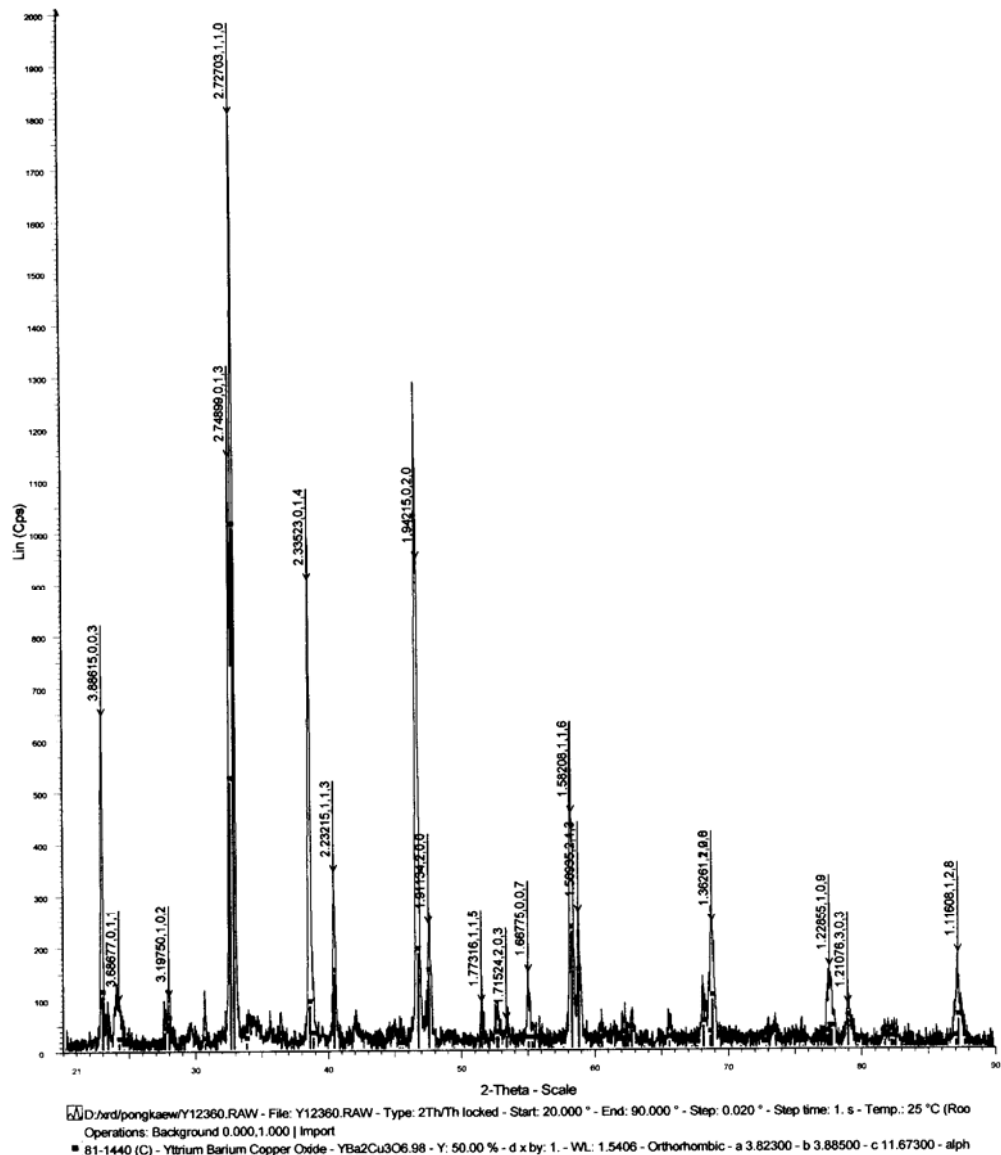
ภาพประกอบ 65 แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1 มีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก และมีสูตรทางเคมีเป็น YBa₂Cu₃O_{6.8}



ภาพประกอบ 66 แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2 มีโครงสร้าง
แบบออร์โธมบิก และมีสูตรทางเคมีเป็น YBa₂Cu₃O_{6.94}



ภาพประกอบ 67 แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3 มีโครงสร้างแบบออร์โธมิก และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.96}$



ภาพประกอบ 68 แสดงผลของการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4 มีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.98}$

นำผลทดลองที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง XRD ของตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลข มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PDF Maint version 5 Copyright 1995-1999 จะได้ข้อมูลองค์ประกอบของผลึกและสูตรทางเคมีของตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลขของตัวนำยวดยิ่งดังตารางที่ 2

ตาราง 2 แสดงสูตรทางเคมีของตัวนำยวดยิ่งทั้ง 4 ตัวอย่าง

วิเคราะห์ผลการทดลอง	a(°A)	b(°A)	c(°A)	สูตรทางเคมี
ตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 1	3.88300	3.81800	11.68000	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.8}
ตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 2	3.81800	3.88900	11.66800	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.94}
ตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 3	3.88510	3.82050	11.68220	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.96}
ตัวนำยวดยิ่งหมายเลขที่ 4	3.82300	3.88500	11.67300	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.98}

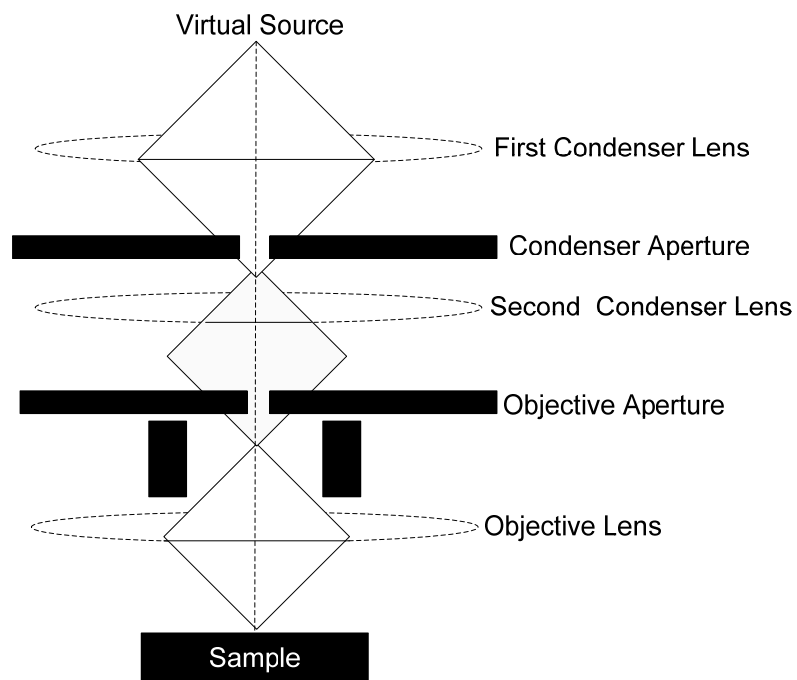
จากการทดลองด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO มีโครงสร้างแบบ orthorhombic ทุกสารตัวอย่างจากนั้นผู้วิจัยได้นำไปวัดด้วยเครื่องSEM (Scanning Electron Microscopy)ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5 การวัด SEM (Scanning Electron Microscopy)

SEM (Scanning Electron Microscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเพื่อให้เห็นถึงพื้นผิวของสารอีกทั้งยังใช้ดูขนาดของอนุภาค รูปร่างและลักษณะพื้นผิวโดยทั่วๆ ไปของสาร

ในตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM นั้นสามารถดูความเป็นเนื้อเดียวกันและดูความพรุนของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ได้ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้เครื่อง SEM ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นเครื่องรุ่น JSM-5410LV ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

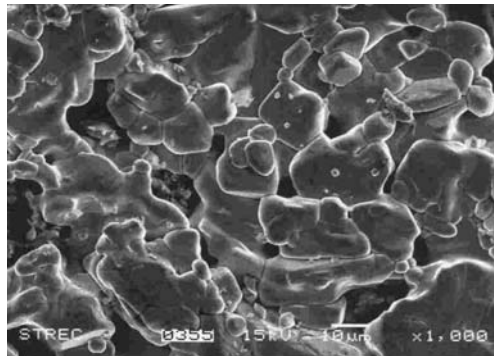
เริ่มจาก Virtual Source ได้สร้าง monochromatic electron จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกบีบให้แน่นขึ้นด้วยเลนส์แรกเรียกว่า first condenser lens แล้วลำอิเล็กตรอนจะผ่านเพื่อทำให้แคบลงด้วย condenser aperture แล้วผ่านไปยัง second condenser เพื่อทำให้ลำอิเล็กตรอนบางและมีความคมชัดขึ้นจากนั้นจะผ่านไปยัง objective aperture เพื่อจัดลำอิเล็กตรอนที่มีมุมโตๆ ออกไป แล้วจะผ่านไปยัง objective lens เพื่อเป็นการรวมลำอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้มีความคมอีกครั้งก่อนที่จะถึงสารที่เราศึกษาโดยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) มีลักษณะการทำงานดังภาพประกอบ 69 ดังนี้



