

การพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

DEVELOPMENT OF $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ SUPERCONDUCTING
CERAMIC MATERIALS

รุ่งทิว ปิยนันท์จรัสศรี

RUNGTAWEE PIYANANJARATSRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดุษฎีบัณฑิตกฤตปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

DEVELOPMENT OF $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ SUPERCONDUCTING
CERAMIC MATERIALS



รุ่งทวี ปิยนันท์จรัสศรี

RUNGTAWEE PIYANANJARATSRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**DEVELOPMENT OF $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ SUPERCONDUCTING
CERAMIC MATERIALS**

RUNGTAWEE PIYANANJARATSRI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
นักศึกษา	นาย รุ่งทวี ปิยนันท์จรัสศรี
รหัสประจำตัว	47061210
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. วิสุทธิ์ จิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

จากการศึกษาถึงกระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สามารถสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีค่ากระแสวิกฤตสูงสุดได้ 2.5 A และระยะเวลาลอยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์สูงสุดที่ 1 mm ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยการผสม Y_2BaCuO_5 ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ตั้งแต่ 1:0 ถึง 1:0.4 โดยเพิ่ม Y_2BaCuO_5 ครั้งละ 0.1 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิ Calcination ตั้งแต่ 900 - 980°C และใช้อุณหภูมิ Sintering ที่ 940°C พบว่าที่อุณหภูมิ Calcination 940°C สามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตได้ถึง 5.76 A ที่อัตราส่วนผสม 1:0.1 ต่อมาได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ Calcination 940°C ซึ่งสามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตได้สูงสุด โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ Sintering ตั้งแต่ 900 - 980°C โดยผสมอัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ตั้งแต่ 1:0 ถึง 1:0.2 โดยเพิ่ม Y_2BaCuO_5 ครั้งละ 0.05 พบว่าที่อุณหภูมิ Sintering 940°C และอัตราส่วนผสม 1:0.1 สามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตได้สูงสุดที่ 5.76 A

และยังพบอีกว่าที่อัตราส่วนผสม 1:0.1 ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤตสูงสุด เท่ากับ 5.76 A จะมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤตสูงสุดที่ 32 G และ ค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่ 94 K ทั้งยังมีระยะเวลาลอยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์สูงสุดที่ 3 mm

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เพื่อใช้อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤต ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้อย่างสอดคล้อง

Thesis Title	Development of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Superconducting Ceramic Materials
Student	Mr. Rungtawee Piyananjaratsri
Student ID.	47061210
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronic Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

The process of standard fabrication of a superconductive ceramic material, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, is studied at Electronics Research Center, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The maximum of critical current is found to be 2.5 A and the distance floating of Meissner is 1 mm. This thesis presents the development of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting ceramic materials by mixing it with Y_2BaCuO_5 at different $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: Y_2BaCuO_5 (Y123 : Y211) ratios. The calcination temperatures are varied at 900°C , 920°C , 940°C , 960°C , and 980°C with a fixed sintering temperature at 940°C .

The data show that, for the composition $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: Y_2BaCuO_5 (Y123 : Y211) equals 1:0.1, calcination at 940°C can increase the value of critical current to 5.76 A. Then the calcination temperature is fixed at 940°C and the sintering temperatures are varied at 900°C , 920°C , 940°C , 960°C , and 980°C . The optimum condition that shows the maximum value of critical current is observed when the ratio of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: Y_2BaCuO_5 (Y123 : Y211) equals to 1:0.1 and the sintering temperature is 940°C .

The ratio of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: Y_2BaCuO_5 (Y123 : Y211) at 1:0.1 . The maximum value of critical current to 5.76 A and distance floating of Meissner Effect is about 3 mm.

This thesis also illustrates the macrostructure model of the superconductive ceramic, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, in order to clarify how the magnetic field from outside affects the values of critical current as observed in the experiment.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิตีรุ่งเรือง ในการให้ความรู้ แนวความคิดการแก้ไขปัญหาและสนับสนุนงานวิจัยนี้มาด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะเป็นอย่างสูงที่ทำให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์มาตลอด ขอขอบคุณ นายวิศิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรมและนายปิยนุตร ขวัญเมืองที่ให้คำแนะนำ ปรึกษา ตลอดจนการแก้ไขปัญหในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ อ.วิสันต์ ตั้งกิจเจริญ พี่น้อง และเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทุกท่านที่ทำให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบคุณ ทูงบประมาณเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมชาย คุณแม่วรภรณ์ และพี่น้องปียนันท์จรัสศรี ทุกคนที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีในทางด้านการศึกษามาโดยตลอด

รุ่งทิว ปียนันท์จรัสศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
ศัพท์เทคนิค.....	XIII
สัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ประวัติการค้นพบสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	1
1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ.....	3
1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c).....	3
1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c).....	3
1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c).....	4
1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	5
1.3.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect).....	5
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance).....	6
1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect).....	7
1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	7
1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก.....	7
1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2.....	8
1.6 ขอบเขตงานวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการทดลอง.....	11
2.1 บทนำ.....	11
2.2 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	11
2.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา.....	12
2.3 การวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	14
2.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	15
2.5 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	18
2.5.1 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาค.....	18
2.5.2 การนำแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน.....	19
2.5.2.1 การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยใช้ แบบจำลอง โครงสร้างมหภาค.....	19
2.5.2.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็ก โดยใช้แบบจำลอง โครง สร้างมหภาค.....	22
บทที่ 3 การทดลอง.....	29
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	29
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	30
3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnance and Temperature control).....	30
3.1.4 ชุดบัคกรี้อลตราโซนิก.....	31
3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	31
3.2 การเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	32
3.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	32
3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา.....	32
3.3 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	33
3.3.1 การทดลองผลของอุณหภูมิ Calcination ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	33
3.3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	33
3.3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา.....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1.3 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	36
3.3.2 การทดลองผลของอุณหภูมิ Calcination ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	37
3.4 การวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	40
3.4.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect).....	40
3.4.2 การวัดค่ากระแสวิกฤต.....	40
3.5 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	41
3.6 การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
4.1 ผลของอุณหภูมิ Calcination ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	45
4.2 ผลของอุณหภูมิ Sintering ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	49
4.3 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	53
4.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	54
4.5 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	55
4.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	54
4.5 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211).....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	57
5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	57
5.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อัตราส่วนผสม Y211 ต่างๆ.....	58
5.3 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาริบายโดยการให้สนามแม่เหล็ก ภายนอก.....	60
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด.....	29
4.1 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่อุณหภูมิ Calcination และอัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)	48
4.2 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่อุณหภูมิ Sintering และอัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)	52
4.3 แสดงระยะการลยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	54
4.4 แสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ต่างๆ.....	55
4.5 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ต่างๆ.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของนาย Heike Kamerlingh Onnes.....	2
1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส.....	4
1.3 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	6
1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน.....	6
1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	7
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2.....	9
2.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	13
2.2 ซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	14
2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	14
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	15
2.5 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก.....	16
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	16
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....	17
2.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	18
2.9 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	19
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต.....	20
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต.....	21
2.12 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำที่กระแสไบอัสเท่ากับหรือมากกว่ากระแสวิกฤต.....	23
2.13 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำที่กระแสไบอัสน้อยกว่ากระแสวิกฤต.....	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B=0$) ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต.....	25
2.15 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก $B1=4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต.....	26
2.16 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก $B2=5.5$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต.....	27
2.17 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก $B3=9.4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต.....	28
3.1 อุปกรณ์การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	30
3.2 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	30
3.3 ชุดบัคกรี้อัตราโซนิค.....	31
3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	31
3.5 กระบวนการเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123).....	33
3.6 กระบวนการเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y_2BaCuO_5 (Y123) ที่อุณหภูมิ Calcination ต่างๆ ($900^{\circ}C$, $920^{\circ}C$, $940^{\circ}C$, $960^{\circ}C$, $980^{\circ}C$).....	35
3.7 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	36
3.8 กระบวนการเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y_2BaCuO_5 (Y123) ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ ($900^{\circ}C$, $920^{\circ}C$, $940^{\circ}C$, $960^{\circ}C$, $980^{\circ}C$).....	37
3.9 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	40
3.10 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	41
3.11 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	41
3.12 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ.....	42
3.13 วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	43
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination $900^{\circ}C$	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination 920°C.....	45
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination 940°C.....	46
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination 960°C.....	46
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination 980°C.....	47
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination ต่างๆ.....	47
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 900°C.....	49
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 920°C.....	49
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 940°C.....	50
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 960°C.....	50
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 980°C.....	51
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ.....	51
4.13 ปรัชการณัไมส์เนอร้ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) 1:0 , 1:0.1 , 1:0.2 , 1:0.3.....	53
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตกับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....	54
5.1 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อัตราส่วน Y123 : Y211 อุณหภูมิ Calcination และ Sintering 940 ^o C.....	58
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตกับสนามแม่เหล็กภายนอก.....	60
5.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อัตราส่วน Y123 : Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination 940 ^o C และ Sintering 900 ^o C เมื่อให้สนามแม่เหล็ก ภายนอก.....	61

ศัพท์เทคนิค

กระแส	Current
กระแสไบอัส	Biasing Current
กระแสวิกฤต	Critical Current
เกาส์	Gauss
ความต้านทาน	Resistance
ความหนาแน่นกระแสวิกฤต	Critical Current Density
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต	Critical Magnetic Flux Density
คอปเปอร์ออกไซด์	Copper Oxide
เครื่องบันทึก 2 แกน	X-Y Recorder
จุดคอด	Weak Point
จุด pinning	Pinning Point
เซลเซียส	Celsius
ตัวนำไฟฟ้า	Conductor
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
เตาเผา	Furnace
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	Macrostructure Model
ปรากฏการณ์ซิลสบี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์โจเซฟสัน	Josephson Effect
ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	Meissner Effect
ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	Zero Resistance
แม่เหล็ก	Magnetic
แรงดัน	Voltage
สถานะนำไฟฟ้าปกติ	Normal State
สถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconducting State
สภาพการนำไฟฟ้า	Conductance
สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductivity
สภาพต้านทาน	Receptivity
สภาพไร้ความต้านทาน	Zero Resistance

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	Magnetic Field
สนามแม่เหล็กวิกฤต	Critical Field
แหล่งกำเนิดกระแส	Current Source
แหล่งกำเนิดแรงดัน	Voltage Source
อิตเทรียมออกไซด์	Yttrium Oxide
อุณหภูมิวิกฤต	Critical Temperature

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	Wbm^{-2}
B_c	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต	Wbm^{-2}
B_{ext}	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก	Wbm^{-2}
C	ความจุไฟฟ้า	F
H_c	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Wb
H	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	Wb
H_c	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Wb
H_0	สนามแม่เหล็กที่ศูนย์เคลวิน	Wb
I	กระแส	A
I_c	กระแสวิกฤต	A
J_c	ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต	Acm^{-2}
M	ความเข้มข้นของแมกเนไตเซชัน	Wbm^{-2}
R	ความต้านทาน	Ω
T_c	อุณหภูมิวิกฤต	K
χ	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	-
μ	ความซึมซาบได้	-
μ_0	ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ	Hm^{-1}
μ_r	ความซึมซาบได้สัมพัทธ์	-
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า	$\Omega\text{-m}$
σ	สภาพนำไฟฟ้า	$\Omega^{-1}\text{-m}^{-1}$

บทที่ 1

บทนำ

วันที่ 18 มีนาคม ค.ศ.1987 ณ ห้องจัดตั้งบอลรูม โรงแรมนิวยอร์กฮิลตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา นักฟิสิกส์ นักข่าว และผู้สนใจงานด้านฟิสิกส์ จำนวนมากถึง 3,800 คน ได้ไปเข้าร่วมประชุมงานสมาคมนักฟิสิกส์อเมริกัน ในสาขาคอนเดนสแมตเตอร์ฟิสิกส์ เป็นเรื่องที่ตื่นเต้นที่สุดในรอบหลายทศวรรษที่ผ่านมา นั่นคือ การรายงานผลการค้นพบ "ซูเปอร์คอนดักเตอร์ อุณหภูมิสูง" (High - temperature superconductor)

นับแต่นั้นมา ข่าวคราวเกี่ยวกับเรื่อง "ซูเปอร์คอนดักเตอร์" หรือ ที่คนไทย เรียกกันว่า "ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด" นั้นเป็นที่เกรียวกราวกันมากทั่วโลก และในขณะนี้ ก็กำลังมีการแข่งขันกันอย่างมาก เพื่อช่วงชิงตลาดผลิตภัณฑ์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่ว่าจะเป็น สหรัฐ, ญี่ปุ่น หรือ จีน

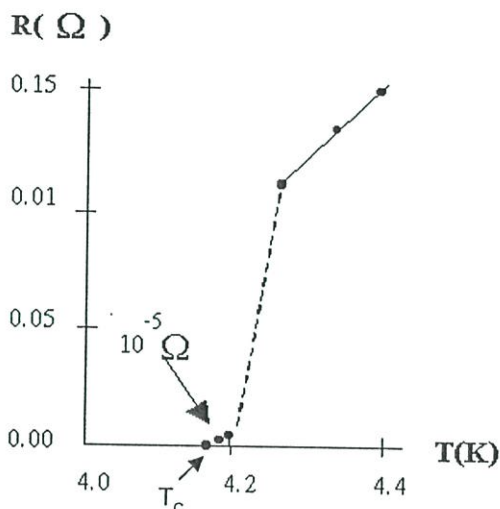
เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกำลังจะเข้ามามีบทบาทในวงการไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น เพราะเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่ง ได้ประสบความสำเร็จในการทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใช้งานได้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งนั่นหมายความว่า จะช่วยลดต้นทุนในการใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้และทำให้แพร่หลายมากขึ้นรวมทั้งคุ้มกับการทำเพื่อการค้า

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น แต่ก่อนรู้จักกันในสภาพของสารตัวนำจำพวกโลหะ ซึ่งจะปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยไม่สูญเสียความร้อน และไม่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ก็เฉพาะเมื่อสารตัวนำนั้นอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำมากๆ ชนิดที่เรียกว่า ดิจลบ 273 องศาเซลเซียส หรือลบ 460 องศาฟาเรนไฮต์ หรือที่เรียกกันว่า ศูนย์องศาสัมบูรณ์หรือศูนย์องศาเคลวิน ซึ่งถือกันว่าเป็นอุณหภูมิที่ปราศจากความร้อนโดยสิ้นเชิง

เมื่อสารตัวนำโลหะ อยู่ในสภาพแข็งที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์นี้ มันจะสูญเสียความต้านทานทางไฟฟ้าทั้งหมด และเกิดปรากฏการณ์ "ซูเปอร์คอนดักติวิตี" หรือ "การนำไฟฟ้ายิ่งยวด" ซึ่งในสภาพการนำไฟฟ้าดังกล่าวนี้ สามารถนำไฟฟ้าโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งนั่นหมายถึงว่า หากนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปทำสายไฟฟ้าแทนลวดทองแดง ก็จะนำไฟฟ้าได้ดีโดยไม่ต้องมีหม้อแปลงไฟฟ้าช่วยเลย หรือถ้านำไป พันมอเตอร์ ก็จะได้มอเตอร์ขนาดเล็กกว่าที่ใช้ในปัจจุบันนี้อย่างมากทีเดียวหรือพูดง่าย ๆ ก็คือตัวนำชนิดนี้ สามารถปฏิบัติโลกอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบันไปทั้งหมดได้เลย

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1911 [1] โดยนาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท (mercury, Hg) ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c)



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

หลังจากนั้นก็ยังมีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาสนใจและทำการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 เคลวิน จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) และในปี ค.ศ. 1969 สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นเป็น 20 เคลวิน และสามารถใส่ไฮโดรเจนเหลว (จุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) ทำเป็นตัวหล่อเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้สำเร็จเป็นครั้งแรก

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองสารสตรอนเชียม (Sr) ปรากฏว่า อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงถึง 54 เคลวิน จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. ได้ทำการทดลองกับธาตุอิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95 เคลวิน ซึ่งสร้างความตื่นเต้นแ่งวงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถที่จะใส่ไนโตรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นาย C.W. Chu ทดลอง) เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งไนโตรเจนเหลวนี้มีราคาถูกมากและสามารถจัดเตรียมได้ง่าย

กว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่ม อิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) เรามักเรียกดาวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าหมายไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับ ค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องมีค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพความนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{3}{4} T_c$ นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น [1] ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า T_c เข้าใกล้ 100 K อย่างเช่น ชิ้นสารที่ใช้มีค่า $T_c \approx 95$ K ก็สามารถนำมาใช้งานได้

ถ้าเราต้องการนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ชิ้นสารนั้นต้องมีอุณหภูมิ T_c มากกว่า 400 K อันเป็นสิ่งที่วงการทางวิทยาศาสตร์ต้องการและกำลังวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิรูปเทคโนโลยีอย่างแท้จริงต่อไป

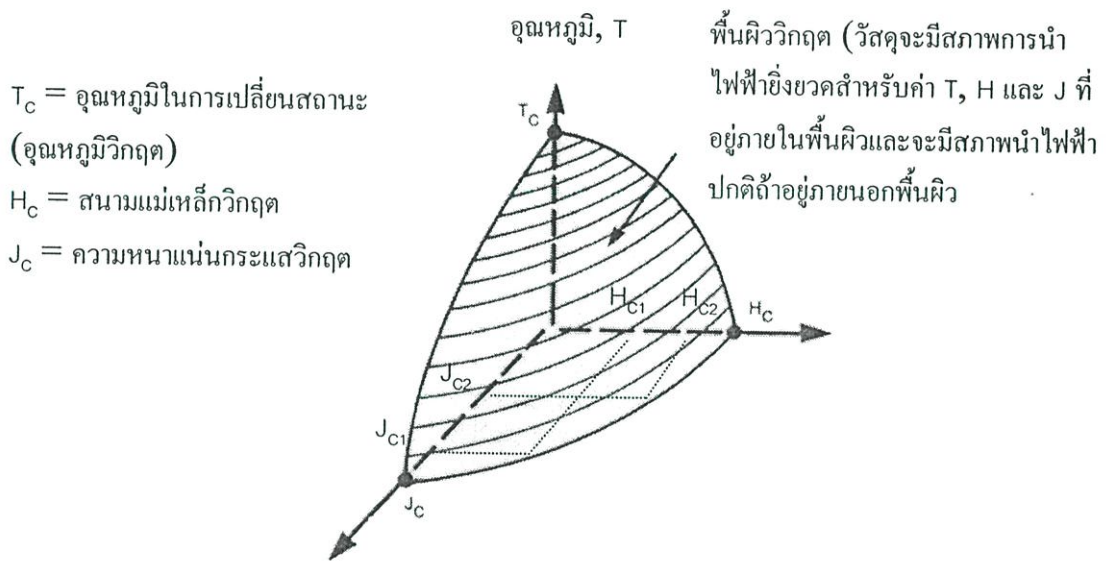
1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field : H_c) หรือสามารถวัดได้ในรูปของ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Flux density : B_c)

1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)

ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเป็นปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารนั้นเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสาร หรือมีความต้านทานเกิดขึ้น เราจะเรียกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical Current: I_c)

โดยทั่วไปการพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น มักพิจารณาในรูปของความหนาแน่นวิกฤต (Critical Current Density; J_c) ซึ่งความหนาแน่นกระแสวิกฤต คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤตกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.2 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไปอัสให้กับชิ้นสาร โดยมีปริมาณความหนาแน่นกระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต J_c เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเป็น H_{c1} ค่า J_c จะมีขนาดลดลงเป็น J_{c1} และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น H_{c2} ค่า J_c ก็จะลดลงเหลือ J_{c2} ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายมากขึ้น เป็นผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปรากฏการณ์สำคัญที่แสดงถึงสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของวัสดุหรือสารต่างๆ ได้แก่ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance) และ ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee Effect)

