

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก

THE EFFECT OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD ON $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ AND
 $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIALS



โดย

นาย ไสริช บัวศรีแก้ว รหัส 47015888

นาย อนุศาสน์ เทพบุญศรี รหัส 47015889

๒๖๗.
๕๖๑๑๑๑
๑๕๖๑

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 72620

วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ย. 2550

b..... 117 703๑๑
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ แบบเซรามิก

**THE EFFECT OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD ON $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ AND
 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIALS**



ปริญญานิพนธ์นี้สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก

ผู้จัดทำ

นาย โสรัช บัวศรีแก้ว

รหัส 47015888

นาย อนุศาสน์ เทพบุญศรี

รหัส 47015889



(รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานเรื่อง ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก
The Effect Of External Magnetic Field On $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ And $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ Superconducting Ceramic Materials

จัดทำโดย นาย โสรัช บัวศรีแก้ว รหัส 47015888
นาย อนุศาสน์ เทพบุญศรี รหัส 47015889



รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ

(รศ.ดร.วิสุทธิ จิตรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ แบบเซรามิก

นาย โสรัช บัวศรีแก้ว รหัส 47015888

นาย อนุศาสน์ เทพบุญศรี รหัส 47015889

รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

จากการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ แบบเซรามิก พบว่ามีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งพิจารณาได้จากค่ากระแสวิกฤตและแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆจากผลการทดลองยังพบอีกว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ มีค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ซึ่งเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

และจากการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ สามารถพัฒนาให้มีค่ากระแสวิกฤตและการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกให้มีค่าสูงขึ้นได้ โดยการผสม Y_2BaCuO_5 ในสัดส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการสร้าง ซึ่งสามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตและการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของรศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางแก้ไขปัญหาและให้การสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบคุณ นายปิยะบุตร ขวัญเมือง นายรุ่งทิว ปิยนันทจรัสศรี และ นายวิติฎฐ์ วงศ์สุริชธรรมที่คอยให้ความช่วยเหลือแนะนำลำดับขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์นี้ ทั้งคอยดูแลเอาใจใส่มาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE EFFECT OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD ON $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ and $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIALS

Mr. Sorat Buasrikaew ID.47015888

Mr. Anusat thepboonsri ID.47015889

Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang (Advisor)

Educational Year 2006

Abstract

From the studying the effect of external magnetic field on superconducting type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ and $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ceramic materials. It is found that the direct influenced with the property of electric , because critical current and voltage will be change during the occurrence of the external magnetic field. The result of experiment happened superconducting type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ with changing voltage more than superconducting type $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$,so that appropriate for applying the sensor magnetic field.

From case study superconducting type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.It can be develop to critical current and response to external magnetic field to have higher. By mixing Y_2BaCuO_5 with the right proportion in the process which can increase critical current and response to have higher external magnetic field.

คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสารที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงกันอย่างแพร่หลาย อย่างเช่นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีการศึกษาถึงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O และ Gd-Ba-Cu-O จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองชนิดนี้เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองชนิดนี้ ทำให้เราค้นพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ ก็คือ ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองชนิดนี้ ในปริภูมิพันธะฉบับนี้จึงได้ศึกษาถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อปริมาณกระแสวิกฤต และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน สภาวะการจำแม่เหล็กเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสารของทั้งสองชนิดเพื่อเปรียบเทียบกัน และจากการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O สามารถพัฒนาให้มีค่ากระแสวิกฤตและการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกให้มีค่าสูงขึ้นได้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
คำนำ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
ศัพท์เทคนิค.....	X
สัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	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).....	3
1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	4
1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect).....	4
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance).....	6
1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee Effect).....	7
1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	8
1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก.....	8
1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2	8
1.6 ขอบเขตงานวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	11
2.1 บทนำ.....	11
2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก.....	11
2.2.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect).....	11
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน.....	12
2.3 การจำสภาพแม่เหล็ก.....	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง.....	15
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	15
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	15
3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnace and Temperature control).....	16
3.1.4 ชุดบันทึกข้อมูลตราโซนิก.....	16
3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	17
3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	17
3.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	17
3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	18
3.3 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	20
3.3.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	20
3.3.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	21
3.4 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	22
3.5 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	23
3.5.1 สภาวะการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	25
3.6 การพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	26
3.6.1 การเตรียมสารเคมีของ Y_2BaCuO_5	26
3.6.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง Y_2BaCuO_5	27
3.6.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ ($Y_{123}:Y_{211}$)ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	28
3.6.4 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$	29
3.6.5 สภาวะการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$	29