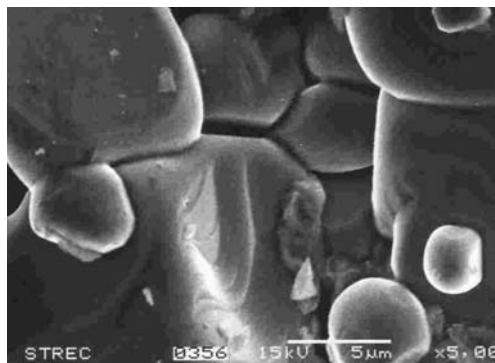
ภาพประกอบ 69 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy)

นำสารตัวอย่างที่ได้จากการเผาครั้งที่ 3 บางส่วน มาเตรียมพร้อมสำหรับการวัด SEM โดยเตรียมสารตัวอย่างให้มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดพอประมาณ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปวางที่จับสารตัวอย่าง (Sample holder) โดยไม่ต้องเคลือบด้วยทอง หลังจากนั้นทำการถ่ายภาพที่กำลังขยายที่แตกต่างกันคือ 1,000 5,000 10,000 เท่า ซึ่งมีภาพถ่ายของพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

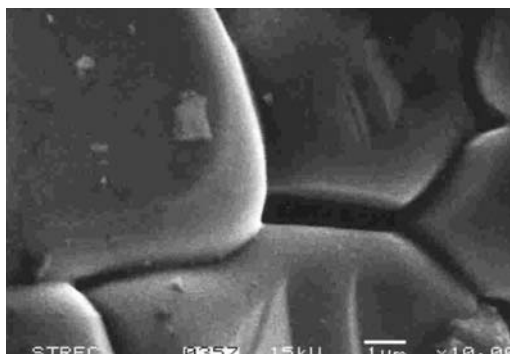
ตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 1



ภาพประกอบ 70 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 1 ที่กำลังขยาย 1000 จะเห็นว่ามีขนาดของเกรนประมาณ $10\ \mu\text{m}$

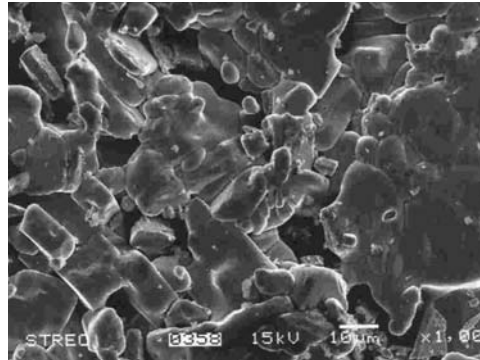


ภาพประกอบ 71 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 1 ที่กำลังขยาย 5000 จะเห็นว่าขนาดของเกรนประมาณ $5\ \mu\text{m}$

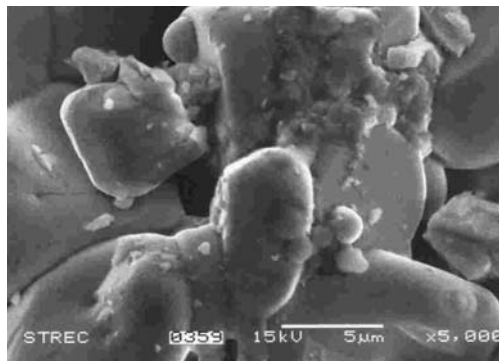


ภาพประกอบ 72 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 1 ที่กำลังขยาย 10000 จะเห็นว่าขนาดของเกรนประมาณ $4\ \mu\text{m}$

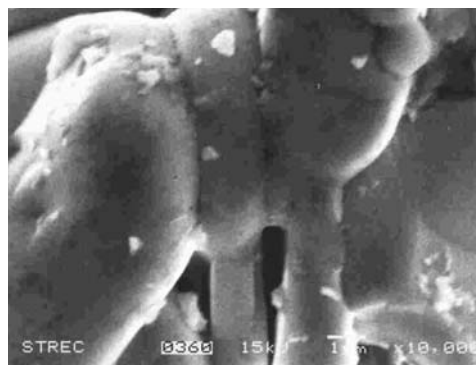
ตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 2



ภาพประกอบ 73 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 2 ที่กำลังขยาย 1000 จะเห็นว่ามีขนาดของเกรนประมาณ 10 μm

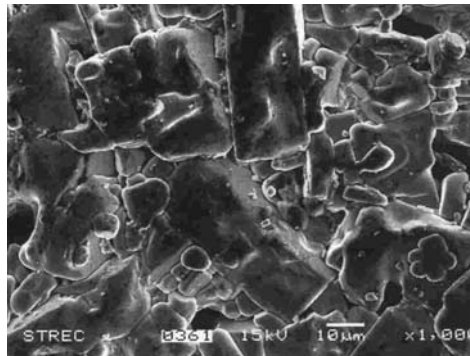


ภาพประกอบ 74 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 2 ที่กำลังขยาย 5000 จะเห็นว่ามีขนาดของเกรนประมาณ 5 μm

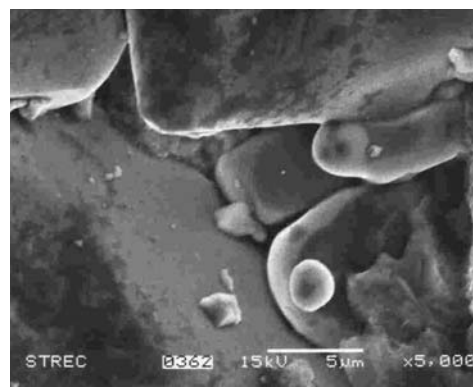


ภาพประกอบ 75 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยดย้งหมายเลขที่ 2 ที่กำลังขยาย 10000 จะเห็นว่ามีขนาดของเกรนประมาณ 1 μm

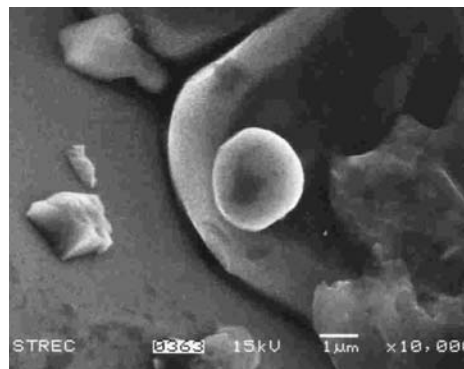
ตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3



ภาพประกอบ 76 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ที่กำลังขยาย 1000 จะเห็นว่ามีขนาดของเกรนประมาณ $10\ \mu\text{m}$

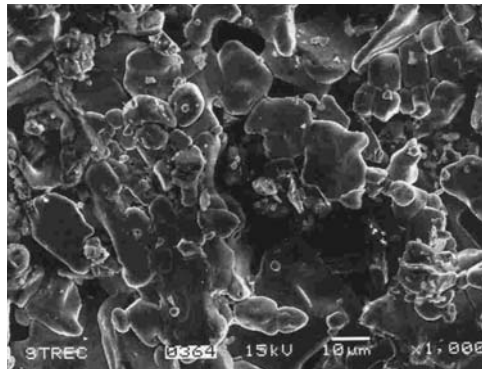


ภาพประกอบ 77 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ที่กำลังขยาย 5000 จะเห็นว่ามีขนาดของเกรนประมาณ $5\ \mu\text{m}$

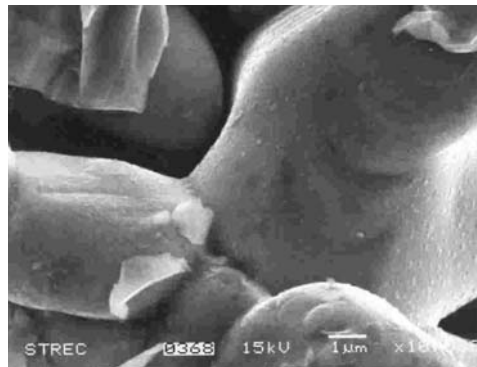


ภาพประกอบ 78 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวดยิ่งหมายเลขที่ 3 ที่กำลังขยาย 10000 จะเห็นว่ามีขนาดของเม็ดประมาณ $1\ \mu\text{m}$

ตัวนำวยอดยิ่งหมายเลขที่ 4



ภาพประกอบ 79 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยอดยิ่งหมายเลขที่ 4 ที่กำลังขยาย 1000 จะเห็นว่า
ขนาดของเกรนประมาณ $10\ \mu\text{m}$



ภาพประกอบ 80 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยอดยิ่งหมายเลขที่ 4 ที่กำลังขยาย 5000 จะเห็นว่า
ขนาดของเกรนประมาณ $5\ \mu\text{m}$