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กกล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (Diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77 K

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.1)$$

โดยที่ $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ (1.2)

$$\mu_r = (1 + \chi_m) \quad (1.3)$$

โดยที่ B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

M คือ สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)

χ_m คือ สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

μ_0 คือ ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)

μ_r คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

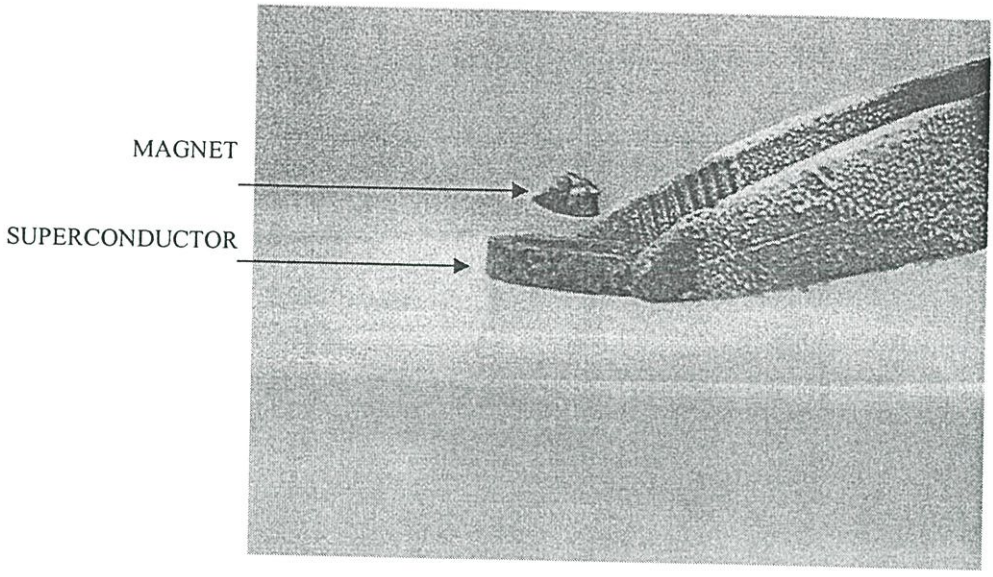
เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้ $B = 0$

ทำให้

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (1.4)$$

$$\chi_m = -1 \quad (1.5)$$

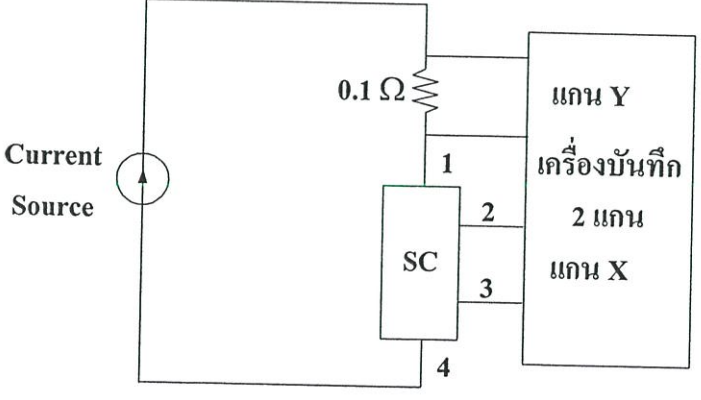
$$\mu_r = 0 \quad (1.6)$$



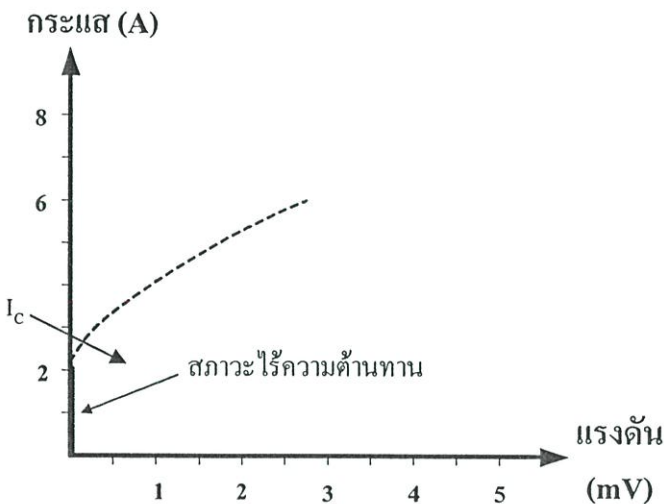
รูปที่ 1.3 ปราบกฎการลอยแม่เหล็ก

1.3.2 ปราบกฎการไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อวางอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ชิ้นสารนั้นจะมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น นั่นคือความต้านทานภายในชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชิ้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชิ้นสารได้ถูกแช่อยู่ภายในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตเห็นว่ากราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน y นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วขั้วนำไฟฟ้ายาวจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2 \text{ A.}$) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมขั้วขั้วหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วขั้วเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั้นแสดงว่าสภาวะนำไฟฟ้ายาวได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายาว

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายาวด้วยสนามแม่เหล็ก

การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายาววิธีหนึ่ง คือการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) และอีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับขั้วขั้วจนกระทั่งมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต $H_c(T)$ ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิจะสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายาวได้ ที่อุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ $H_c(T_c) = 0$ สนามแม่เหล็กและอุณหภูมิวิกฤตมีความสัมพันธ์กันดังนี้

เมื่อ	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a = 0$	เป็นสภาวะนำไฟฟ้ายาว
	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_c > H_a > 0$	เป็นสภาวะนำไฟฟ้ายาว
	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a > H_c$	เสียสภาพนำไฟฟ้ายาว

จะเห็นได้ว่าในขณะที่ $T = T_C$ เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งได้ ($T = T_C$ ได้ $H_C = 0$) แต่ถ้า $T \ll T_C$ ต้องใช้สนามแม่เหล็กค่ามากๆ จึงจะทำลายได้ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

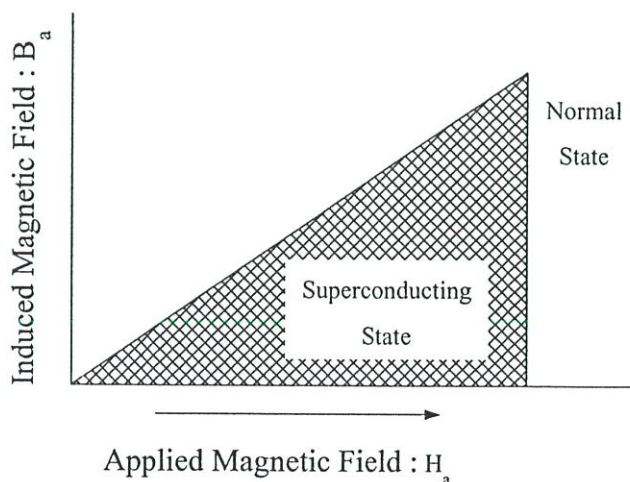
$$H_C(T) = H_C(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

เมื่อ $H_C(T) =$ สนามแม่เหล็กวิกฤต
 $H_C(0) =$ สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

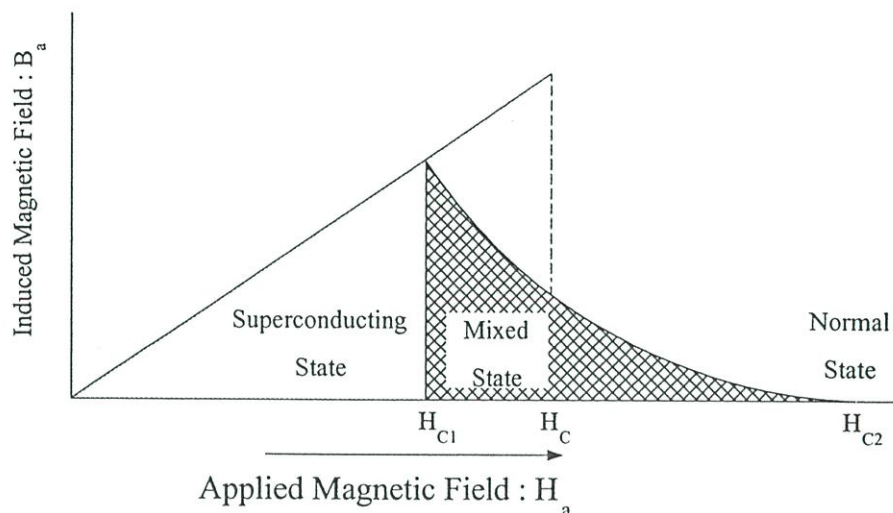
1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั่นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำทำให้เกิด Magnetization ขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{M} = -\vec{H}_a$) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมสเนอร์ และมีคุณสมบัติเป็น ไดอะแมกเนติกที่สมบูรณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวก โลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) กาโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอัลลอย เช่น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$, $HgBa_2CuO_4$ เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กับประเภทที่ 2 อยู่ที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมสเนอร์นั่นเอง



ก) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1



ข) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2

พิจารณารูปที่ 1.6 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (H_a) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วค่า Magnetization (M) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_C) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสถานะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก H_{C1} หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วนแต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า H_{C2} สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

1.6 ขอบเขตงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงการพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยการผสม Y_2BaCuO_5 ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ต่างๆ รวมถึงการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท แก่โครงของแต่ละบทกล่าวโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันได้แก่ กระบวนการสร้างพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ รวมถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ที่สามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 3 เป็นการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการสร้างที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ต่างๆ รวมถึงอุณหภูมิการเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้าง รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และการวัดอุณหภูมิวิกฤต

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ได้นำเสนอมาอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการทดลองในบทที่ 3 รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและวิจารณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductor: LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor: HTSC) กันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเส้นลวด เส้นเทป พิล์มหนาและฟิล์มบาง เป็นต้น ซึ่งให้ค่า J_c ก่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง $10^3 - 10^7$ A/cm² ทำให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานทางด้านไฟฟ้ากำลัง และด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างยิ่ง

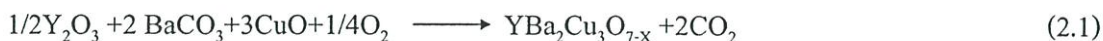
ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y:Ba:Cu = 1:2:3) แบบเซรามิก ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก

2.2 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ [4]

2.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

สำหรับธาตุที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วย อิทเทรียม แบเรียม และทองแดง ธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบ ดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันโดยใช้อัตราส่วนโดยอะตอม Y: Ba: Cu เป็น 1: 2: 3 อัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุด

ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้



จากตารางธาตุจะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้ Y = 88.905 กรัม, Ba = 137.34 กรัม
Cu = 63.546 กรัม, C = 12.011 กรัม, O = 15.99 กรัม

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

$$Y_2O_3 = (2 \times 88.905) + (3 \times 15.99) = 225.807 \text{ กรัม/โมล}$$

$$BaCO_3 = 137.34 + 12.011 + (3 \times 15.99) = 197.348 \text{ กรัม/โมล}$$

$$CuO = 63.546 + 15.99 = 79.545 \text{ กรัม/โมล}$$

การคำนวณจากสมการเคมี

$$1) Y_2O_3 \quad 1 \text{ โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 225.807 \text{ กรัม}$$

$$\text{ถ้า} \quad \frac{1}{2} \text{ โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 112.9035 \text{ กรัม}$$

$$2) BaCO_3 \quad 1 \text{ โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 197.348 \text{ กรัม}$$

$$\text{ถ้า} \quad 2 \text{ โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 394.696 \text{ กรัม}$$

$$3) CuO \quad 1 \text{ โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 79.545 \text{ กรัม}$$

$$\text{ถ้า} \quad 3 \text{ โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 238.635 \text{ กรัม}$$

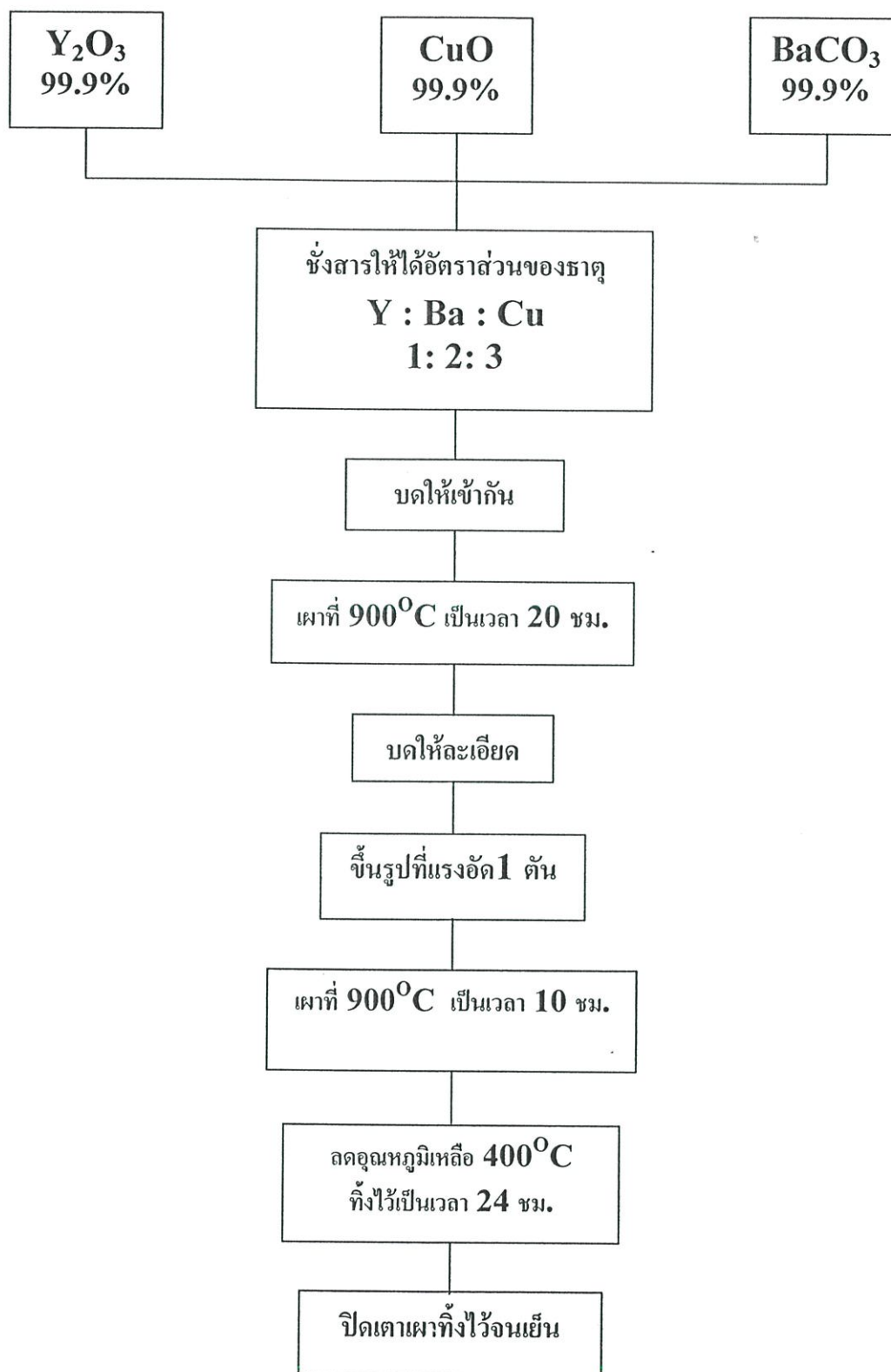
$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งหมด} &= 112.9035 + 394.696 + 238.635 \\ &= 746.2345 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร $YBa_2Cu_3O_{7-x} = 746.2345 \text{ กรัม}$

ปริมาณ x หมายถึง ปริมาณของออกซิเจนที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายค่าตามแต่การเกิดปฏิกิริยาเคมีจากสารตั้งต้นทั้งหมด 746.2345 กรัม ถ้าต้องการ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้อิทธิเตรียมออกไซด์ 1.513 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 5.289 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 3.198 กรัม

2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

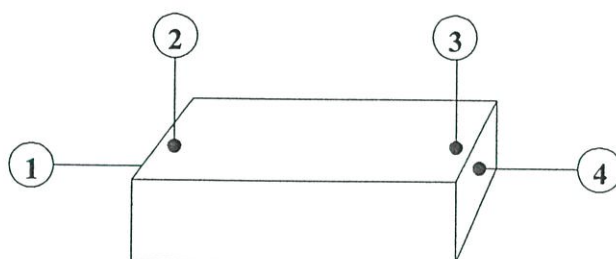
1. ชั่งสารประกอบ ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Y : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ด้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ (อุณหภูมิ Calcination) ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้มาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตัน ให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ (อุณหภูมิ Sintering) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ $400^\circ C$ อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา
8. นำเม็ดสารตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์และวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีและมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ



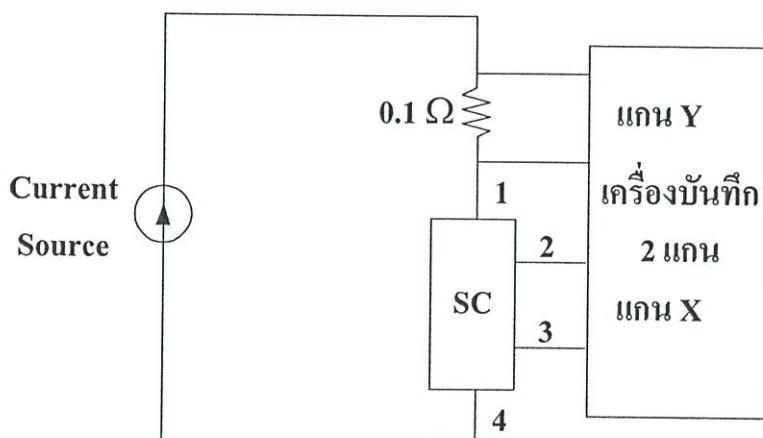
รูปที่ 2.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

2.3 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

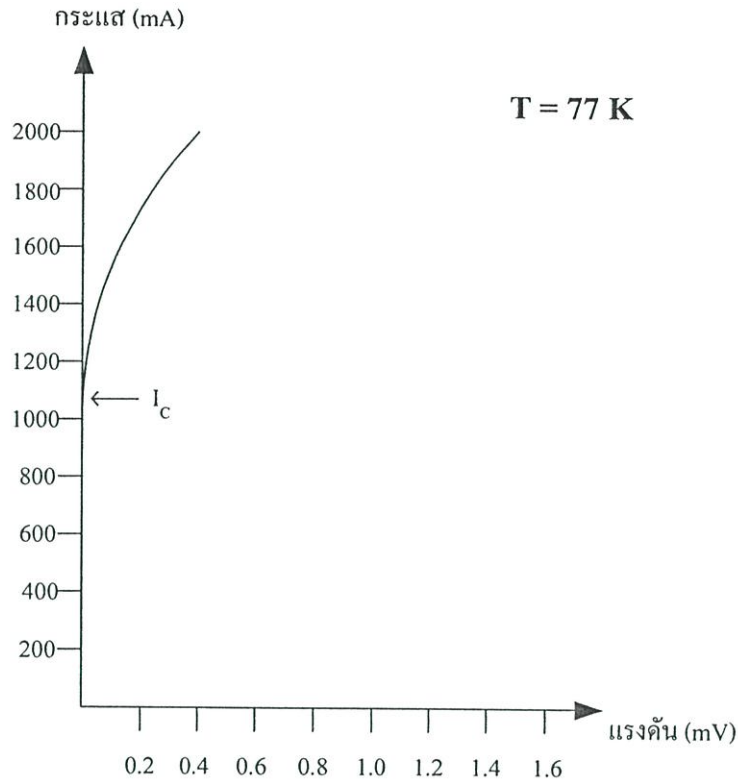
หลังจากที่ได้มีคาส์ตัวนำไฟฟ้าที่ยังขูดจากกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว นำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรง ดังรูป 2.2 จากนั้นนำชิ้นสารไปทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 โดยที่กระแสจะไหลเข้า - ออก จากชิ้นสารที่ขั้ว 1 และ 4 ตามลำดับ และวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 2 และ 3 ในขณะที่ทำการทดลอง ชิ้นสารจะแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกบันทึกลงในเครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังขูดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

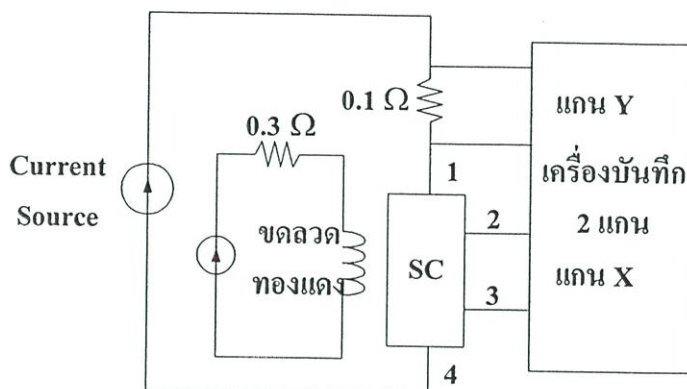
ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 1.08 A ดังนั้นถ้าป้อนกระแสเกินกว่า 1.08 A ชิ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเกิดขึ้น

2.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

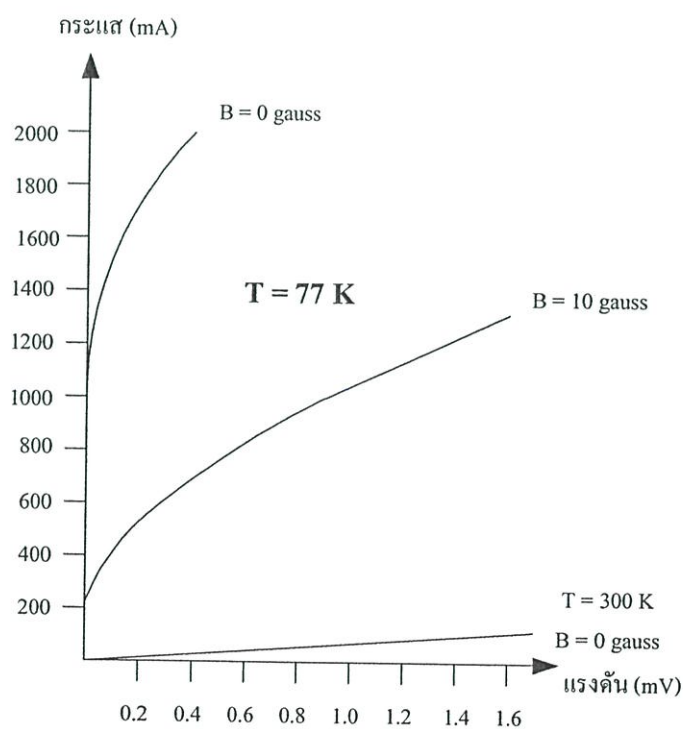
จากการสังเกตปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect) ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในขณะที่ชิ้นสารกำลังเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสาเหตุที่ทำให้ชิ้นสารเสียสภาพนั้นเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชิ้นสาร เป็นตัวเข้าไปทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้ชิ้นสารเสียสภาพไป จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น ซึ่งในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราจะใช้วงจรดังรูป 2.5 โดยแสดงผลการทดลองลงบนเครื่องบันทึกสองแกน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า ขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวต้านทานทั่วไป แต่เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิ 77 K ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้ประมาณ

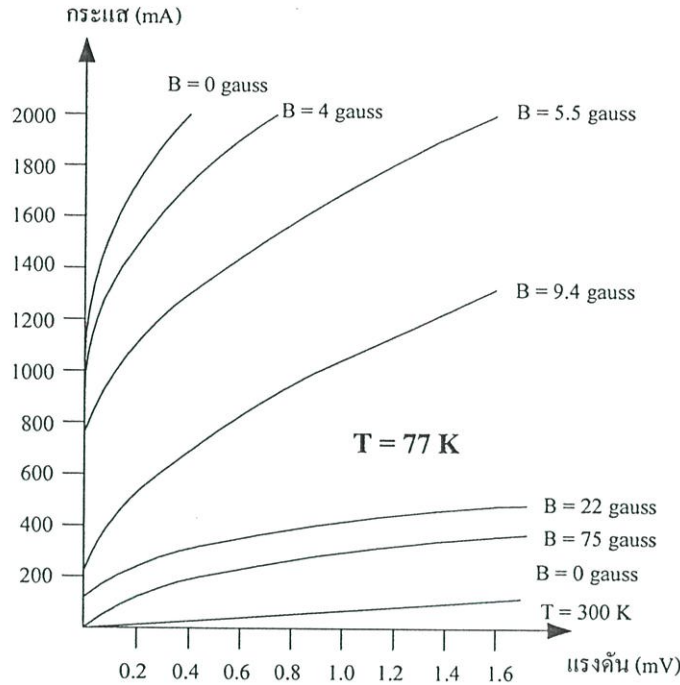
1.08 แอมแปร์ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามา 10 gauss จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเหลือประมาณ 200 มิลลิแอมป์



รูปที่ 2.5 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

และเมื่อพิจารณาคูสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้นเดิมที่อุณหภูมิ 77 K โดยให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกันและผลที่ได้แสดงดังรูป 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าลดลง

เราสามารถสรุปถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดังนี้ พิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าชั้นสารที่อยู่ในอุณหภูมิ 300 K นั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่จะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าต่ำๆเท่านั้น แต่เมื่อชั้นสารอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T_c = 92$ K) อย่างเช่นที่อุณหภูมิ 77 K ชั้นสารจะแสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในขณะที่ทำการป้อนกระแสให้กับชั้นสารต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (ต่ำกว่า 1.08 แอมป์แปร์) จะไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารเกิดขึ้น แต่เมื่อป้อนกระแสสูงกว่ากระแสวิกฤต (สูงกว่า 1.08 แอมป์แปร์) ชั้นสารจะเสียดสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้น ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชั้นสารเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนไป ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นจึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชั้นสาร

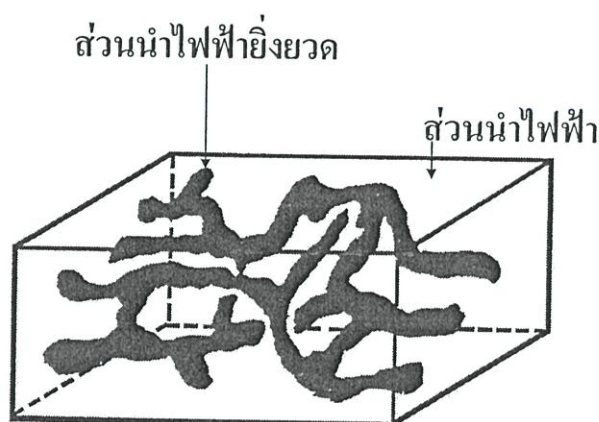
จากแนวความคิดที่ว่าสนามแม่เหล็กเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถยืนยันได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชั้นสาร ซึ่งจะเห็นได้จากผลการ

ทดลองในรูปที่ 2.7 เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้นปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าลดลงตามลำดับ

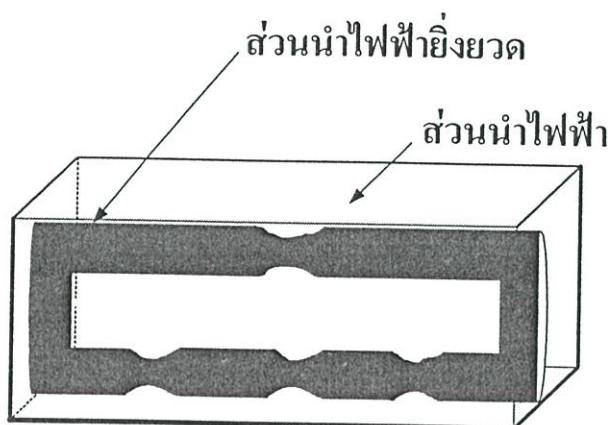
2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก [5]

2.5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเนื้อสารเป็นแบบเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ซึ่งจากสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแสดงด้วยส่วนที่เป็นสีดำ โดยอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งเราพิจารณาว่าเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้แสดงในส่วนที่ไม่เป็นสีดำ ดังนั้นการที่ชิ้นสารจะสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น ในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องเชื่อมต่อกันอยู่ และจากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการเชื่อมต่อที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและการเชื่อมต่อแบบหลวมๆ หรือที่เรียกว่า จุดคอด และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างมหภาค จึงพิจารณาในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่าย โดยการนำเอาส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใน



รูปที่ 2.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O



รูปที่ 2.9 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

รูปที่ 2.8 มาแทนด้วยท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อกัน สำหรับท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเห็นว่ามียุคคอคเกิดขึ้น 1 จุด ที่บริเวณกลางท่อตัวนำด้านบนและจุดคอคอีก 3 จุดจะอยู่ในส่วนของท่อตัวนำด้านล่าง สำหรับจุดคอคที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.9 นั้นมีอยู่จริงในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพราะในขณะที่ทำการอัดเม็ดสาร เนื้อสารจะอัดตัวชิดติดกัน และเมื่อนำเม็ดสารไปทำการเผาก็จะทำให้เนื้อสารนั้นหลอมตัวชิดติดกันมากยิ่งขึ้นและกลายเป็นโครงสร้างของเซรามิกขึ้น แต่ก็ยังพบว่ามีบางจุดที่เนื้อสารยังไม่หลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดเป็นจุดคอคขึ้นมา

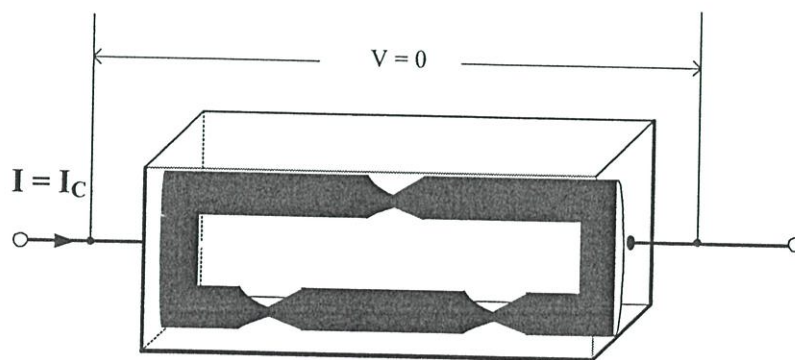
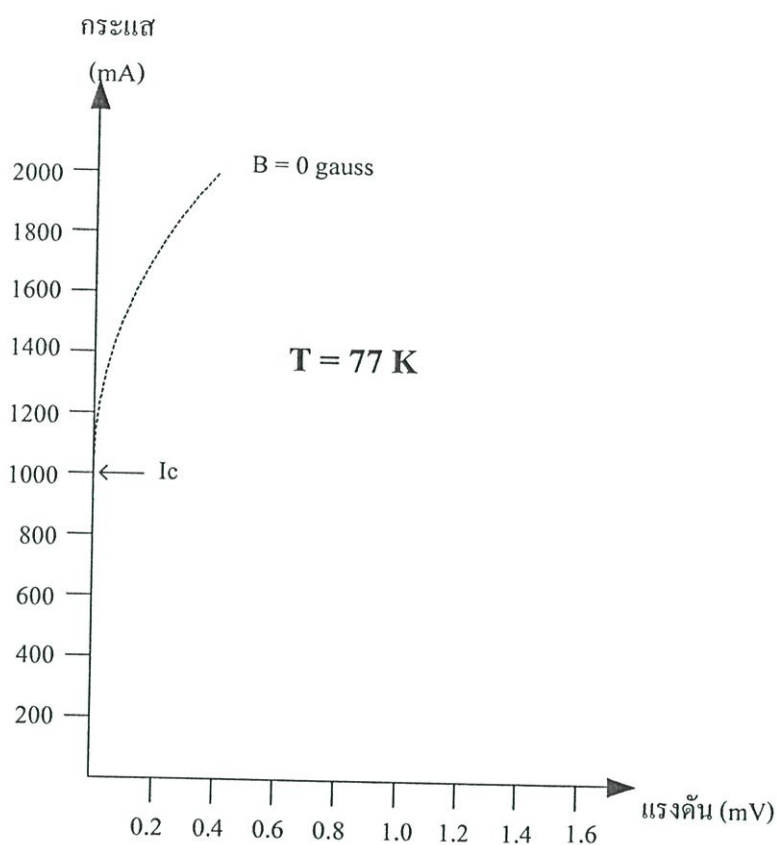
จากแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายในรูปที่ 2.9 พิจารณาได้ว่า ในขณะที่ชิ้นสารยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเชื่อมต่อกันอยู่ แต่ถ้าชิ้นสารเกิดการเสียดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น ในส่วนของท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะขาดออกจากกัน ซึ่งส่วนของท่อตัวนำบริเวณที่ขาดก่อนก็คือส่วนของจุดคอค และในหัวข้อต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Y - Ba - Cu - O$

2.5.2 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก

2.5.2.1 การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

จากผลการทดลองในรูปที่ 2.4 สามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.10 จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชิ้นสารน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแส

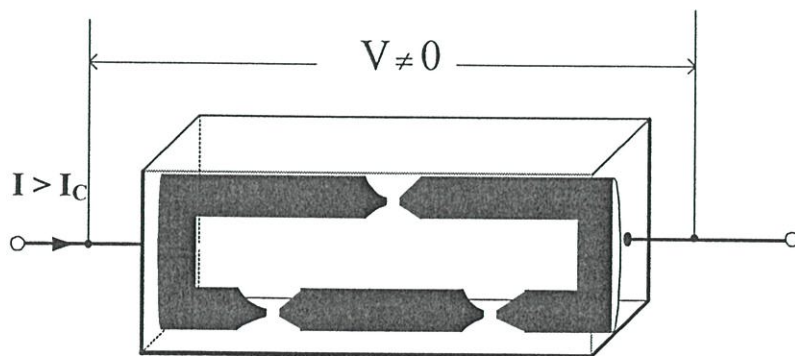
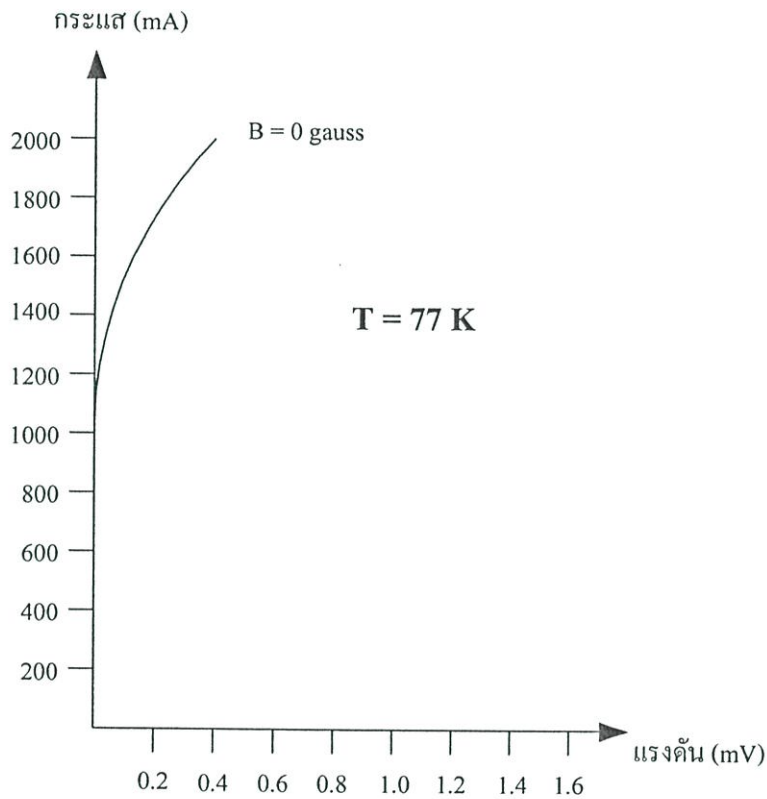
วิกฤต (I_C) ซึ่งพบว่าในขณะที่ชั้นสารยังอยู่ในสภานำไฟฟ้ายิ่งยวด จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่าที่นำไฟฟ้ายิ่งยวดจะยังคงเชื่อมต่อกันอยู่ความต้านทานในชั้นสารจึงไม่เกิดขึ้นทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารในขณะนี้



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

พิจารณารูปที่ 2.11 เป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชั้นสารมากกว่าค่ากระแสวิกฤต (I_C)

ซึ่งในขณะนี้ชั้นสารได้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปแล้ว จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่า ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่เป็นจุดคอดจะขาดออกจากกัน จึงมีความต้านทานเกิดขึ้นภายในชั้นสารทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้นและจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแสสูงขึ้น

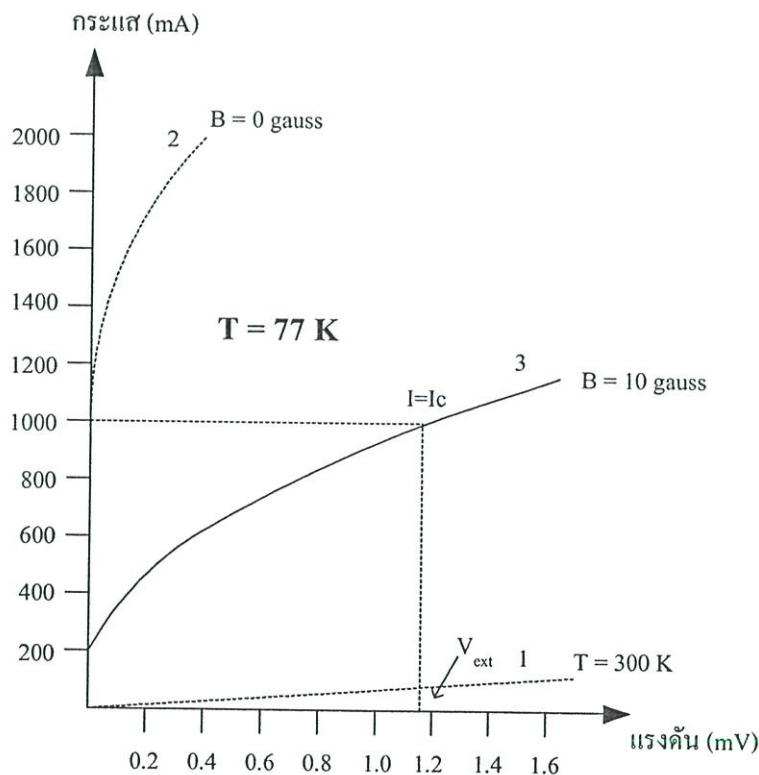


รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต

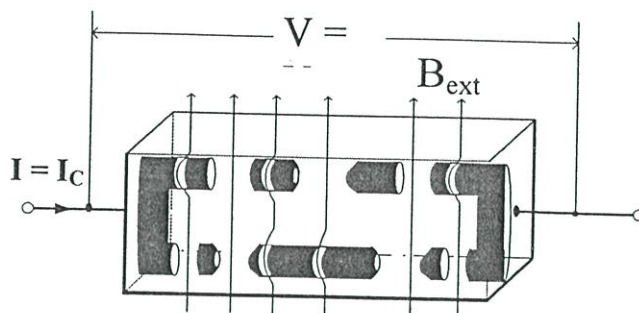
2.5.2.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ให้กับฉนวนสาร