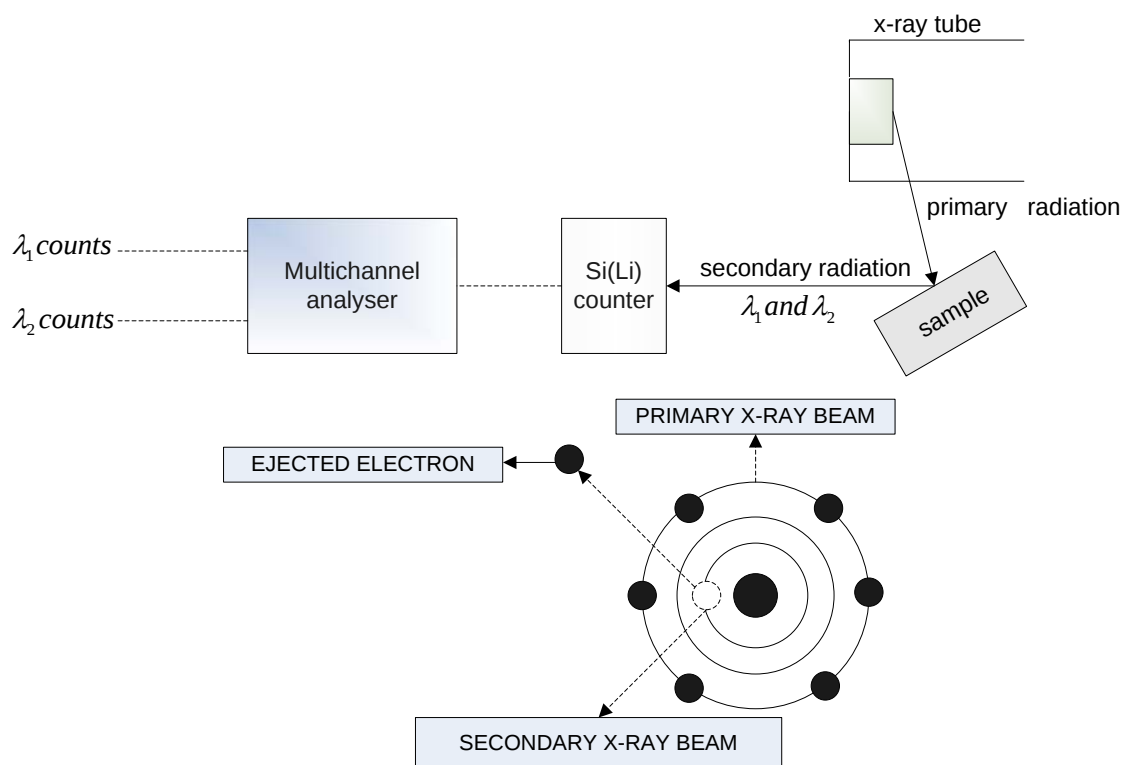


ภาพประกอบ 81 แสดงภาพถ่ายผิวของตัวนำวยอดยิ่งหมายเลขที่ 4 ที่กำลังขยาย 10000 จะเห็นว่า
มีขนาดของเกรนประมาณ $5\ \mu\text{m}$

จากการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ได้แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวโดยส่วนใหญ่ยังไม่เป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควร

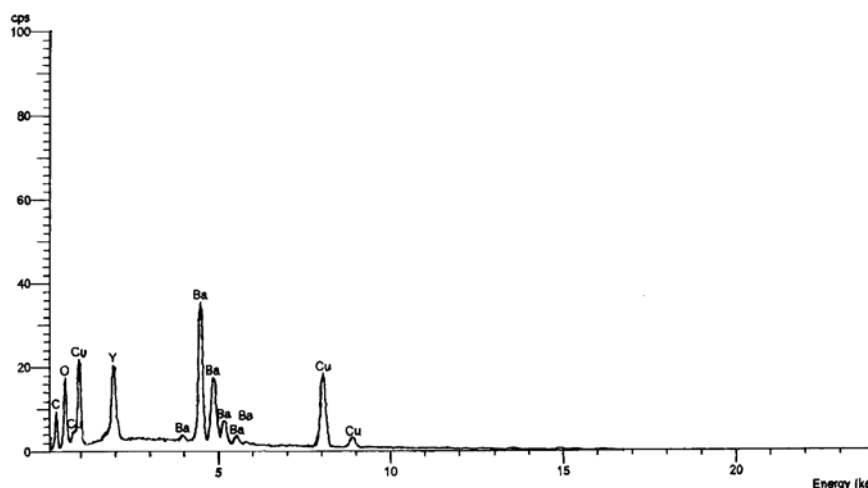
4.6 การวัดด้วยเครื่อง EDS (Energy Dispersive Spectrometer)

การวัดด้วยเครื่อง EDS เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดในการศึกษาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารที่ใช้ศึกษาโดยได้รังสีเอกซ์ที่เรียกว่า (Primary X-ray beam) ที่ได้จาก X-ray tube แล้วยิงตรงไปที่สารตัวอย่าง Primary X-ray beam นี้จะทะลุผ่านเข้าไปในอะตอมจึงเป็นสาเหตุให้อิเล็กตรอนวงในของอะตอมนั้นหลุดออกจากอะตอมตั้งนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนวงนอกที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเข้าไปแทนที่ในระดับพลังงานที่ต่ำกว่าจากการที่อิเล็กตรอนตัวดังกล่าวได้หลุดออกไปอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงนี้จะปล่อย Secondary X-Ray ออกมาซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นนี้เป็นพลังงานที่เป็นเอกลักษณ์ของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมโดย Secondary X-RAY จะถูกใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในสารที่ใช้ศึกษา ในการใช้งานทำงานของเครื่อง EDS เป็นเครื่องมือที่ใช้หลังจากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM ซึ่งมีหลักการทำงานของเครื่อง EDS ดังภาพประกอบ 82



ภาพประกอบ 82 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง EDS (Energy Dispersive Spectrometer)

การทดลองการวัดด้วยเครื่อง EDS จะแสดงปริมาณของธาตุออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ที่มีอยู่ในสารนั้น และในตัวอย่างยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ที่ผู้วิจัยได้ศึกษานั้นมีปริมาณยิทเทรียม แบเรียม คอปเปอร์และออกซิเจนซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่จริงในตัวอย่างยิ่งกลุ่มนี้ซึ่งสามารถแสดงออกมาเป็นภาพประกอบ 83 ดังนี้

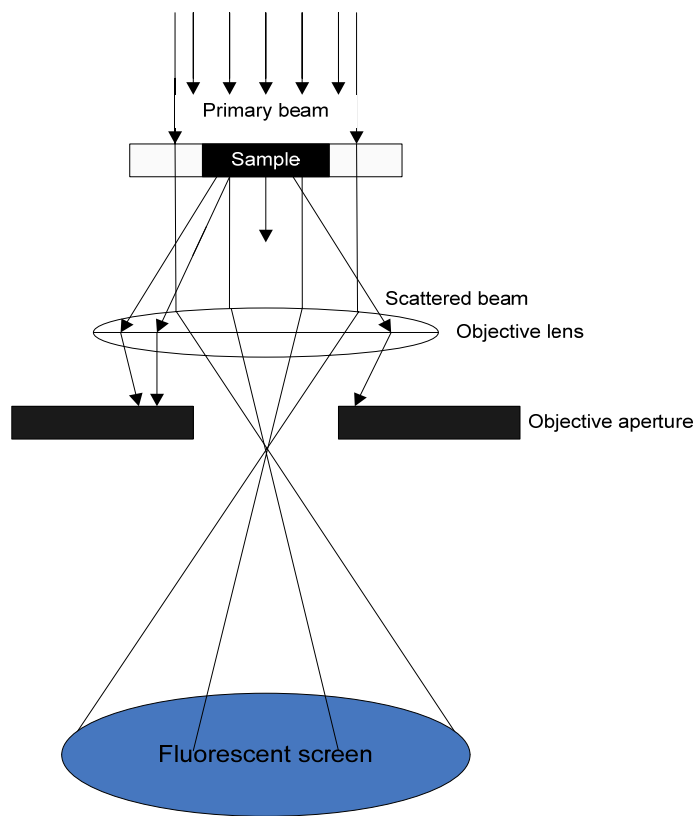


ภาพประกอบ 83 แสดงปริมาณธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO

จากการวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างยิ่งพบว่าตัวอย่างยิ่งประกอบด้วยธาตุยิทเทรียม (Y) แบเรียม(Ba) คอปเปอร์(Cu) และออกซิเจนในปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ

4.7 การวัดด้วยเครื่อง TEM (Transmission Electron Microscopy)