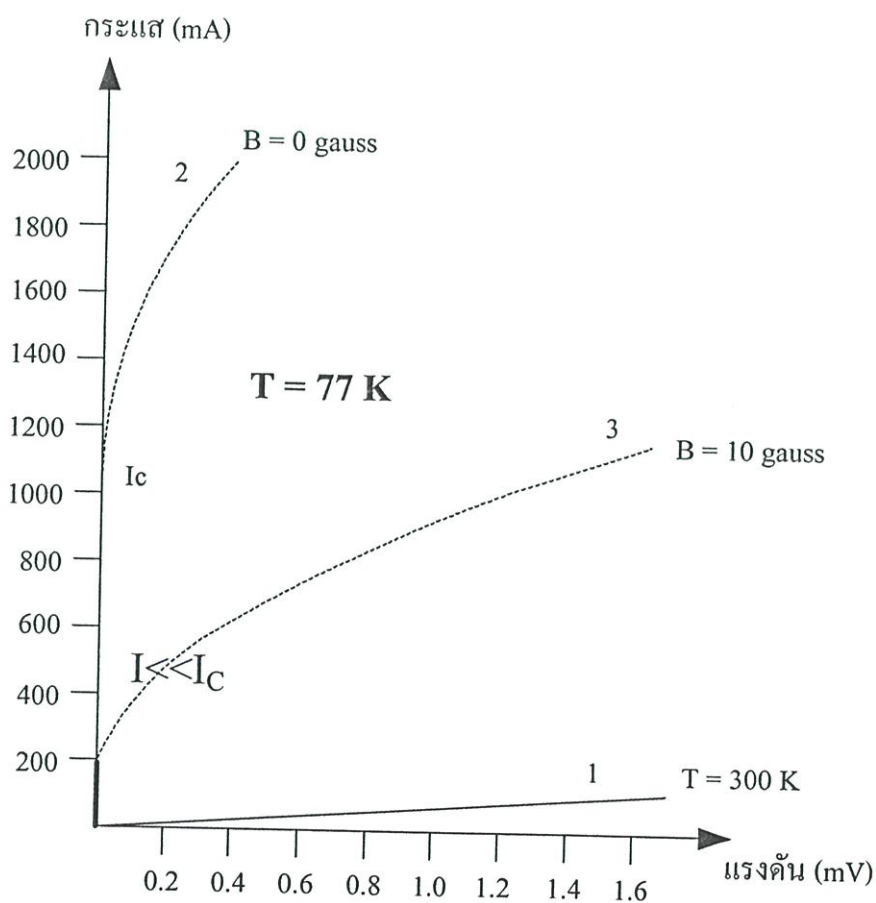
จากหัวข้อ 2.5.2.1 ได้อธิบายเกี่ยวกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเส้นที่ 2 ของรูปที่ 2.12 ไปแล้ว ต่อไปจะเป็นการพิจารณากราฟเส้นที่ 3 ของรูป 2.12 ซึ่งเป็นผลการทดลองในหัวข้อ 2.4.1 ดังนี้ เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ (10G) ให้กับฉนวนสารในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ภายในฉนวนสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนจะถูกทำลาย โดยเฉพาะส่วนที่เป็นจุดคอดและส่วนที่ไม่สมบูรณ์จะขาดออกและเกิดแรงดันตกคร่อมฉนวนสารขึ้น (V_{ext}) แต่อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฉนวนสารอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กภายนอก จะไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมฉนวนสาร ($V=0$) ถ้ากระแสที่เราป้อนให้กับฉนวนสารมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสวิกฤต (I_c) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 2.13 และจากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ฉนวนสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้นได้ ก็โดยการป้อนสนามแม่เหล็กให้กับฉนวนสารเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 – 2.17



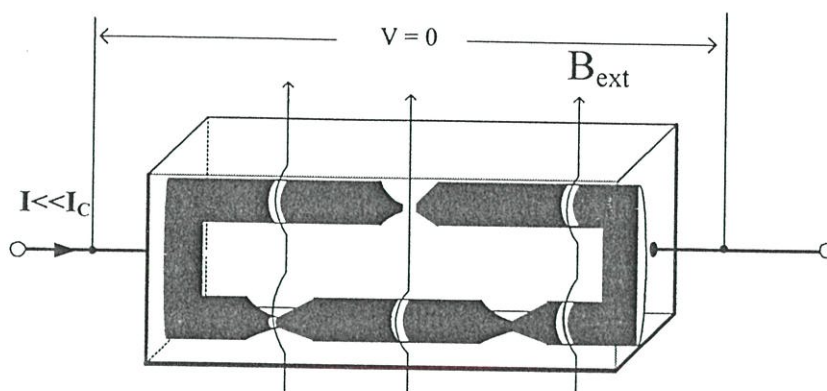
รูปที่ 2.12 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำที่กระแสไบอัสเท่ากับหรือมากกว่ากระแสวิกฤต



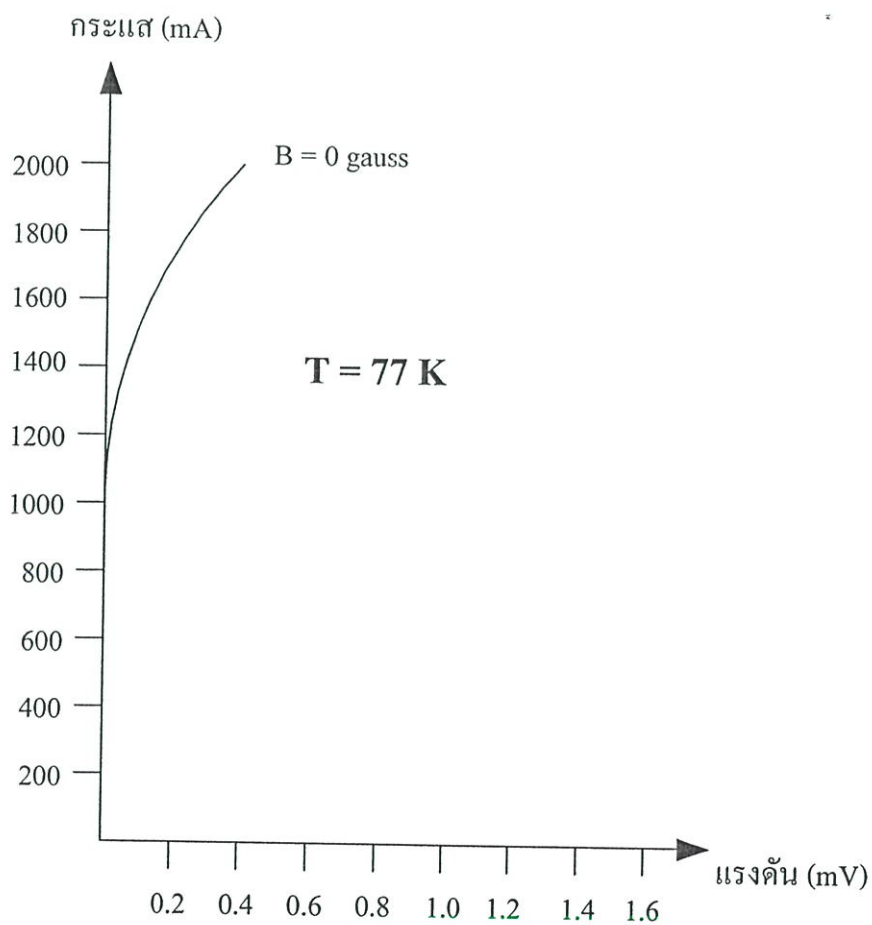
รูปที่ 2.12 (ต่อ)



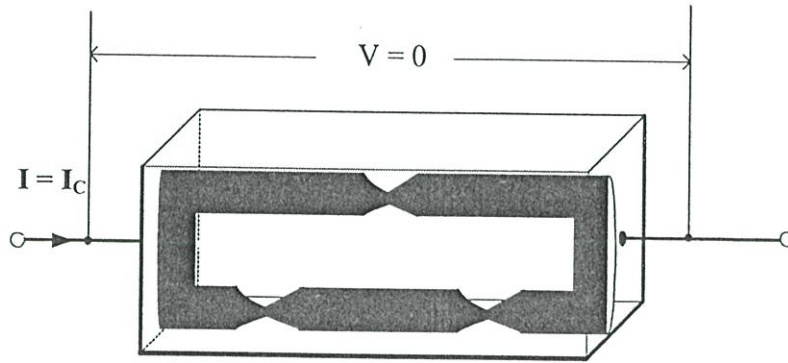
รูปที่ 2.13 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำที่กระแสไบอัสน้อยกว่ากระแสวิกฤต



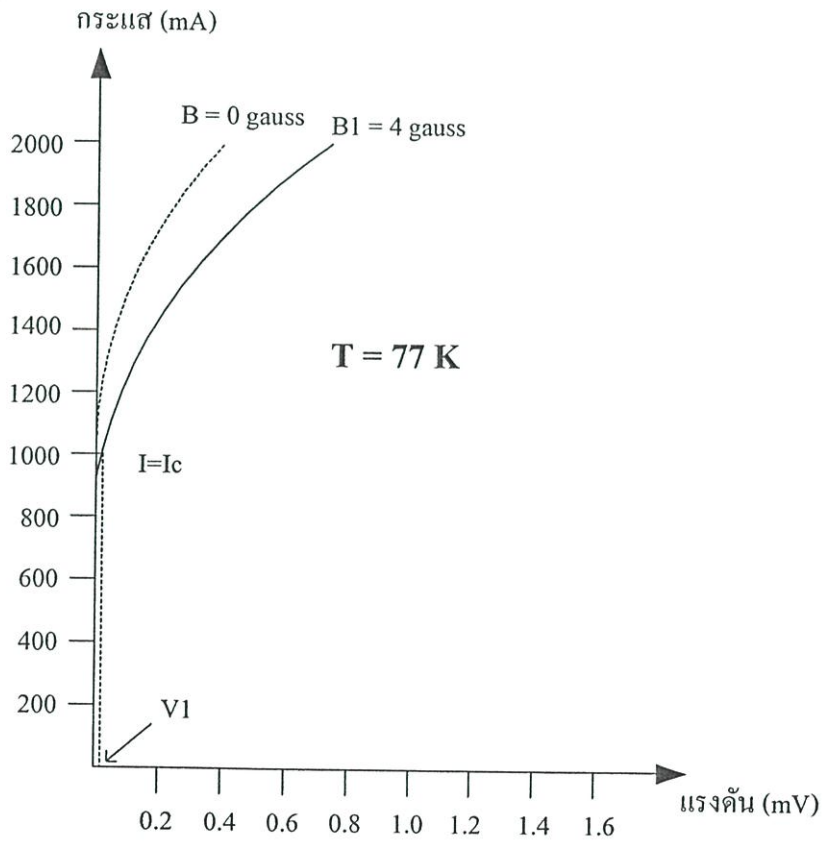
รูปที่ 2.13 (ต่อ)



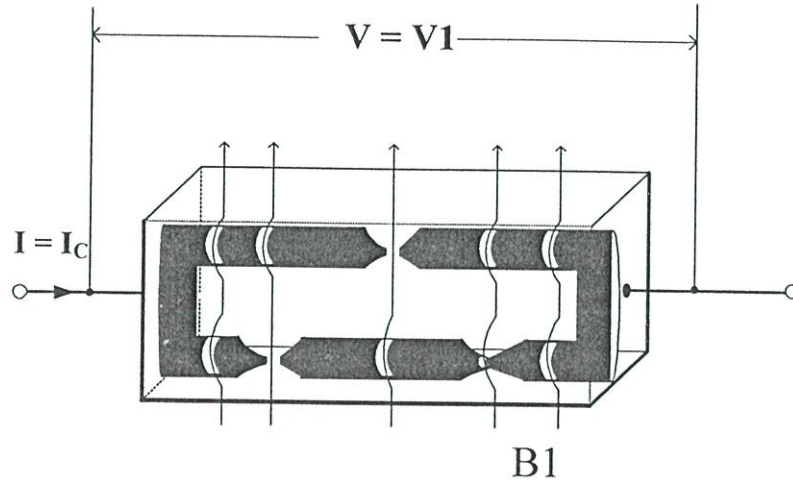
รูปที่ 2.14 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B = 0$) ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



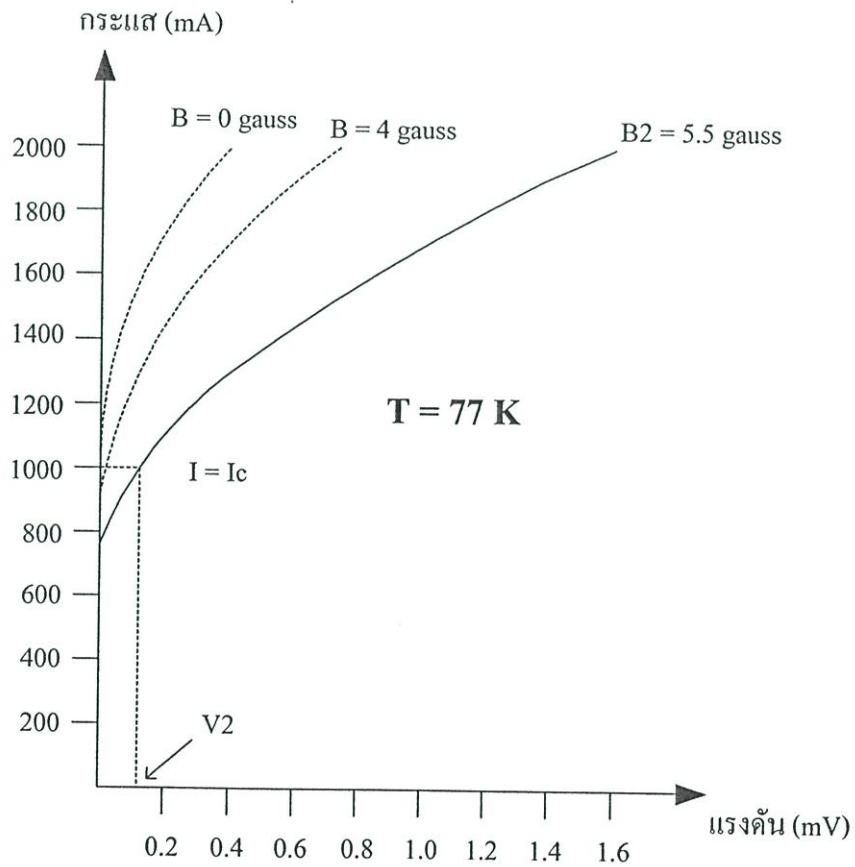
รูปที่ 2.14 (ต่อ)



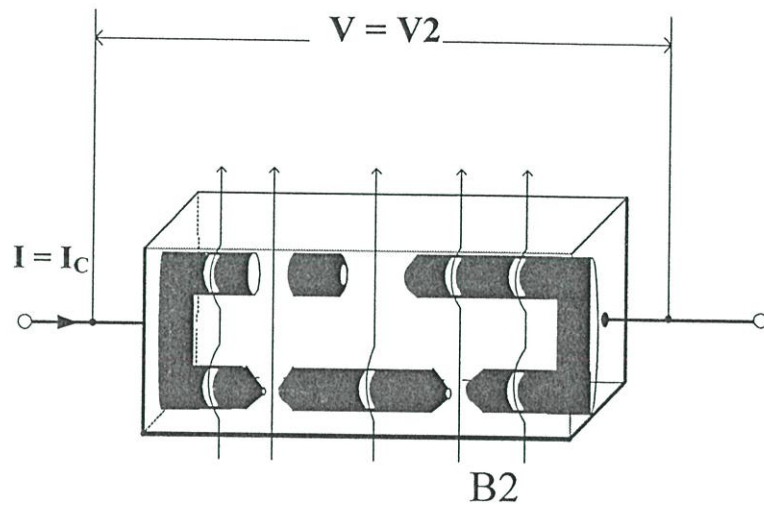
รูปที่ 2.15 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_1 = 4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



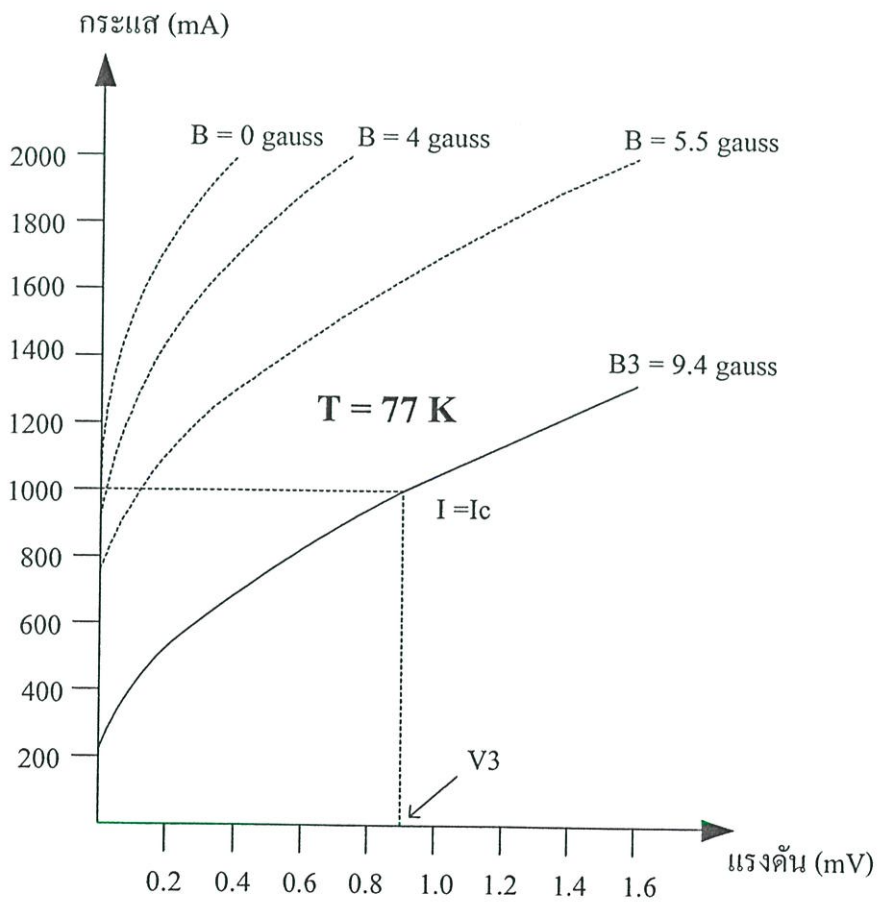
รูปที่ 2.15 (ต่อ)



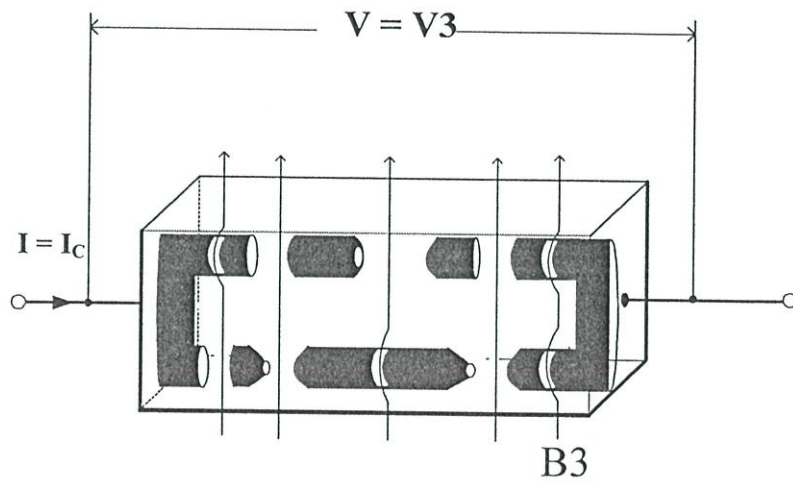
รูปที่ 2.16 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_2 = 5.5 \text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



รูปที่ 2.16 (ต่อ)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_3 = 9.4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



รูปที่ 2.17 (ต่อ)

บทที่ 3

การทดลอง

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ไปแล้ว สำหรับในบทนี้จะเป็นการศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123) นั่นคือ การผสม Y_2BaCuO_5 (Y211) ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยจะศึกษาถึงกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า รวมถึงผลของอุณหภูมิ Calcination และอุณหภูมิ sintering ในการเผา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้ดียิ่งขึ้น

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบด้วย อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยมีรายละเอียดของสารดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด

ชื่อสาร	ความบริสุทธิ์ของสาร	มวลโมเลกุล (กรัม)
Y_2O_3	99.99%	225.807 กรัม
$BaCO_3$	99.99%	197.348 กรัม
CuO	99.99%	79.545 กรัม

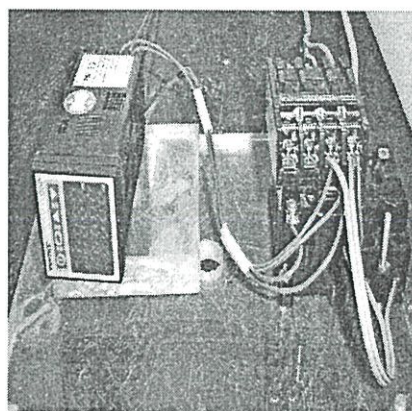
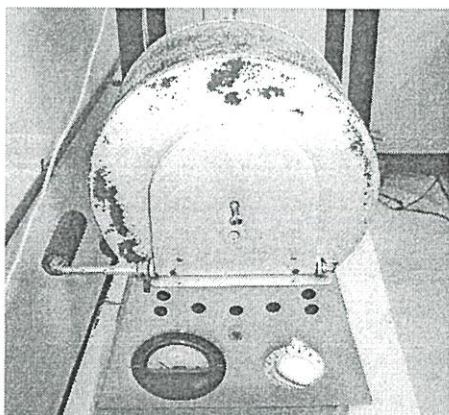
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnance and Temperature control)

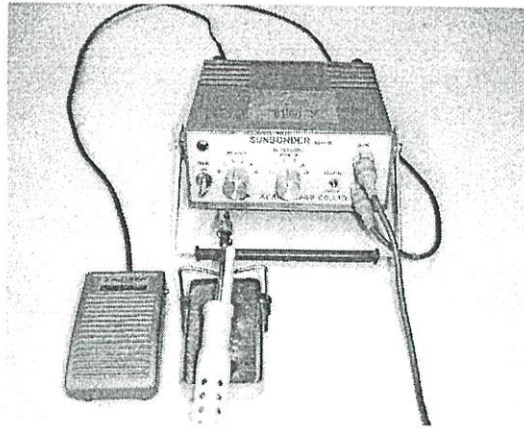
เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นเตาเผาชนิดควบคุมความร้อนที่สามารถให้ความร้อนได้จนถึง 1050 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในส่วนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะต่อร่วมกับเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค



รูปที่ 3.2 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1.4 ชุดบัคกรี้อัลตราโซนิก

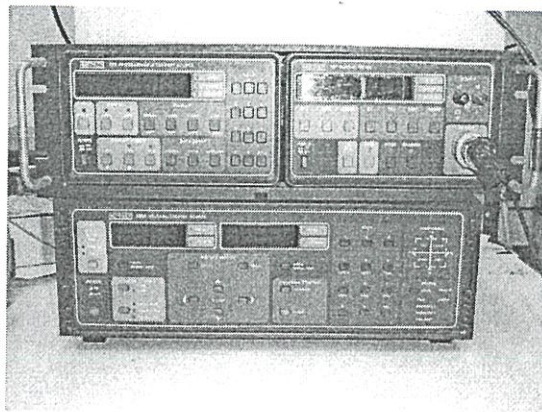
เป็นชุดที่ใช้บัคกรี้อัดขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่ตะกั่วบัคกรีจะมีส่วนผสมของอินเดียมซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ ในส่วนของชุดบัคกรี้อัลตราโซนิกจะมีการสั่นของหัวบัคกรี ซึ่งจะทำให้รอยต่อระหว่างตะกั่วบัคกรีและชั้นสารมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก



รูปที่ 3.3 ชุดบัคกรี้อัลตราโซนิก

3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source) ซึ่งมี 2 ชุด คือ ชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-100 mA และชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-10 A รวมถึงนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nanovolt meter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำถึง 10 nV



รูปที่ 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

3.5 การเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

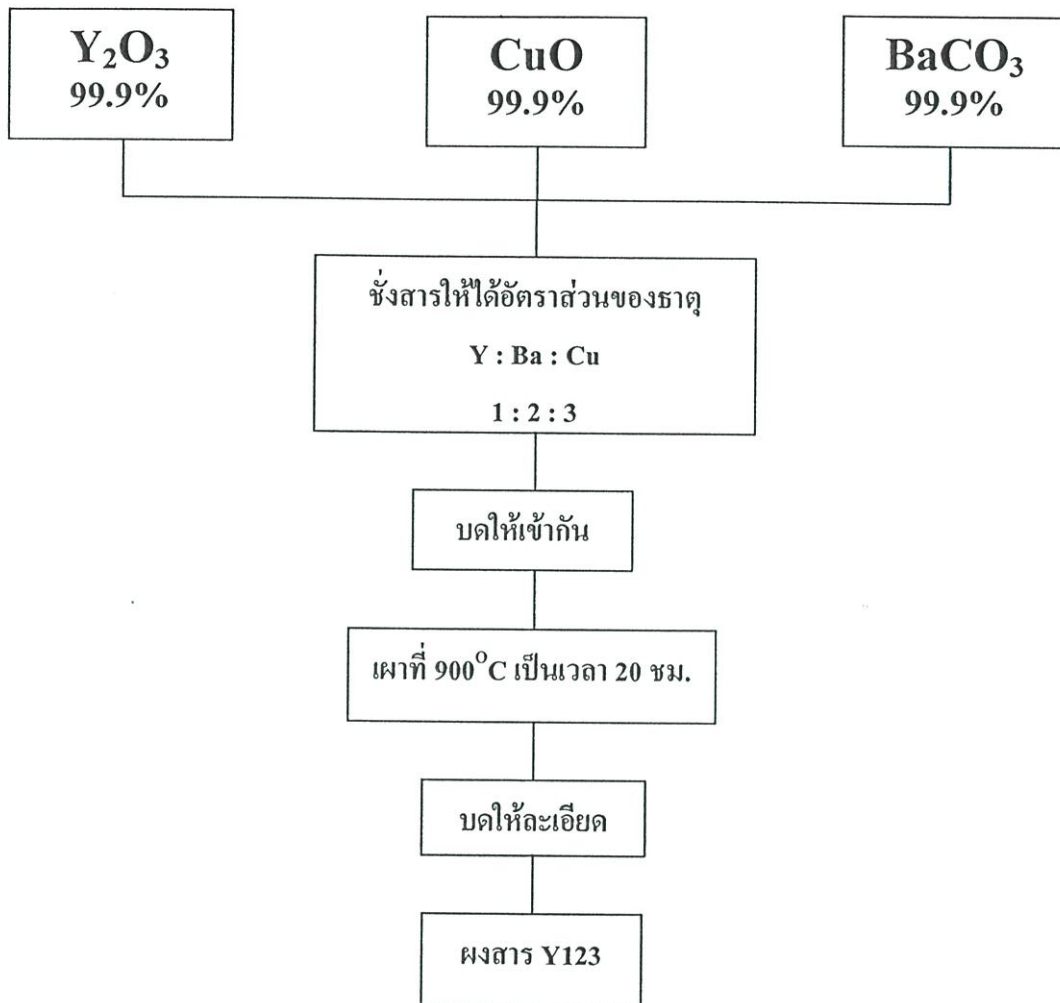
3.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ อิทเทรียม แบเรียม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม $Y : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3

3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

ในขั้นตอนกระบวนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการเผามาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

1. ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Y : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ Calcination $900^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียดเป็นผง
5. ได้ผงสาร $YBa_2Cu_3O_{7-x}$



รูปที่ 3.5 กระบวนการเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123)

3.3 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)

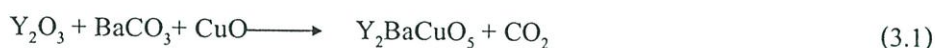
3.3.1 การทดลองผลของอุณหภูมิ Calcination ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)

3.3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y_2BaCuO_5

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ อิทเทรียม แบเรียม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์

99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม
Y : Ba : Cu เป็น 2 : 1 : 1

ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้



จากตารางธาตุจะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้ Y = 88.905 กรัม, Ba = 137.34 กรัม

Cu = 63.546 กรัม, C = 12.011 กรัม, O = 15.99 กรัม

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

$$Y_2O_3 = (2 \times 88.905) + (3 \times 15.99) = 225.807 \text{ กรัม/โมล}$$

$$BaCO_3 = 137.34 + 12.011 + (3 \times 15.99) = 197.348 \text{ กรัม/โมล}$$

$$CuO = 63.546 + 15.99 = 79.545 \text{ กรัม/โมล}$$

การคำนวณจากสมการเคมี

1) Y_2O_3 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 225.807 กรัม

ถ้า 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 225.807 กรัม

2) $BaCO_3$ 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม

ถ้า 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม

3) CuO 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม

ถ้า 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม

มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด = $225.807 + 197.348 + 79.545 = 502.7$ กรัม

ซึ่งหมายความว่าให้ได้สาร $Y_2BaCuO_5 = 502.7$ กรัม

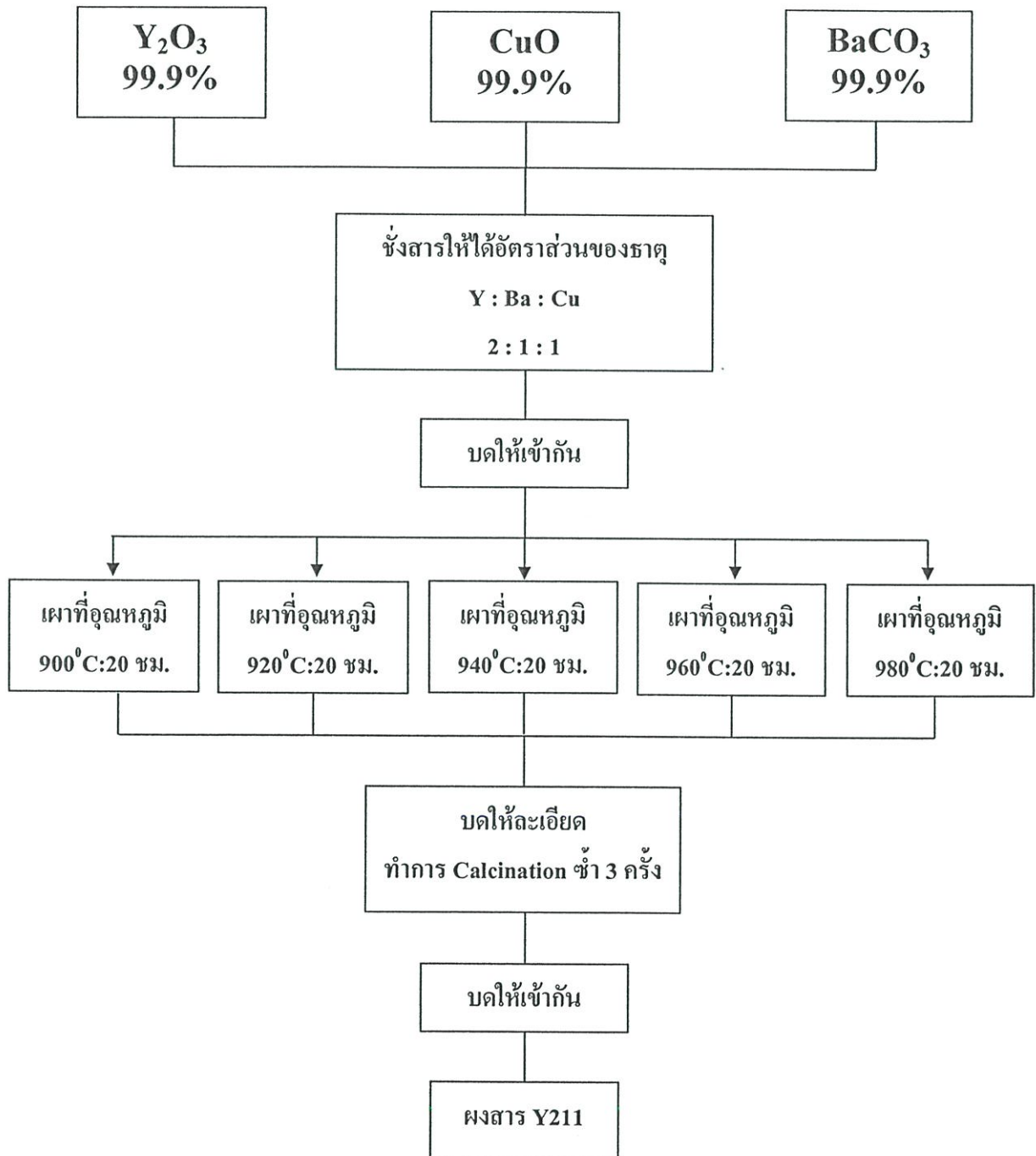
จากสารตั้งต้นทั้งหมด 502.7 กรัม ถ้าต้องการ Y_2BaCuO_5 ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้ อิทธิเตรียมออกไซด์

4.492 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 3.926 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 1.582 กรัม

3.3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

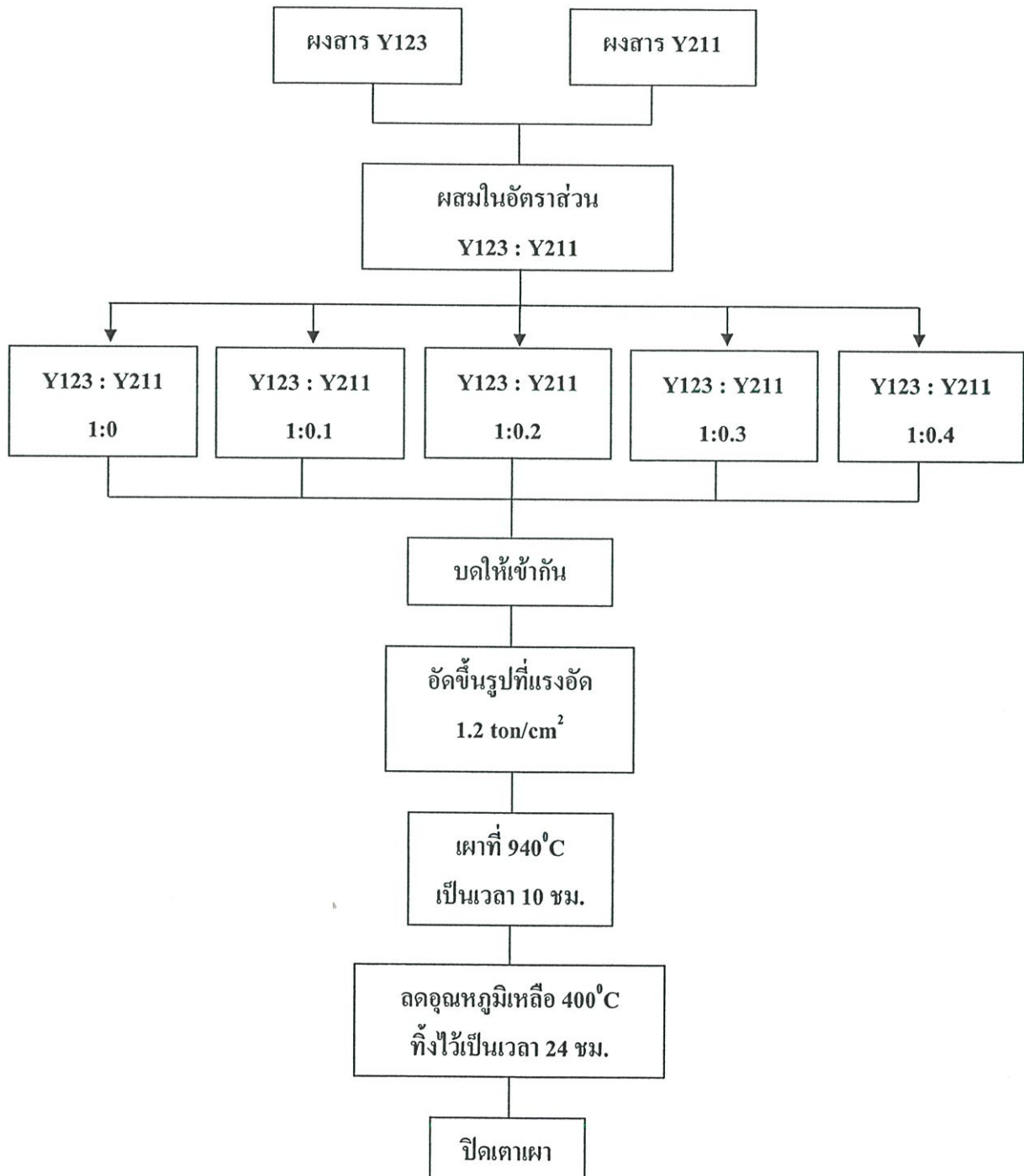
1. ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน Y : Ba : Cu เป็น 2 : 1 : 1
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ Calcination ต่างๆ ดังนี้ $900^\circ C$, $920^\circ C$, $940^\circ C$, $960^\circ C$, $980^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง

4. นำสารที่ได้จากการเผาที่เป็นสีเขียวมาบดให้ละเอียด
5. ทำซ้ำตามขั้นตอน 3 และ 4 อีก 3 ครั้ง
6. ได้ผงสาร Y_2BaCuO_5

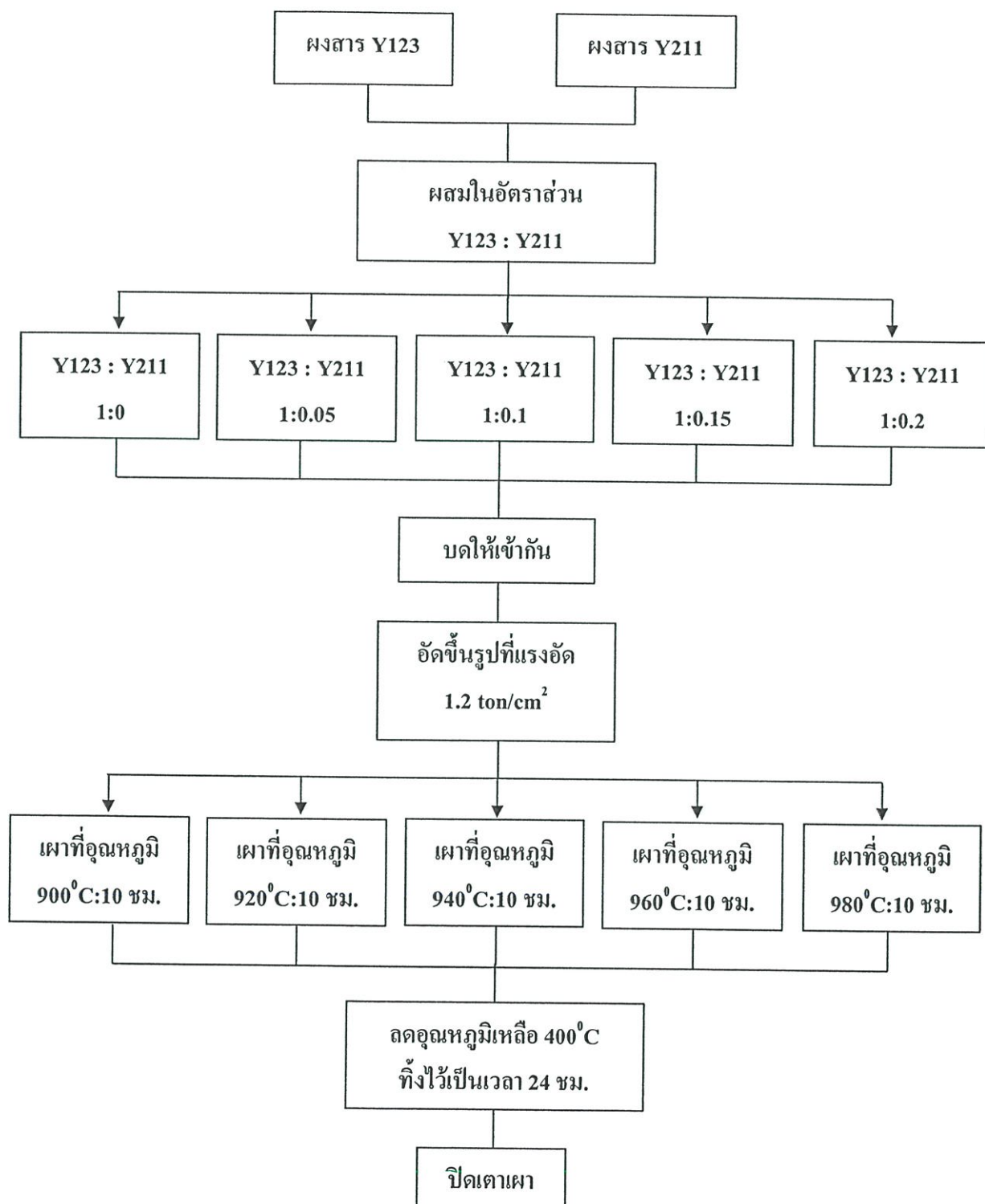


รูปที่ 3.6 กระบวนการเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y_2BaCuO_5 (Y123) ที่อุณหภูมิ Calcination ต่างๆ ($900^{\circ}C$, $920^{\circ}C$, $940^{\circ}C$, $960^{\circ}C$, $980^{\circ}C$)