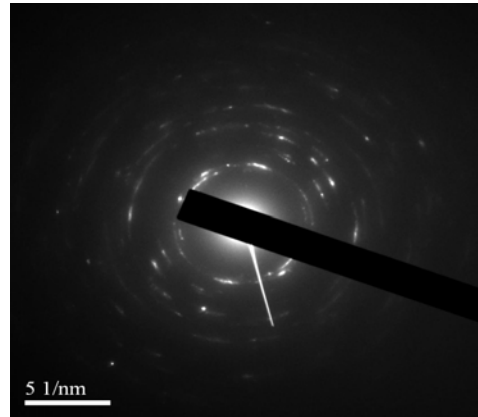
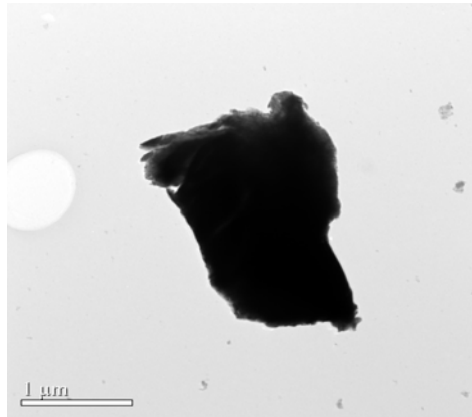
ในการเตรียมสารในการวัดด้วยเครื่อง TEM ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO บางส่วนไปบดให้ละเอียดด้วยครกอลูมินาแล้วนำผงดังกล่าวไปใส่ในตัวจับสารตัวอย่าง (Sample holder) จากนั้นนำไปใส่ในอุปกรณ์การวัดของเครื่อง TEM ซึ่งผู้วิจัยได้ทดลองใช้เครื่อง TEM ซึ่งในการวัดด้วยเครื่อง TEM เป็นวิธีการศึกษาโครงสร้างของสารโดยการให้ลำอิเล็กตรอนผ่านสารตัวอย่างเมื่อลำอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านสารแล้วจะเกิดการเลี้ยวเบนซึ่งเกิดจากระนาบของผลึกที่เราศึกษาเมื่อลำอิเล็กตรอนที่ผ่านสารตัวอย่างจะผ่านไปยัง Objective len ซึ่งจะมีลำอิเล็กตรอนบางส่วนเกิดการกระเจิงซึ่งจะถูกจำกัดด้วย Objective aperture แล้วจะได้ลำของอิเล็กตรอนที่พุ่งผ่านปรากฏอยู่บน Fluorescent screen ซึ่งมีเครื่อง TEM มีลักษณะการทำงานดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 84 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง TEM (Transmission Electron Microscopy)

ในตัณนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ที่ได้นำไปศึกษาด้วยเครื่อง TEM แล้วโดยส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบผลึกเดี่ยว(Single crystal) ดังภาพประกอบดังนี้

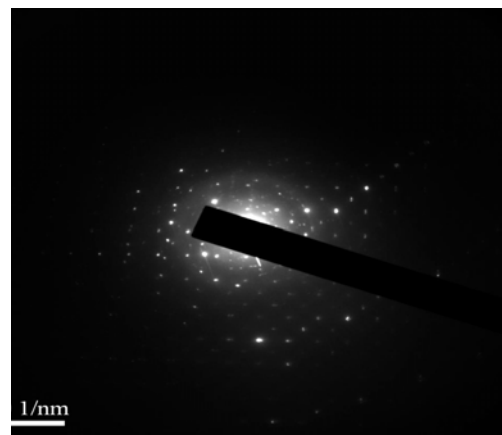
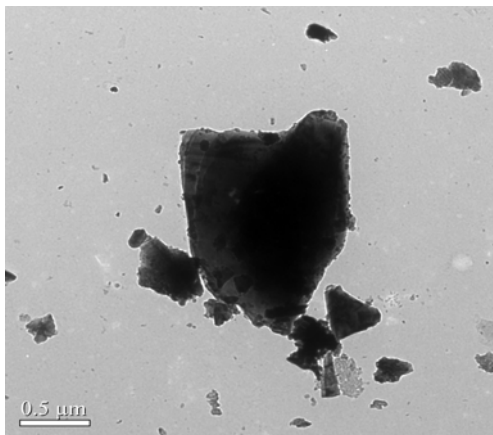
ตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 1



ภาพประกอบ 85 แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 1

จากภาพประกอบแสดงพบว่าตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 1 มีลักษณะของผลึกเป็นแบบผลึกเดี่ยว (Single-crystal) และมีขนาดของผลึก ประมาณ $1\ \mu\text{m}$

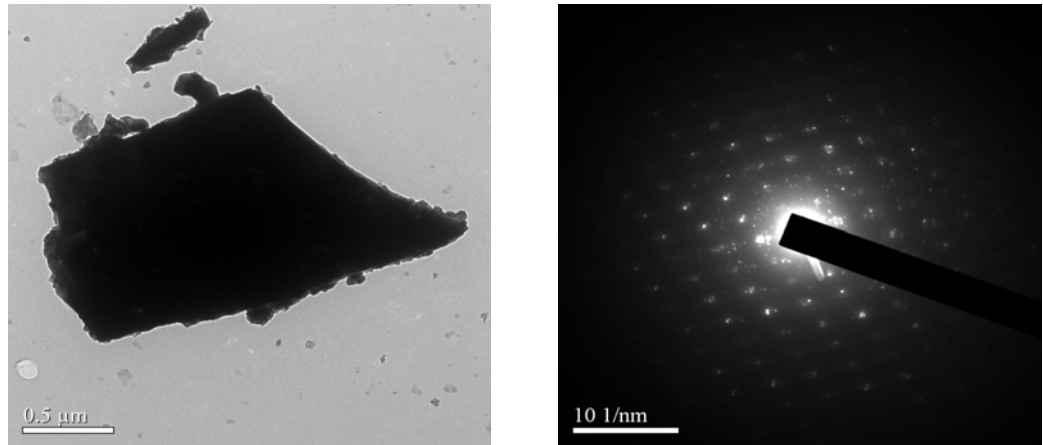
ตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 2



ภาพประกอบ 86 แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 2

จากภาพประกอบแสดงพบว่าตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 2 มีลักษณะของผลึกเป็นแบบผลึกเดี่ยว (Single-crystal) และมีขนาดของผลึก ประมาณ $0.5\ \mu\text{m}$

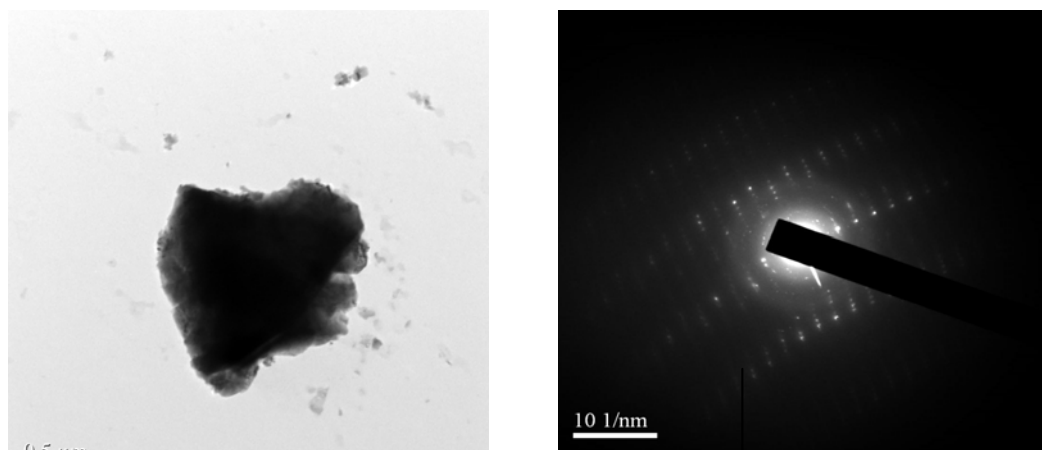
ตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 3 เป็นการผสมระหว่างผลึกเดี่ยวหลายผลึก (Polycrystalline) กับผลึกเดี่ยว(Single-crystal) ดังภาพประกอบ 87



ภาพประกอบ 87 แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 3

จากภาพประกอบแสดงพบว่าตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 3 มีลักษณะของผลึกเดี่ยว(Single crystal) และมีขนาดของผลึก ประมาณ $0.5 \mu\text{m}$

ตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 4



ลักษณะของ
ผลึกเป็นชั้นๆ

ภาพประกอบ 88 แสดงลักษณะของผลึกของตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 4

จากภาพประกอบ 88 แสดงพบว่าตัวนำเวดยี่ห้อหมายเลขที่ 4 มีลักษณะของผลึกเป็นแบบผลึกเดี่ยว (Single crystal) และแบบเป็นชั้นซึ่งมีขนาดของผลึก ประมาณ $0.5 \mu\text{m}$

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการเตรียมและศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO กระบวนการเตรียมใช้วิธีการ solid state reaction โดยแบ่งกระบวนการเผา 3 ขั้นตอน คือการเผาครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นกระบวนการเริ่มแรกของกระบวนการเตรียม จากนั้นนำไปสู่กระบวนการเผาครั้งที่ 2 ซึ่งจะได้สารที่มีความแข็งแรงมากกว่าการเผาครั้งที่ 1 หลังจากนั้นนำไปเผากระบวนการที่ 3 ก็เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ ซึ่งในแต่ละกระบวนการเผาก็ได้ปรับสัดส่วนของการเติมออกซิเจนของสารตัวอย่างให้ไม่เท่ากันโดยแบ่งออกเป็น 4 ตัวอย่าง คือตัวอย่างหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 หลังจากนั้นนำตัวนำยวดยิ่งที่มีสัดส่วนของออกซิเจนไม่เท่ากันไปวัดสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ มีกระบวนการวัดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 เครื่องมือที่สร้างขึ้น

1. การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO
2. การวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่ง

โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้ คณะผู้วิจัยได้นำตัวนำยวดยิ่งไปทดสอบด้วยเครื่องมืออื่นๆ ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องมือดังนี้

1.2 เครื่องมืออื่นๆ

1. การวัดด้วยเครื่อง XRD เพื่อใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก
2. การถ่ายภาพ SEM เพื่อดูพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง
3. การวัดด้วยเครื่อง EDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ในตัวนำยวดยิ่ง
4. การวัดด้วยเครื่อง TEM เพื่อใช้ในการดูลักษณะของผลึก

โดยเครื่อง XRD ใช้ที่มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร และเครื่องมืออื่นๆ ได้นำไปศึกษาสมบัติที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลจากการทดลอง

จากชุดเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตและวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถหาได้จากวัสดุอุปกรณ์ที่มีภายในประเทศ ซึ่งผลการทดลองของตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลขแสดงได้ดังนี้

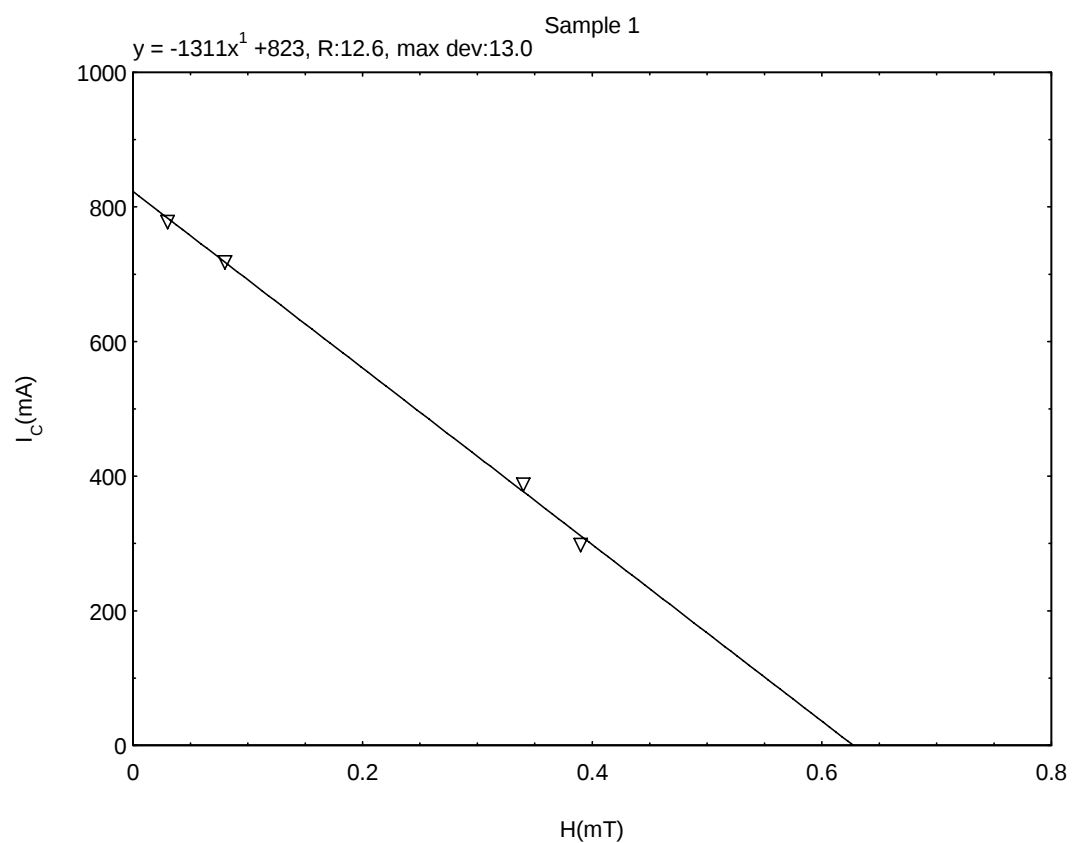
1. การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO มีกระบวนการวัดอุณหภูมิวิกฤตโดยเริ่มวัดอุณหภูมิที่ 77 K เมื่อระบบการวัดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแล้วสังเกตค่าของแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากมัลติมิเตอร์และค่าของอุณหภูมิสามารถสังเกตได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล มีรายละเอียดของอุณหภูมิวิกฤตของแต่ละสารตัวอย่างตามลำดับ

ตาราง 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลขและอุณหภูมิวิกฤต

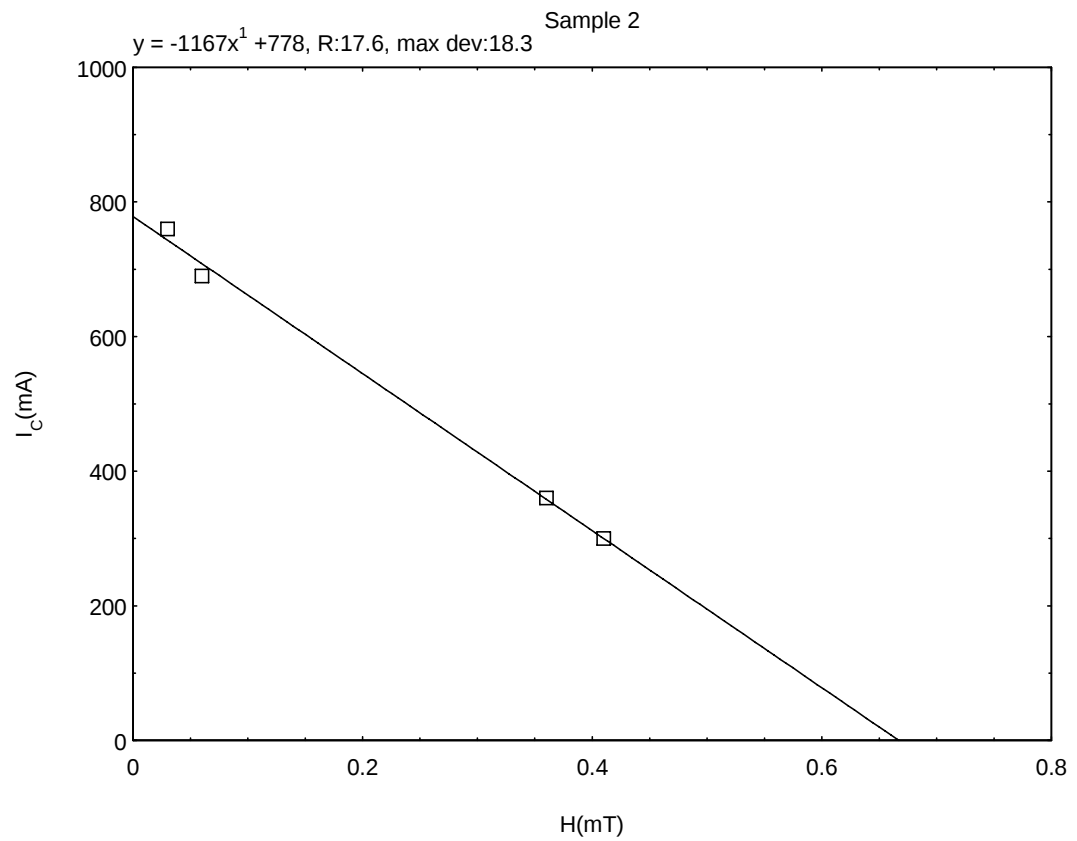
สารตัวอย่างที่	$T_c(K)$
หมายเลขที่ 1	90
หมายเลขที่ 2	90
หมายเลขที่ 3	90
หมายเลขที่ 4	91

2. การวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่ง

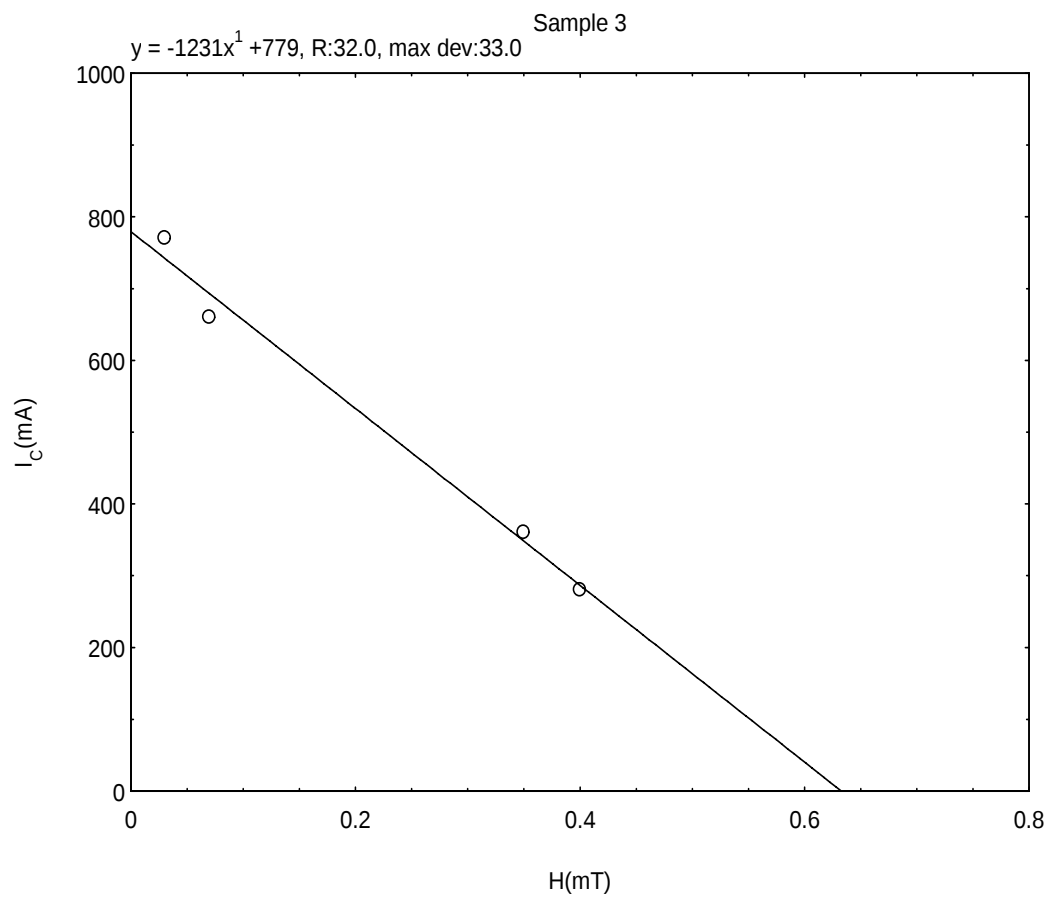
ผลการวิจัยของการวัดอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งได้กำหนดให้ระบบของการวัดมีอุณหภูมิคงที่ที่ 77 K ซึ่งที่อุณหภูมินี้ตัวนำยวดยิ่งอยู่ในสภานำยวดยิ่ง ใช้กระบวนการวัดเช่นเดียวกับการวัดอุณหภูมิวิกฤต พร้อมกับให้สนามแม่เหล็กตัวนำยวดยิ่งในแนวตั้งฉากกับผิวระนาบของสารตัวอย่าง ในสภาพนี้ซึ่งจะพบว่าสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไปมีอิทธิพลต่อตัวนำยวดยิ่ง และสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งตามหมายเลขต่างๆ ตามลำดับ จากกราฟได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีค่าของ $I_c=0$ จะได้ค่าของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น 0.63, 0.68 , 0.63 และ 0.64 mT ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการประมาณค่าที่ได้จากการ fit curve



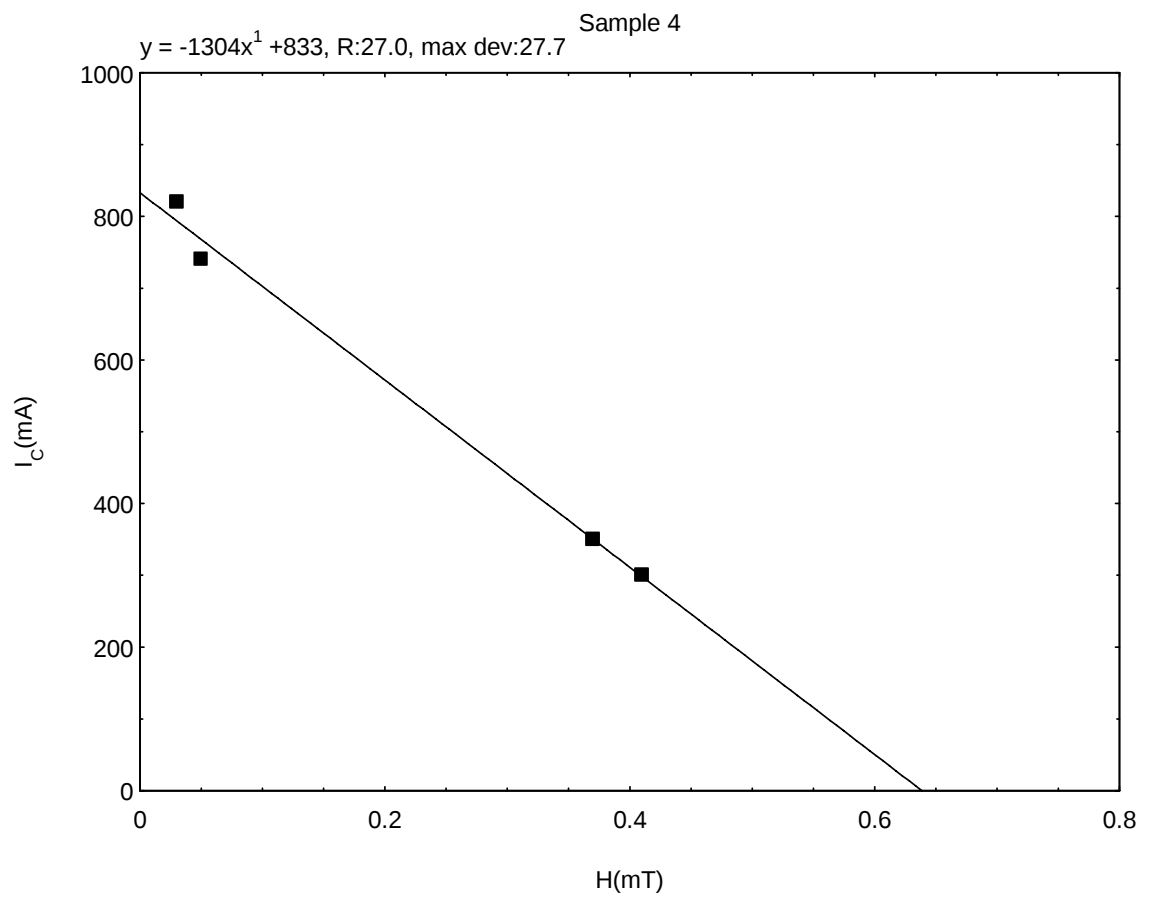
ภาพประกอบ 89 แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยิ่งยวดยิ่งหมาย
เลขที่ 1 และหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้เมื่อ $I_c=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.63 mT



ภาพประกอบ 90 แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยิ่งยวดหมายเลขที่ 2 และหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้เมื่อ $I_c=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.68 mT



ภาพประกอบ 91 แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยิ่งยวดหมายเลขที่ 3 และหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้เมื่อ $I_c=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.63 mT



ภาพประกอบ 92 แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่อกระแสวิกฤติที่มีต่อตัวนำยวดยิ่ง หมายเลขที่ 4 และหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้เมื่อ $I_c=0$ มีค่าสนามแม่เหล็กเป็น 0.64 mT

สรุปผลการทดลองของเครื่องมือที่สร้างขึ้น

จากตารางได้แสดงข้อมูลของกระแส I_c ที่ได้จากการพาดำเนินเมื่อค่าของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 77 K ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ 2 ของตัวนำยวดยิ่งและสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์ยังศาเคลวินสามารถหาได้จากสมการ

$$H_c(T) = H_c(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right) \quad \text{ตามลำดับ}$$

ตาราง 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลข

ตัวอย่างที่	$I_c(\text{mA})$ ที่ 77 K ที่ $H=0$	$H_c(\text{mT})$ ที่ 77 K	$H_c(\text{mT})$ ที่ 0 K
หมายเลขที่ 1	823	0.34	1.224
หมายเลขที่ 2	778	0.36	1.267
หมายเลขที่ 3	779	0.35	1.169
หมายเลขที่ 4	833	0.37	1.177

สรุปผลการทดลองจากเครื่องมืออื่น ๆ

จากการทดลองมีสาร 4 ตัวอย่าง โดยได้นำบางส่วนของสารตัวอย่างแต่ละตัวอย่างไปศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ซึ่งสารที่ใช้ทดลองในเครื่อง XRD จะมีลักษณะเป็นผงโดยหลังจากนั้นนำสารที่เหลือไปทำการศึกษาดูด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูลักษณะของพื้นผิวและดูความพรุนของเนื้อสารเมื่อทำการวัดด้วยเครื่อง SEM เสร็จแล้วสามารถทำการวัดปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในตัวนำยวดยิ่งด้วยเครื่อง EDS ได้ ซึ่งธาตุที่มีอยู่ในตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้จะมีปริมาณของธาตุ ยิทเทรียม (Y) แบเรียม (Ba) คอปเปอร์ (Cu) และออกซิเจน (O) ในปริมาณที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นนำสารที่มีลักษณะเป็นผงไปศึกษาลักษณะของผลึกด้วยเครื่อง TEM ซึ่งสามารถสรุปผลทดลองได้ดังตาราง

ตาราง 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากการวัดของเครื่องมืออื่นๆ ของตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลข

สารตัวอย่าง	โครงสร้าง	สูตรทางเคมี	ลักษณะของเนื้อสาร
หมายเลขที่ 1	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$	ผิวไม่แน่น มีผลึกขนาดเล็ก
หมายเลขที่ 2	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.94}$	ผิวไม่แน่น มีผลึกขนาดเล็ก
หมายเลขที่ 3	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.96}$	ผิวไม่แน่น มีผลึกขนาดเล็ก
หมายเลขที่ 4	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.98}$	ผิวไม่แน่น มีผลึกขนาดเล็ก

ตารางสรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัยของเครื่องมือที่สร้างขึ้นและเครื่องมืออื่นๆ โดยข้อมูลที่ได้ประกอบด้วย อุณหภูมิวิกฤต สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน กระแสวิกฤตโครงสร้างและสูตรทางเคมีของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

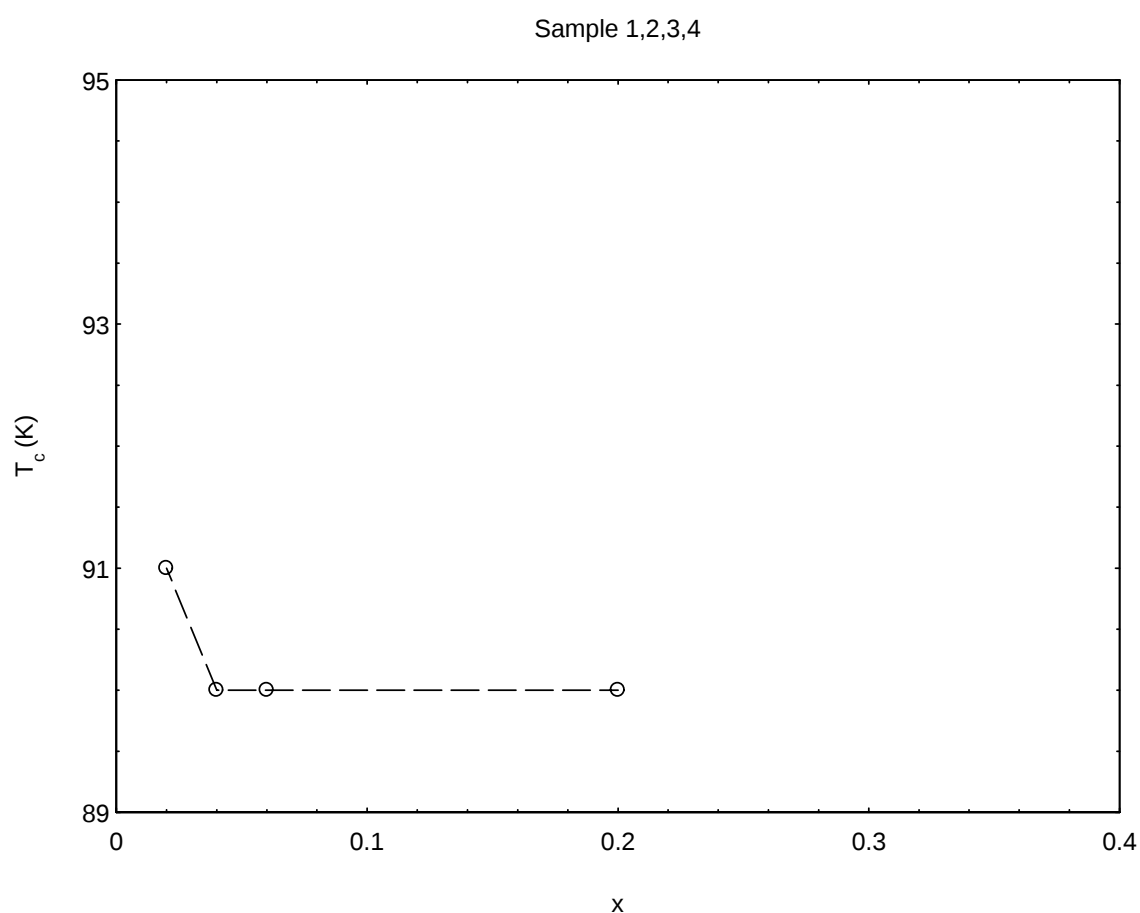
ตาราง 6 แสดงผลจากการวัดของเครื่องมือที่สร้างขึ้นและเครื่องมืออื่นๆของตัวนำยวดยิ่งแต่ละหมายเลข

สารตัวอย่าง	$T_c(K)$	$H_c(0)(mT)$	$I_c(mA)$	โครงสร้าง	สูตรทางเคมี
หมายเลขที่ 1	90	1.224	823	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$
หมายเลขที่ 2	90	1.267	778	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.94}$
หมายเลขที่ 3	90	1.169	779	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.96}$
หมายเลขที่ 4	91	1.177	833	ออร์โธรมบิก	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.98}$

จากการทดลองหาค่าของอิทธิพลของสภาวะแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่ง ดังกราฟ 89 90 91 92 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าสภาวะแม่เหล็กเข้าไปเพิ่มมากขึ้นค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในตัวนำยวดยิ่งจะมีค่าลดลง

ผลของออกซิเจนที่มีต่ออุณหภูมิวิกฤต

ในขั้นตอนของกระบวนการเผาได้มีกระบวนการเผาที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้องค์ประกอบของออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อสารมีปริมาณที่แตกต่างกันซึ่งได้การวัด XRD และอุณหภูมิวิกฤตได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น เมื่อ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ โดย x คือปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในตัวนำยวดยิ่ง มีรายละเอียดของออกซิเจนที่มีต่ออุณหภูมิวิกฤตดังนี้



ภาพประกอบ 93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนที่มีผลต่ออุณหภูมิวิกฤต

จากกราฟแสดงให้เห็นความแตกต่างของออกซิเจนที่มีอยู่ในตัวนำยวดยิ่งแต่ละตัว จะส่งผลต่ออุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งถ้าปริมาณของออกซิเจนมีความเหมาะสมแล้วก็จะให้อุณหภูมิวิกฤตสูงสุดด้วย

สรุปผลการทดลอง

1. สามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่งในกลุ่ม Y-Ba-CuO ขึ้นได้โดยใช้วิธี solid state reaction โดยมีสารตั้งต้นคือ ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) สารที่เตรียมได้ลักษณะแผ่นกลมสีดำ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร มีโครงสร้างแบบอโรทอมบิกและสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
2. สามารถวัดค่าอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งได้โดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตเป็น 0.34, 0.36, 0.35, 0.37 mT ตามลำดับของหมายเลขสารตัวอย่างและพบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นค่าของกระแสวิกฤตที่ได้มีค่าลดลง
3. สัดส่วนของออกซิเจนที่เหมาะสมจึงจะให้ค่าของอุณหภูมิวิกฤตที่สูงที่สุด

อภิปรายผล

1. จากผลการทดลองสามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y-Ba-CuO ได้ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสอดคล้องกับแบกเคิล (Buckel.1991:221) โดยมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ระหว่าง 88-95 เคลวิน และแม้ว่าจะมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สองต่ำกว่าที่รายงานไว้โดยคริสเตียนเซน (Christiansen.1999:2304-2307) ซึ่งวัดได้ 1.4 เทสลามาก อาจเป็นเนื่องจากมีคุณภาพของการเป็นตัวนำยวดยิ่งที่ต่ำกว่า
2. กราฟของแม่เหล็กวิกฤต ยังไม่ละเอียด ผู้ทำการทดลองจึงใช้วิธี fit curve เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องในเรื่องนี้และอุปกรณ์ในการวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตและสนามแม่เหล็กวิกฤตยังไม่ดีพอเช่น multimeter ยังไม่ค่าที่ละเอียด
3. อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเองสามารถหาวัสดุอุปกรณ์ในการวัดได้โดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการพื้นฐาน ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นชุดทดลองต้นแบบในระดับปริญญาตรีได้

ข้อเสนอแนะ

1. สารตัวอย่างเกิดการเสื่อมสภาพเร็วเกินไป อาจเนื่องมาจากการเก็บรักษาไม่ดี ทำให้เสื่อมสภาพเร็วอันเนื่องมาจากความชื้น ดังนั้นควรเคลือบผิวของสารเพื่อไม่ให้ถูกความชื้นแต่ถ้าเคลือบไม่ดีก็อาจจะมีปัญหาในการวัดความต้านทานได้
2. ขั้วในการวัดความต้านทานหลุดง่ายจากการทดลองได้ทำการทดลองเพียง 2-3 ครั้ง ขั้วก็หลุดแล้วดังนั้นจึงควรใช้การ Sputtering อาจจะได้ผลที่ดีกว่า
3. สารที่ได้มีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สองต่ำอาจเป็นเนื่องจากมีคุณภาพของการเป็นตัวนำยวดยิ่งที่ไม่ดีพอ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพจึงเป็นเรื่องที่ต้องศึกษาต่อไป