3.3.1.3 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.7 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.8 (ต่อ)

กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) มีขั้นตอนกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.8 โดยเริ่มจาก

1. การเตรียมผงสาร Y123

- 1.1 ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Y : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
- 1.2 นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
- 1.3 นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ Calcination $900^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
- 1.4 นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีด้ามมาบดให้ละเอียดเป็นผง
- 1.5 ได้ผงสาร $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

2. การเตรียมผงสาร Y211

- 2.1 ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Y : Ba : Cu$ เป็น 2 : 1 : 1
- 2.2 นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
- 2.3 นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ Calcination ต่างๆ ดังนี้ $940^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
- 2.4 นำสารที่ได้จากการเผาที่เป็นสีเขียวมาบดให้ละเอียด
- 2.5 ทำซ้ำตามขั้นตอน 3 และ 4 อีก 3 ครั้ง
- 2.6 ได้ผงสาร Y_2BaCuO_5

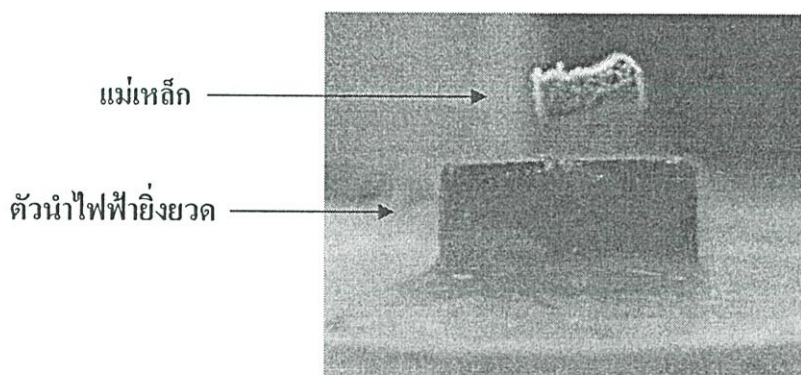
3. กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)

นำผงสาร Y123 และ ผงสาร Y211 ที่ได้มาผสมในอัตราส่วน Y123 : Y211 (g) 1:0, 1:0.05, 1:0.1, 1:0.15, 1:0.2 ตามลำดับ บดให้เข้ากัน อัดขึ้นรูปที่แรงอัด 1.2 ton/cm^2 นำไปเผาที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ $900^\circ C$, $920^\circ C$, $940^\circ C$, $960^\circ C$, $980^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 10 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิเหลือ $400^\circ C$ ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. ปิดเตาเผา

3.4 การวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)

3.4.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)

หัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination $940^{\circ}C$ และอุณหภูมิ Sintering $940^{\circ}C$ ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) 1:0 , 1:0.1 , 1:0.2 , 1:0.3 มาทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว วัดระยะการลอยตัวของปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ บันทึกผล

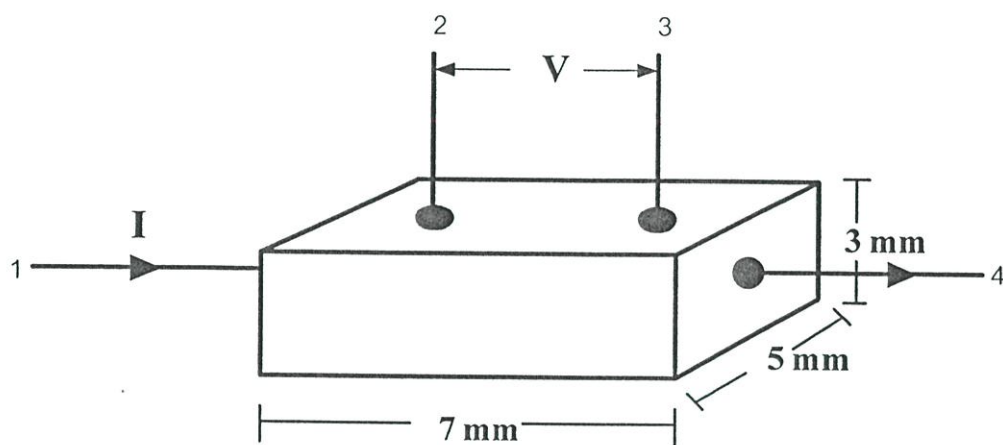


รูปที่ 3.9 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

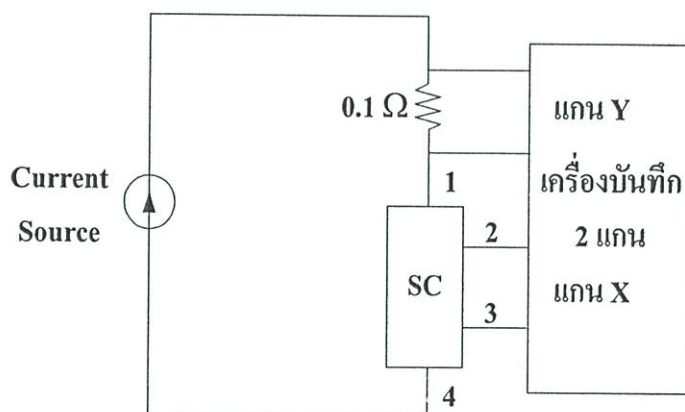
3.4.2 การวัดค่ากระแสวิกฤต

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 3.11 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับชั่ว 2-3 นั้น จะเป็นชั่วที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.10 และในการทดลองชิ้นสารจะอยู่ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (93 เคลวิน)



รูปที่ 3.10 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



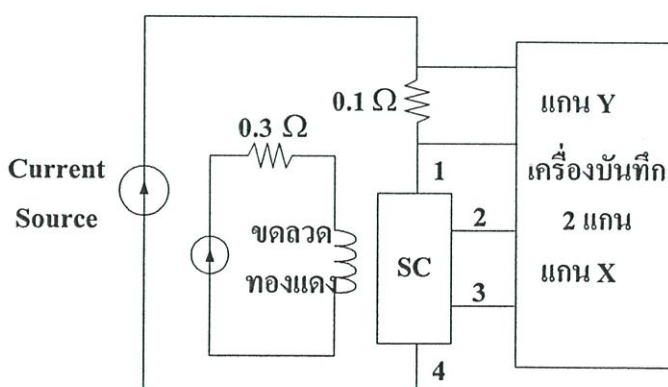
รูปที่ 3.11 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

3.5 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination $900^{\circ}C$ และอุณหภูมิ Sintering $900^{\circ}C$ ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) 1:0 (พื้นฐาน) และกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination $940^{\circ}C$ และอุณหภูมิ Sintering $940^{\circ}C$ ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) 1:0 , 1:0.5 , 1:0.1 , 1:0.15 , 1:0.2 มาทดลองเพื่อดูผลของสนามแม่เหล็กภายนอกว่ามีผลต่อค่ากระแสวิกฤต วงจรที่ใช้ในการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 3.12

ในการทดลองมีขั้นตอนดังนี้

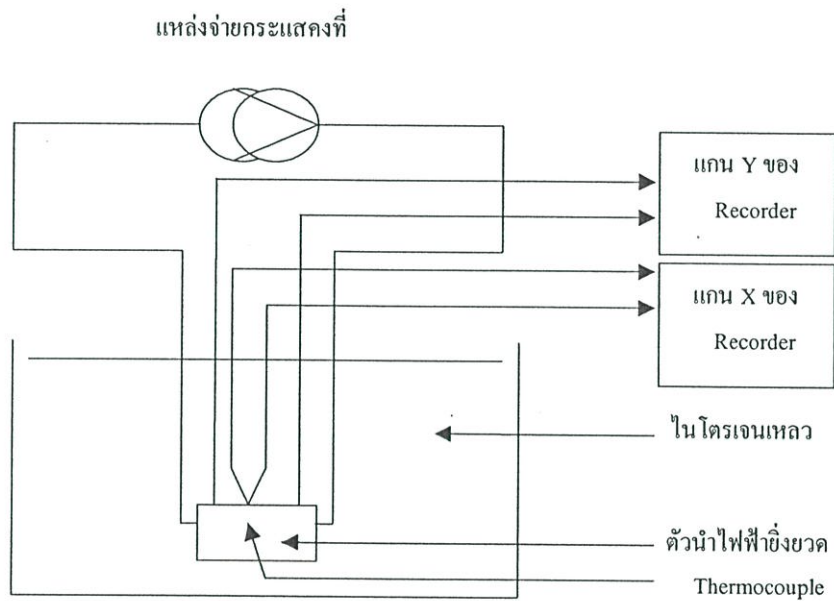
- นำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาต่อเข้ากับวงจรในรูปที่ 3.12 เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ในไนโตรเจนเหลวในขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเลย ($B = 0$ G) บันทึกผลการทดลอง
- ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่สนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าบันทึกผลการทดลอง
- ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้น จนค่ากระแสวิกฤตเป็นศูนย์ โดยที่สนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3.12 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

3.6 การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211)

ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตนั้นค่าอุณหภูมิวิกฤตเป็นสมบัติเฉพาะของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิด ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการศึกษาศาสตร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตจะใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในการวัดนี้จะนำชิ้นสารมาปรับแต่งแล้วบัดกรีเป็นแบบ Four-Point Probe โดยขั้วที่ 1 และ 4 ได้รับการป้อนกระแสค่าหนึ่งจากแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ ส่วนในขั้ว 2 และ 3 นั้นถูกต่อเข้าแกน Y เพื่อแสดงค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะที่ทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นสาร ส่วนเทอร์โมคัปเปิลถูกวางให้สัมผัสกับผิวของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยสัญญาณ ซึ่งแรงดันจะต่อเข้าที่แกน X จากนั้นนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและเทอร์โมคัปเปิลค่อย ๆ จุ่มลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องลงไปยังอุณหภูมิที่จุดเดือดของไนโตรเจนเหลว

เมื่อชิ้นสารอยู่ที่อุณหภูมิห้องจะเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารค่าหนึ่งเหมือนเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่วไป มีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง แต่เมื่อนำชิ้นสารไปทำการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิ

ค่าหนึ่งแล้วค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะหมดไป (ความต้านทานเป็นศูนย์) หรือชิ้นสารนั้นเกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นจะเรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต ซึ่งสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต้องมีอุณหภูมิวิกฤตสูง ๆ

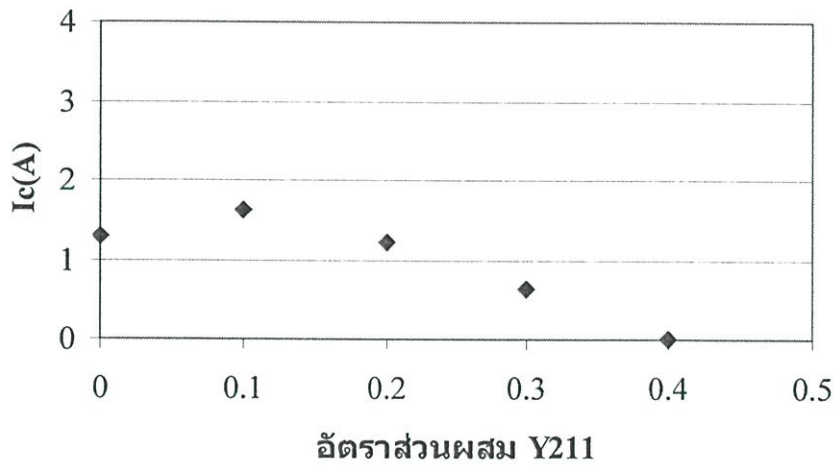
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination 900°C และอุณหภูมิ Sintering 900°C ที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) 1:0 (พื้นฐาน) และกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination 940°C และอุณหภูมิ Sintering 940°C ที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) 1:0 , 1:0.5 , 1:0.1 , 1:0.15 , 1:0.2 ทดลองวัดอุณหภูมิวิกฤต โดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.13 บันทึกผล

บทที่ 4

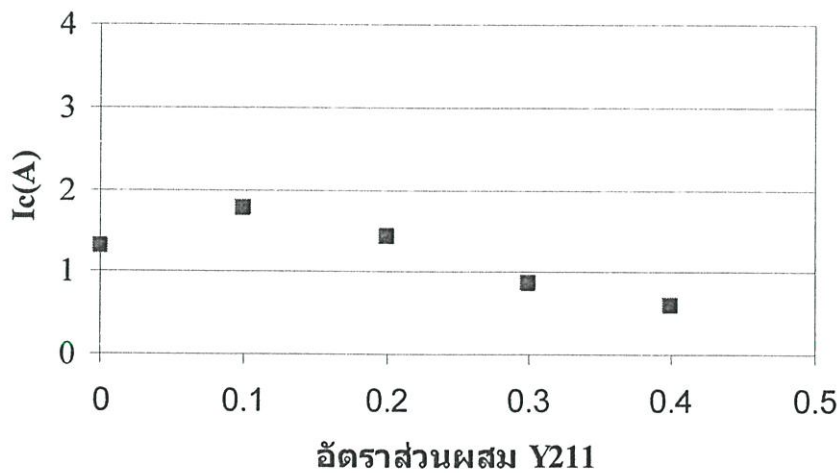
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของอุณหภูมิ Calcination ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211)

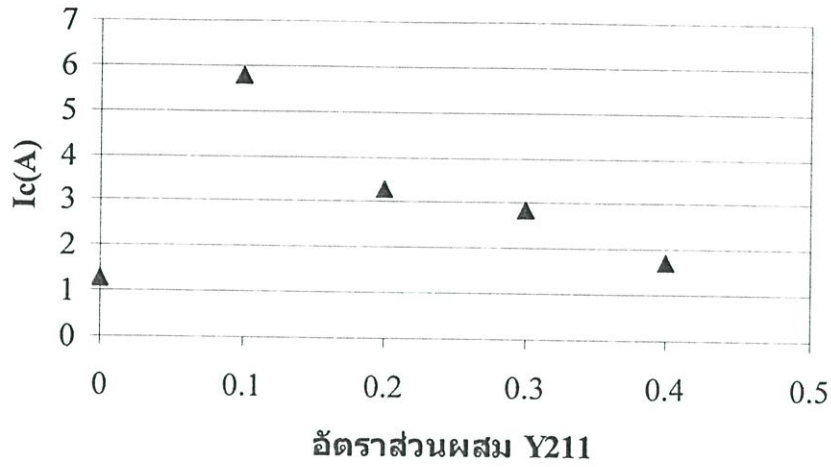
หลังจากที่ได้เม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างแล้ว ต่อไปจะเป็นการวัดค่ากระแสวิกฤต ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1-4.5



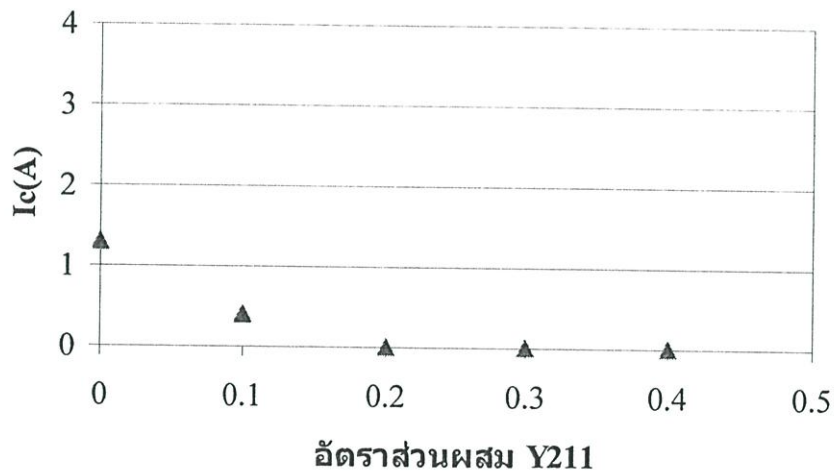
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination 900 °C



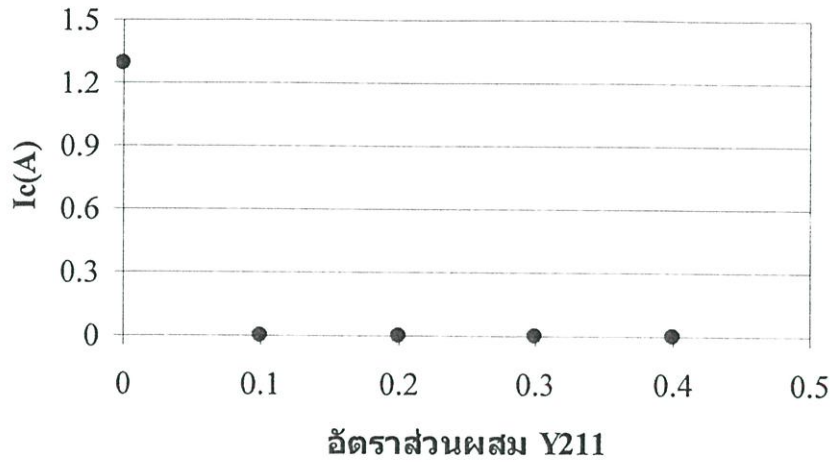
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Calcination 920 °C