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ศรีกมล ดอกเข็มกลาง.(2547) อิทธิพลของอันตรกิริยาของอิเล็กตรอน-โฟนอน ต่อปรากฏการณ์
ไอโซโทปของตัวนำยวดยิ่งแมกนีเซียมไดโบไรด์ ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(ฟิลิกส์).กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ:ถ่ายเอกสาร.
- อาภาพงศ์ ชั่งจันทร์.(2548) สนามแม่เหล็กวิกฤตบนตัวนำยวดยิ่งแมกนีเซียมไดโบไรด์แบบสอง
แถบที่ขึ้นกับทิศทางโดยวิธีกินซ์เบิร์กแลนดาว ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(ฟิลิกส์).กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ:ถ่ายเอกสาร.
- Akimitsu,& Nagamatsu,J.(2001). Superconductivity at 39 K in magnesium diboride
,*Nature*.410:63.
- Bardeen, J ., Cooper,N.; Schrieffer,J.R. (1959). *Theory of Superconductivity*,
Physical Review.108(5) : 1175 - 1204
- Bednorz, J.G.; & Muller.K.A. (1986, April) *Possible High T_c Superconductivity in the
Ba-La-Cu-O System*. p : 189 –193.
- Bennemann, K.H. ; Ketterson, J.B. ; (2002). *The Physics of Superconductor*. New York :
Springer
- Buckel.W. (1991). *Superconductivity : Fundamental and Applications*. New York : VCH
Publiiher Inc.
- Buzea;& Yamashita.(2001). *Review of Superconducting property of MgB_2* . p :115-116
- Christiansen,(1999). *Pinning of Magnetic Flux Lines in Y-Ba-Cu-O Superconductors*.
p:2304-2307.
- Chu, C.W. ; et al. (1987, January). *Evidence for Superconductivity above 40k in the
La-Ba-Cu-O compound System*. New York 58(4). p : 405 - 410
- Colorado Futurescience. (1988,February). *Making High – Temperature Superconductors*.
- Deaver, B.S. ; & Fair bank., W.M. ; (1961, Jury).*Physical Review Letter*.7(2) :43-53
- Fetter, A.L. ; & Walecka, J.D.(1995). *Quantum Theory of Many – Particle
System*. .Singapore : Mc Grow-Hill
- Fox, N.John ; Rustad, A.Frederick ;& Smith, W.Roger. (1988, November). Measurement
of the transition temperature of a high T_c Superconductor. *American Journal of
Physics*. 56(11).p : 980 – 982.
- Inorganic Chemistry Laboratory. (2003). Preparation and Characterization of a
Perovskite -Based Complex Metal Oxide Superconductor, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.
Retrieved January, 15, 2006, from <http://www.uiowa.edu/~coo4153a/ybco-f04.pdf>

- Ketterson, J.B. ; & Buckel, A.H. (1999). : 2. ; Citting Meissner & Ochsenfeld.(1933). *Naturewissenschaften*. 21 : 787
- Ketterson, J.B. ; & Song, S.N. (2002) *Superconductivity*. Cambridge : University Press.
- Kittel, C. (1997). *Introduction to solid state Physics*. 7th edition; John Wiley & Sons.
- Kresin, V.Z. ; Wolf, V.Z. (1990). *Fundamental of Superconductor*. New York
- Materials Chemistry – Superconductors. (2006). *Preparation, Structure and Properties of high – Temperature Superconductor*. Retrieved February, 14, 2006, from stanwhit@binghamton.edu
- PHYWE. (2006, February). *Influence of current and B – field*.
- Rickayzen, G. (1999). *The Theory of Bardeen Cooper and Schrieffer in Superconductivity* V.1 Edited by Park, R.D p.51 – 61. New York
- Rossano, L.M. Leon. (1997, October). An inexpensive and easy experiment to measure the electrical resistance of high – T_c Superconductor as a function of temperature. *American Journal of Physics*. 65(10) : 1024 - 1026.
- Sacchetti, A. et al. (1993). *Nature*. 363 : 204
- Tsuei & Kirtley. (1996). *Scientific American*. p : 6
- Van dervoort, K.G. ; Willingham, J.M.; & Morris, C.H. (1995, August). Simple, inexpensive probe for resistivity measurements above 77 K on metals and Superconductors. *American of Physics*. 63(8). p : 759 – 760.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นาย วิฑิตพงศ์ เครือหงส์
วันเดือนปีเกิด	23 มิถุนายน 2522
สถานที่เกิด	อ.บ้านนาเดิม จ.สุราษฎร์ธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	287 หมู่ 2 ต.บ้านนา อ.บ้านนาเดิม จ.สุราษฎร์ธานี 84240
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2540	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี
พ.ศ.2545	วท.บ.(สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง
พ.ศ.2549	วท.ม.(สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บรรณานุกรม

- ศรีกมล ดอกเข็มกลาง.(2547) อิทธิพลของอันตรกิริยาของอิเล็กตรอน-โฟนอน ต่อปรากฏการณ์
ไอโซโทปของตัวนำยิ่งยวดแมกนีเซียมไดโบไรด์ ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(ฟิลิกส์).กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ:ถ่ายเอกสาร.
- อาภาพงศ์ ชั่งจันทร์.(2548) สนามแม่เหล็กวิกฤตบนตัวนำยิ่งยวดแมกนีเซียมไดโบไรด์แบบสอง
แถบที่ขึ้นกับทิศทางโดยวิธีกินซ์เบิร์กแลนดาว ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(ฟิลิกส์).กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ:ถ่ายเอกสาร.
- Akimitsu,& Nagamatsu,J.(2001). Superconductivity at 39 K in magnesium diboride
,*Nature*.410:63.
- Bardeen, J ., Cooper,N.; Schrieffer,J.R. (1959). *Theory of Superconductivity*,
Physical Review.108(5) : 1175 - 1204
- Bednorz, J.G.; & Muller.K.A. (1986, April) *Possible High T_c Superconductivity in the
Ba-La-Cu-O System*. p : 189 –193.
- Bennemann, K.H. ; Ketterson, J.B. ; (2002). *The Physics of Superconductor*. New York :
Springer
- Buckel.W. (1991). *Superconductivity : Fundamental and Applications*. New York : VCH
Publiiher Inc.
- Buzea;& Yamashita.(2001). *Review of Superconducting property of MgB_2* . p :115-116
- Christiansen,(1999). *Pinning of Magnetic Flux Lines in Y-Ba-Cu-O Superconductors*.
p:2304-2307.
- Chu, C.W. ; et al. (1987, January). *Evidence for Superconductivity above 40k in the
La-Ba-Cu-O compound System*. New York 58(4). p : 405 - 410
- Colorado Futurescience. (1988,February). *Making High – Temperature Superconductors*.
- Deaver, B.S. ; & Fair bank., W.M. ; (1961, Jury).*Physical Review Letter*.7(2) :43-53
- Fetter, A.L. ; & Walecka, J.D.(1995). *Quantum Theory of Many – Particle
System*. .Singapore : Mc Grow-Hill
- Fox, N.John ; Rustad, A.Frederick ;& Smith, W.Roger. (1988, November). Measurement
of the transition temperature of a high T_c Superconductor. *American Journal of
Physics*. 56(11).p : 980 – 982.
- Inorganic Chemistry Laboratory. (2003). Preparation and Characterization of a
Perovskite -Based Complex Metal Oxide Superconductor, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.
Retrieved January, 15, 2006, from <http://www.uiowa.edu/~coo4153a/ybco-f04.pdf>

- Ketterson, J.B. ; & Buckel, A.H. (1999). : 2. ; Citting Meissner & Ochsenfeld.(1933). *Naturewissenschaften*. 21 : 787
- Ketterson, J.B. ; & Song, S.N. (2002) *Superconductivity*. Cambridge : University Press.
- Kittel, C. (1997). *Introduction to solid state Physics*. 7th edition; John Wiley & Sons.
- Kresin, V.Z. ; Wolf, V.Z. (1990). *Fundamental of Superconductor*. New York
- Materials Chemistry – Superconductors. (2006). *Preparation, Structure and Properties of high – Temperature Superconductor*. Retrieved February, 14, 2006, from stanwhit@binghamton.edu
- PHYWE. (2006, February). *Influence of current and B – field*.
- Rickayzen, G. (1999). *The Theory of Bardeen Cooper and Schrieffer in Superconductivity* V.1 Edited by Park, R.D p.51 – 61. New York
- Rossano, L.M. Leon. (1997, October). An inexpensive and easy experiment to measure the electrical resistance of high – T_c Superconductor as a function of temperature. *American Journal of Physics*. 65(10) : 1024 - 1026.
- Sacchetti, A. et al. (1993). *Nature*. 363 : 204
- Tsuei & Kirtley. (1996). *Scientific American*. p : 6
- Van dervoort, K.G. ; Willingham, J.M.; & Morris, C.H. (1995, August). Simple, inexpensive probe for resistivity measurements above 77 K on metals and Superconductors. *American of Physics*. 63(8). p : 759 – 760.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นาย ฐิติพงศ์ เครือหงส์
วันเดือนปีเกิด	23 มิถุนายน 2522
สถานที่เกิด	อ.บ้านนาเดิม จ.สุราษฎร์ธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	287 หมู่ 2 ต.บ้านนา อ.บ้านนาเดิม จ.สุราษฎร์ธานี 84240
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2540	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี
พ.ศ.2545	วท.บ.(สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง
พ.ศ.2549	วท.ม.(สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