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ
Calcination 940 °C

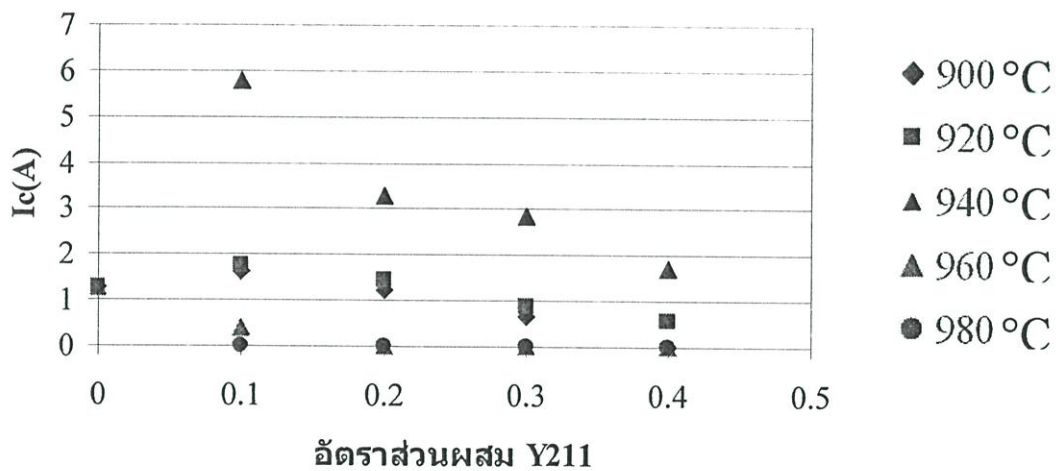


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ
Calcination 960 °C



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ

Calcination 980 °C



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ

Calcination ต่างๆ

พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.1-4.5 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y_2BaCuO_5 (Y211) ที่อุณหภูมิ Calcination ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ Calcination ที่ใช้ในการเผาและอัตราส่วนผสม Y_2BaCuO_5 (Y211) มีผลต่อค่ากระแสวิกฤต พิจารณาที่อุณหภูมิ Calcination 900 °C , 960 °C , 980 °C ค่ากระแสวิกฤตจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) ที่

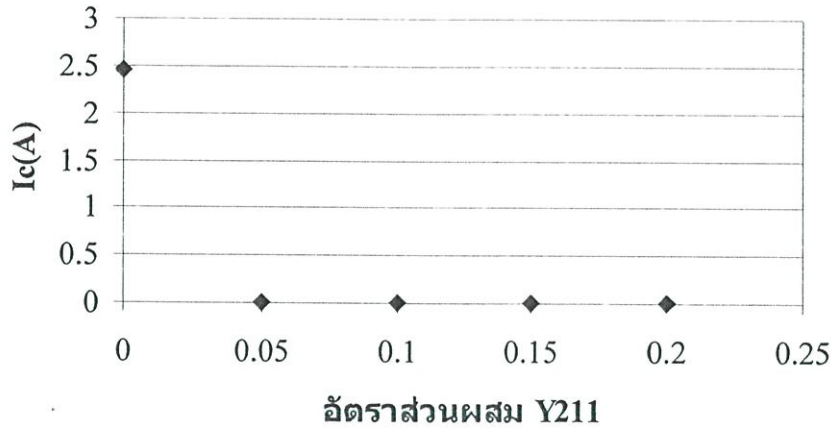
เพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ Calcination 920°C , 940°C ค่ากระแสวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) เท่ากับ 1 : 0.1 และค่ากระแสวิกฤตจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) มีค่ามากขึ้น ที่อุณหภูมิ Calcination 940°C และอัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) เท่ากับ 1 : 0.1 จะให้ค่ากระแสวิกฤตที่สูงสุด เท่ากับ 5.76A

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่อุณหภูมิ Calcination และอัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211)

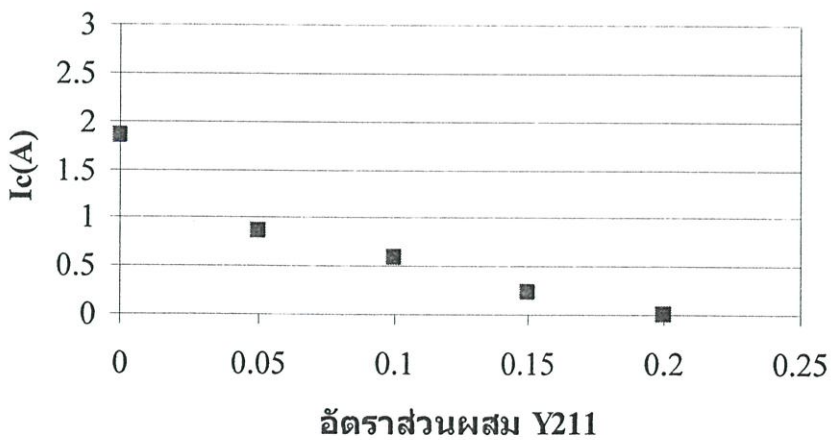
Y 123 : Y 211 (g)	กระแสวิกฤต (Ic) ที่อุณหภูมิ Calcination ต่างๆ (A)				
	900°C	920°C	940°C	960°C	980°C
1:0	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
1:0.1	1.63	1.77	5.76	0.39	0
1:0.2	1.21	1.43	3.26	0	0
1:0.3	0.64	0.86	2.84	0	0
1:0.4	0	0.59	1.72	0	0

4.2 ผลของอุณหภูมิ Sintering ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211)

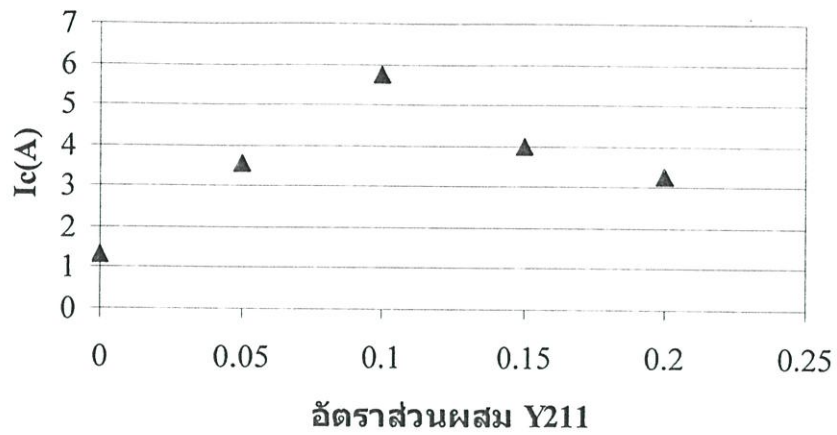
หลังจากที่ได้เมล็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างแล้ว ต่อไปจะเป็นการวัดค่ากระแสวิกฤต ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7-4.11



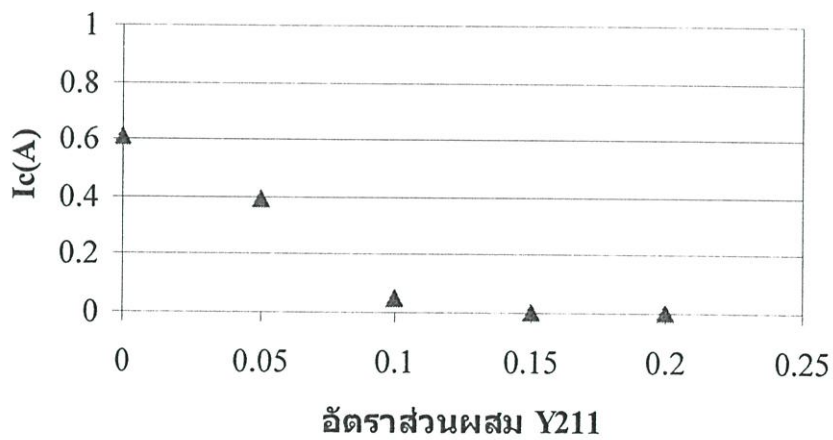
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 900 °C



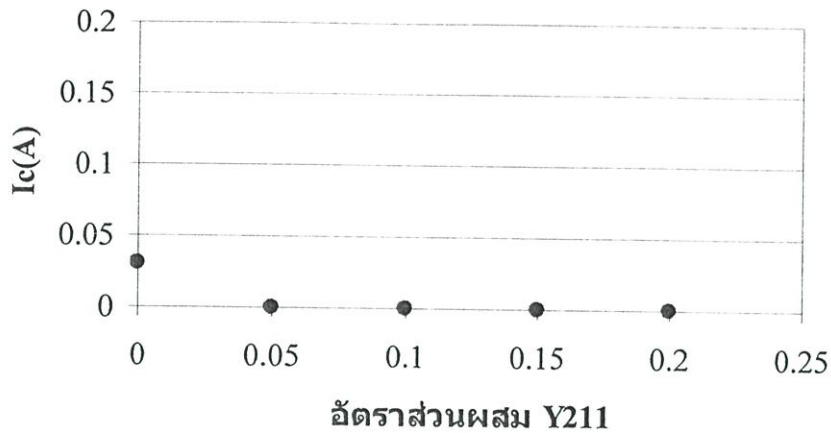
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 920 °C



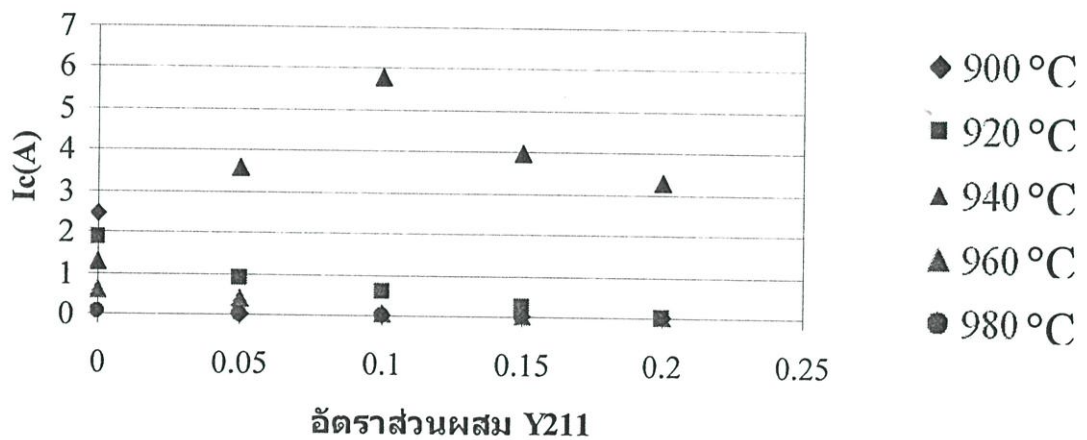
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 940 °C



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 960 °C



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering 980 °C



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y211 ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ

พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.7-4.11 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม Y_2BaCuO_5 (Y211) ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ Sintering ที่ใช้ในการเผาและอัตราส่วนผสม Y_2BaCuO_5 (Y211) มีผลต่อค่ากระแสวิกฤต พิจารณาที่อุณหภูมิ Calcination 900 °C , 920 °C , 960 °C , 980 °C ค่ากระแสวิกฤตจะมีค่าคงตามอัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: Y_2BaCuO_5 (Y123 : Y211) ที่เพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ Calcination 940 °C ค่ากระแสวิกฤตจะมีค่าเพิ่มขึ้นและที่อัตราส่วน

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) เท่ากับ 1 : 0.1 ค่ากระแสวิกฤตที่สูงสุด เท่ากับ 5.76A และค่ากระแสวิกฤตจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) มีค่ามากกว่า 1 : 0.1

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่อุณหภูมิ Sintering และอัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211)

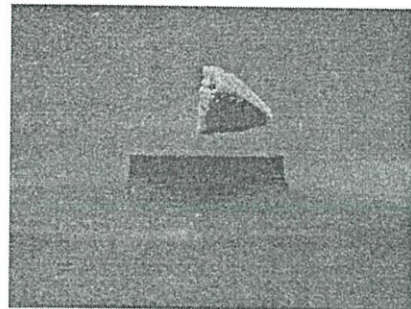
Y 123 : Y 211 (g)	กระแสวิกฤต (I_c) ที่อุณหภูมิ sintering ต่างๆ (A)				
	900 °C	920 °C	940 °C	960 °C	980 °C
1:0	2.45	1.84	1.29	0.61	0.03
1:0.05	0	0.86	3.55	0.39	0
1:0.1	0	0.59	5.76	0.05	0
1:0.15	0	0.23	3.97	0	0
1:0.2	0	0	3.26	0	0

4.3 ปฏิกิริยาไมสเนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)

หัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination $940^{\circ}C$ และอุณหภูมิ Sintering $940^{\circ}C$ ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) 1:0 , 1:0.1 , 1:0.2 , 1:0.3 มาทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.13



ก) 1:0



ข) 1:0.1



ค) 1:0.2



ง) 1:0.3

รูปที่ 4.13 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211) 1:0 , 1:0.1 , 1:0.2 , 1:0.3

จากรูปที่ 4.13 พบว่าที่อัตราส่วน 1:0.1 ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤตสูงสุด จะมีระยะการลอยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์สูงที่สุดประมาณ 2 mm และระยะในการผลักแม่เหล็กจะต่ำลง เมื่อค่ากระแสวิกฤตต่ำลง ซึ่งสามารถสรุประยะการลอยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์แสดงดังตารางที่ 4.3

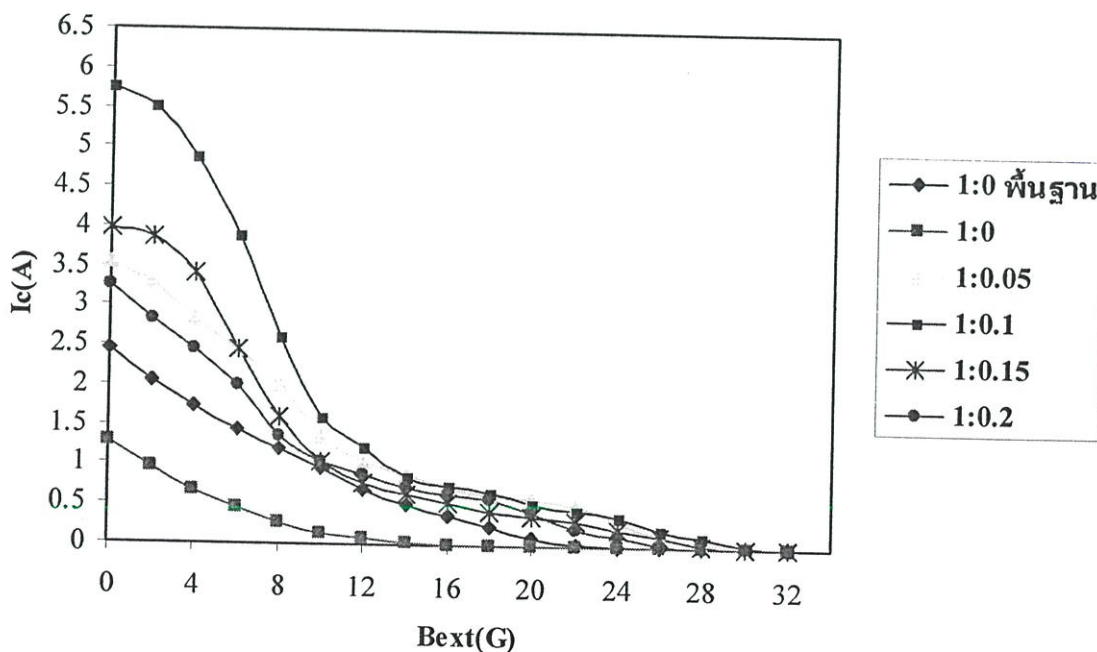
ตารางที่ 4.3 แสดงระยะการลอยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์

อัตราส่วนผสม Y123 : Y211 (g)	กระแสวิกฤต (I_c) (A)	ระยะการลอยตัวของ ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (mm)
1:0	1.29	1
1:0.1	5.76	3
1:0.2	3.26	1.5
1:0.3	2.84	1.2

4.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

$YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123 : Y211)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลต่อกระแสวิกฤต เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้กับชิ้นสารมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่ากระแสวิกฤตมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กภายนอกไปทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวดทำให้เสียสภาพได้ง่ายขึ้น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Flux Density : B_c) แสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตกับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต ที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) ต่างๆ

อัตราส่วนผสม Y123 : Y211 (g)	กระแสวิกฤต : I_c (A)	ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต : B_c (G)
1:0 พื้นฐาน	2.45	24
1:0	1.29	16
1:05	3.55	30
1:01	5.76	32
1:015	3.97	30
1:02	3.26	28

4.5 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 1:0 (พื้นฐาน) ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤต เท่ากับ 2.45 A ค่าอุณหภูมิวิกฤตจะมีค่าประมาณ 92 K และ ที่อัตราส่วน 1:0.1 ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤตสูงสุด เท่ากับ 5.76 A จะมีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่ประมาณ 94 K

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) ต่างๆ

อัตราส่วนผสม Y123 : Y211 (g)	กระแสวิกฤต : I_c (A)	อุณหภูมิวิกฤต : T_c (K)
1:0 พื้นฐาน	2.45	92 K
1:0	1.29	91.5 K
1:05	3.55	92.8 K
1:01	5.76	94 K
1:015	3.97	93 K
1:02	3.26	92.5 K

บทที่ 5

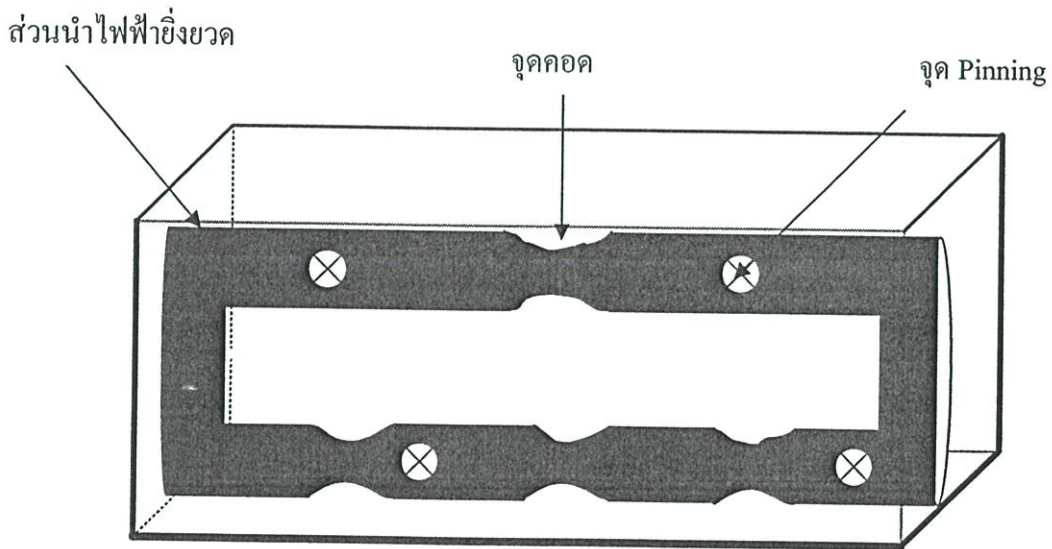
แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เซรามิกชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ มาอธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตที่ได้จากการทดลอง ในหัวข้อ 4.4

5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

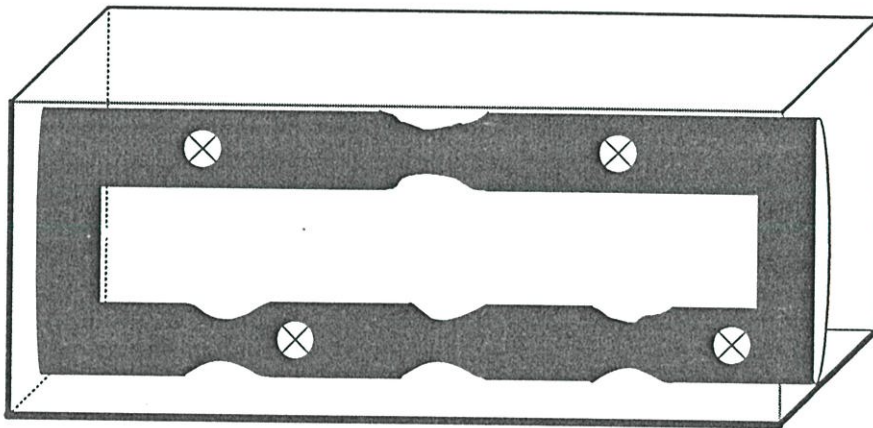
จากรูป 5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ประกอบด้วยส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อกัน ในส่วนของท่อด้านล่างจะมีจุดคอด 3 จุด ส่วนท่อด้านบนมีจุดคอด 1 จุด และในส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีจุด pinning (Pinning Point) [11] ซึ่งจะเป็นตัวจับเส้นแรงแม่เหล็กไม่ให้เกิดการเคลื่อนหรือเคลื่อนที่ อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสาร



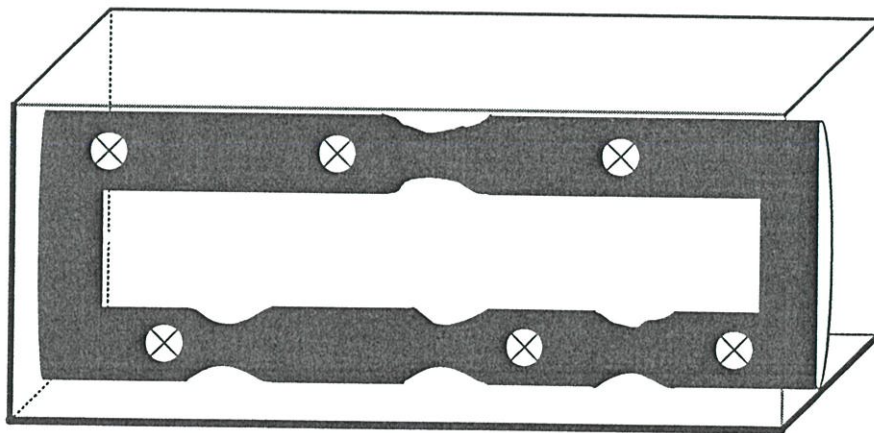
รูปที่ 5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

5.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อัตราส่วนผสม Y211 ต่างๆ

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ Calcination และ อุณหภูมิ Sintering ที่ใช้ในการเผาในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และอัตราส่วนผสมของ Y211 มีผลต่อค่ากระแสวิกฤต ซึ่งจะพบว่า อุณหภูมิ Calcination และ อุณหภูมิ Sintering 940°C ช่วยเพิ่มค่ากระแสวิกฤตได้สูงสุด จึงนำมาใช้ในการอธิบายโดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค โดยเลือกอัตราผสม Y211 ที่ 0, 0.1 และ 0.2 ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 1.29 , 5.76 , 3.26 A ตามลำดับ แบบจำลองโครงสร้างมหภาคแสดงไว้ดังรูป 5.2 ก)-ค)

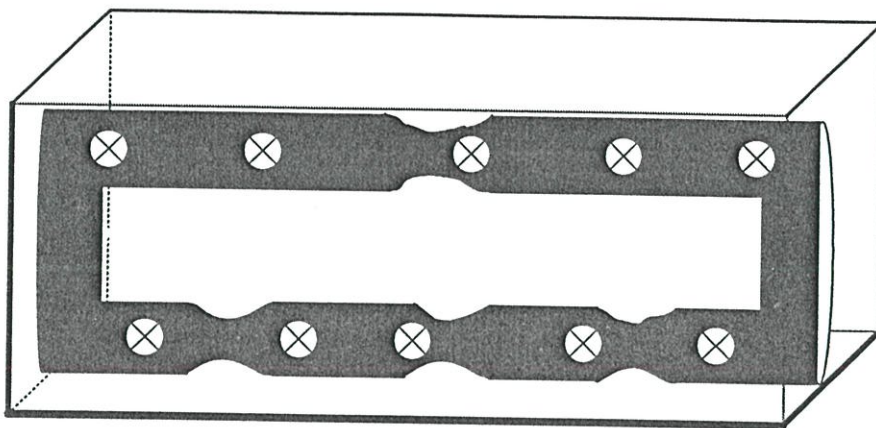


ก) อัตราส่วนผสม 1:0



ข) อัตราส่วนผสม 1:0.1

รูปที่ 5.2 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อัตราส่วน Y123 : Y211
อุณหภูมิ Calcination และ Sintering 940°C

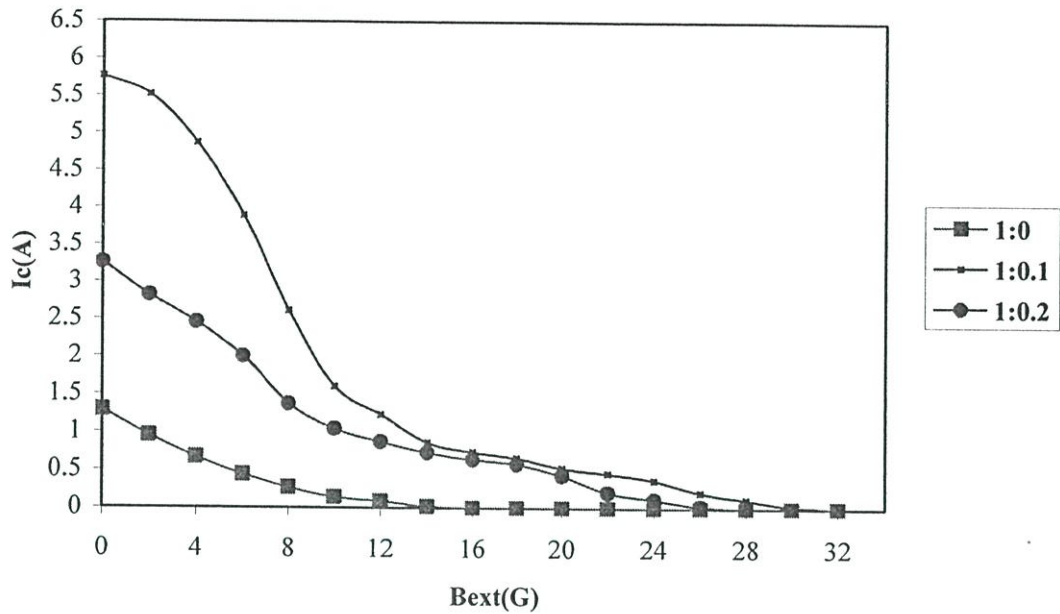


ค) อัตราส่วนผสม 1:0.2

รูปที่ 5.2 (ต่อ)

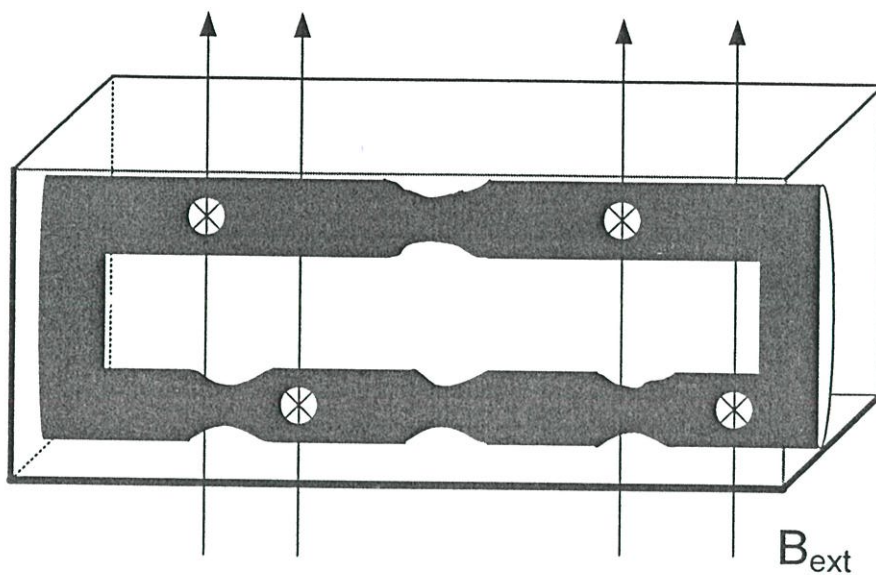
จากรูป 5.2 จะเห็นว่า การผสม Y211 จะช่วยเพิ่มจุด Pinning ในรูป 5.2 ก) เมื่อไม่มีการผสม Y211 จะเห็นว่าชิ้นสารก็จะมีจุด pinning เหมือนกัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสม Y211 มากขึ้นจุด pinning จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูป 5.2 ข) และ ค)

5.3 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายโดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอก

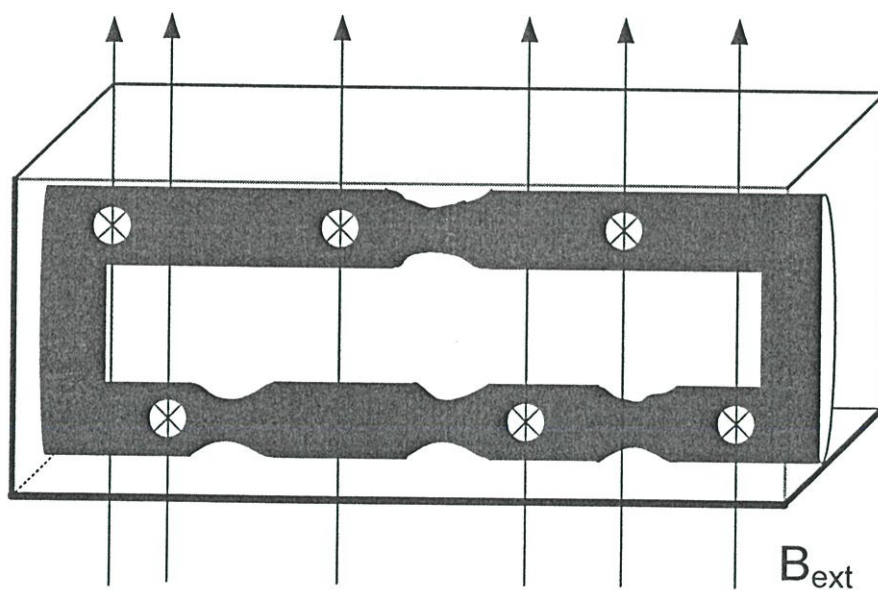


รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตกับสนามแม่เหล็กภายนอก

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.3 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตกับสนามแม่เหล็กภายนอก จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลต่อกระแสวิกฤต เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้กับชิ้นสารมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่ากระแสวิกฤตมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กภายนอกไปทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวดทำให้เสียสภาพได้ง่ายขึ้น และจะเห็นว่าชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตสูง จะต้องให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่ามากกว่าในการทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลงจนเป็นศูนย์

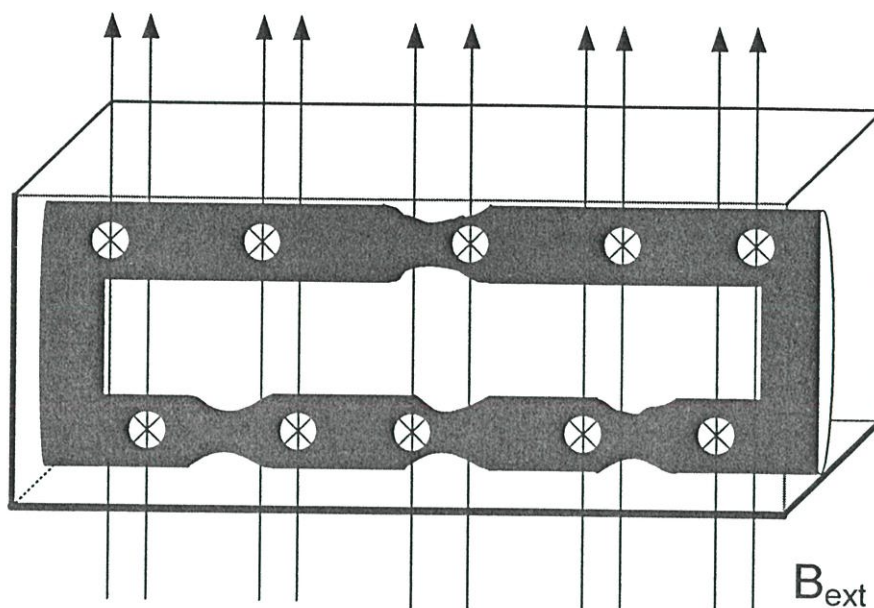


ก) อัตราส่วนผสม 1:0



ข) อัตราส่วนผสม 1:0.1

รูปที่ 5.4 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อัตราส่วน Y123 : Y211
 อุณหภูมิ Sintering และ Calcination 940°C เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก



ค) อัตราส่วนผสม 1:0.2

รูปที่ 5.4 (ต่อ)

จากรูปที่ 5.4 จุด pinning จะช่วยจับเส้นแรงแม่เหล็กไม่ให้มีการเลื่อนหรือเคลื่อนที่ อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นสาร พบว่า ชั้นสารที่มีการผสม Y211 จะช่วยเพิ่มจุด pinning ทำให้ค่ากระแสวิกฤตมีค่ามากขึ้น แต่การผสม Y211 ในปริมาณที่มากขึ้น จุด pinning ก็จะมีมากขึ้นเช่นกัน เป็นผลทำให้ส่วนนำไฟฟ้ายังยวดยิ่งมีพื้นที่น้อยลง ทำให้ชั้นสารเสียสภาพการนำไฟฟ้ายังยวดยิ่งได้ง่ายขึ้น เป็นเหตุให้ค่ากระแสวิกฤตมีค่าลดลง

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาถึงกระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่ห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สามารถทำค่ากระแสวิกฤตได้สูงสุด 2.5 A และระยะการลอยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์สูงสุดที่ 1 mm ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ โดยการผสม Y_2BaCuO_5 ที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) 5 ค่าด้วยกัน คือ 1:0 , 1:0.1 , 1:0.2 , 1:0.3 , 1:0.4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิ Calcination ทั้งหมด 5 ค่า คือ 900°C , 920°C , 940°C , 960°C , 980°C และใช้อุณหภูมิ Sintering ที่ 940°C พบว่าที่อุณหภูมิ Calcination 940°C สามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตได้ถึง 5.76 A ที่อัตราส่วนผสม $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) เท่ากับ 1:0.1 ต่อมาได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ Calcination 940°C ซึ่งสามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตได้สูงสุด โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ Sintering 5 ค่าด้วยกัน คือ 900°C , 920°C , 940°C , 960°C , 980°C โดยใช้อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) 5 ค่าด้วยกัน คือ 1:0 , 1:0.0.5 , 1:0.1 , 1:0.15 , 1:0.2 พบว่าที่อุณหภูมิ Sintering 940°C สามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตได้สูงสุด ที่อัตราส่วนผสม $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y123 : Y211) เท่ากับ 1:0.1

และยังพบอีกว่าที่อัตราส่วน 1:0.1 ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤตสูงสุด เท่ากับ 5.76 A จะมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤตสูงสุดที่ 32 G และ ค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่ประมาณ 94 K ทั้งยังมีระยะการลอยตัวของปรากฏการณ์ไมสเนอร์สูงสุดที่ประมาณ 3 mm

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ เพื่อใช้อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤต ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้อย่างสอดคล้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. 2539. วัสดุอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สกายบุ๊กส์.
- [2] คูสิต เครื่องงาม. 2535. โพลีคริสเตลฟิสิกส์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [3] คุณยวัญ จอมแสง. “การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.”
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [4] พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์. “การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ
YBCO/GBCO.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [10] วิสิฎฐ์ วงศ์สุทธิธรรม นพดล สิริพิล ชบา สุริยาอมรานนท์ และวิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง.
“แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก.”
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24. 2544. หน้า 992-997.
- [11] S.Nariki , N.Sakai and M.Murakami. 2001. “Preparation and properties of OCMG-processed
Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors with very fine Gd₂₁₁ particles.” PHYSICA C. 357-
360.
- [12] S.Nariki , N.Sakai , M.Murakami and I. Hirabayashi .2004. “High critical current density in
RE-Ba-Cu-O bulk superconductors with very fine RE₂BaCuO₅ particles.” PHYSICA C.
412-414.
- [13] S.Nariki , H. Hinai , N.Sakai , M.Murakami and M. Otsuka. 2001. “Effect of microstructure
on the superconducting properties of Gd-Ba-Cu-O bulk fabricated in air.” PHYSICA C.
357-360.
- [14] R. Piyannjaratsri , W. Wongsuttitum , , W. Titiroongruang ,and M. Iida. 2006. “The Effect
of The External Magnetic field on Negative Resistance Phenomena of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
Superconducting Ceramic Materials.” Laos Journal on Applied Science. 223-230.

ภาคผนวก

ตาราง ก คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด
YBa₂Cu₃O_{7-x} และ GdBa₂Cu₃O_{7-x}

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
Y	88.905	1,509	2,927
Gd	157.26	1,312 ± 15	3,270
Ba	137.34	725 ± 5	1,637
Cu	63.546	1,083	2,538
O	15.99	-218.8	-183
C	12.011	3,827	3,727

ตาราง ข ค่าแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆของเทอร์โมคัปเปิลชนิดที (Type T) ซึ่งใช้ในการวัดอุณหภูมิ
วิกฤต

°C	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
-270	-6.258										
-260	-6.232	-6.236	-6.239	-6.242	-6.245	-6.248	-6.251	-6.253	-6.255	-6.256	-6.258
-250	-6.180	-6.187	-6.193	-6.198	-6.204	-6.209	-6.214	-6.219	-6.223	-6.228	-6.232
-240	-6.105	-6.114	-6.122	-6.130	-6.138	-6.146	-6.153	-6.160	-6.167	-6.174	-6.180
-230	-6.007	-6.017	-6.028	-6.038	-6.049	-6.059	-6.068	-6.078	-6.087	-6.096	-6.105
-220	-5.888	-5.901	-5.914	-5.926	-5.938	-5.950	-5.962	-5.973	-5.985	-5.996	-6.007
-210	-5.753	-5.767	-5.782	-5.795	-5.809	-5.823	-5.836	-5.850	-5.863	-5.876	-5.888
-200	-5.603	-5.619	-5.634	-5.650	-5.665	-5.680	-5.695	-5.710	-5.724	-5.739	-5.753
-190	-5.439	-5.456	-5.473	-5.489	-5.506	-5.523	-5.539	-5.555	-5.571	-5.587	-5.603
-180	-5.261	-5.279	-5.297	-5.316	-5.334	-5.351	-5.369	-5.387	-5.404	-5.421	-5.439
-170	-5.070	-5.089	-5.109	-5.128	-5.148	-5.167	-5.186	-5.205	-5.224	-5.242	-5.261
-160	-4.865	-4.886	-4.907	-4.928	-4.949	-4.969	-4.989	-5.010	-5.030	-5.050	-5.070
-150	-4.648	-4.671	-4.693	-4.715	-4.737	-4.759	-4.780	-4.802	-4.823	-4.844	-4.865
-140	-4.419	-4.443	-4.466	-4.489	-4.512	-4.535	-4.558	-4.581	-4.604	-4.626	-4.648
-130	-4.177	-4.202	-4.226	-4.251	-4.275	-4.300	-4.324	-4.348	-4.372	-4.395	-4.419
-120	-3.923	-3.949	-3.975	-4.000	-4.026	-4.052	-4.077	-4.102	-4.127	-4.152	-4.177
-110	-3.657	-3.684	-3.711	-3.738	-3.765	-3.791	-3.818	-3.844	-3.871	-3.897	-3.923
-100	-3.379	-3.407	-3.435	-3.463	-3.491	-3.519	-3.547	-3.574	-3.602	-3.629	-3.657
-90	-3.089	-3.118	-3.148	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.322	-3.350	-3.379
-80	-2.788	-2.818	-2.849	-2.879	-2.910	-2.940	-2.970	-3.000	-3.030	-3.059	-3.089
-70	-2.476	-2.507	-2.539	-2.571	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788
-60	-2.153	-2.186	-2.218	-2.251	-2.283	-2.316	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.476
-50	-1.819	-1.853	-1.887	-1.920	-1.954	-1.987	-2.021	-2.054	-2.087	-2.120	-2.153
-40	-1.475	-1.510	-1.545	-1.579	-1.614	-1.648	-1.683	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.264	-1.299	-1.335	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.904	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121
-10	-0.383	-0.421	-0.459	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383
°C	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	รุ่งทิวี ปิยนันทจักร์สตรี
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2546