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes.....	2
1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส.....	4
1.3 ปრაกฏการณ์ไมสเนอร์.....	6
1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน.....	7
1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	7
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 และ ข) ประเภทที่ 2.....	9
2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก และ ข) การดูดแม่เหล็ก.....	12
2.2 ชินสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	13
2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	13
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	13
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในขณะที่เกิดการจำ แม่เหล็กขึ้น.....	14
3.1 อุปกรณ์การเตรียมชินสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	15
3.2 เคาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	16
3.3 ชุดบัคกรี้อลตราโซนิก.....	16
3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	17
3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	19
3.6 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	21
3.7 ชินสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	22
3.8 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	22
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	23
3.10 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภาย นอกมากระทำ.....	24
3.11 แสดงแรงดันตกคร่อมชินสารเมื่อให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ.....	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ผลการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	25
3.13 กระบวนการสร้างมาตรฐานของ Y_2BaCuO_5	27
3.14 กระบวนการสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123:Y211)	28
3.15 ผลการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$	30



ตารางที่	สารบัญตาราง	หน้า
3.1	คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด.....	15
3.2	แสดงอัตราส่วนผสมกับค่ากระแสวิกฤต.....	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

กระแส	Current
แกดโดลิเนียมออกไซด์	Gadolinium Oxide
เกาส์	Gauss
ความเข้มข้นได้ทางแม่เหล็ก	Magnetization
ความเข้มข้นได้ในทางสูญญากาศ	Permeability of free space
ความเข้มข้นได้สัมพัทธ์	Relative Permeability
ความต้านทาน	Resistance
ความต้านทานเชิงลบ	Negative Resistance
ความหนาแน่นกระแสวิกฤต	Critical Current Density
ค่าวิกฤต	Critical Values
คอปเปอร์ออกไซด์	Copper Oxide
เครื่องบันทึกสองแกน	X-Y Recorder
เซรามิก	Ceramic
เซลเซียส	Celcius
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
ปรากฏการณ์ซิลสบี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	Meissner Effect
ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	Zero Resistance
แม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก	Ferromagnetic
แม่เหล็กไดอา	Diamagnetic
แรงดันไฟฟ้า	Voltage
สนามแม่เหล็กวิกฤต	Critical Magnetic Field
สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	Magnetic Susceptibility
สารแม่เหล็ก	Magnetic Substance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	wbm ⁻²
B _s	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้าขึงขวด	wbm ⁻²
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก	Am ⁻¹
H _c	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Am ⁻¹
H _{c1}	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง	Am ⁻¹
H _{c2}	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน	Am ⁻¹
I	กระแส	A
I _c	กระแสวิกฤต	A
J _c	ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต	Acm ⁻¹
M	สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก	Am ⁻¹
R	ความต้านทาน	Ω
T _c	อุณหภูมิวิกฤต	K
χ	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	-
μ ₀	ความซึมซับได้ในสุญญากาศ	Hm ⁻¹
μ _r	ความซึมซับได้สัมพัทธ์	-
ΔV	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

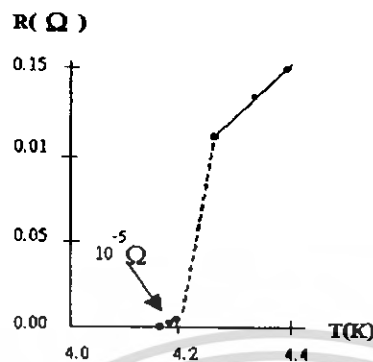
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือ ตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานภายในเป็นศูนย์ ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้โดยสะดวก จึงไม่เกิดความต่างศักย์และไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ดังที่ได้เกิดขึ้นในโลหะตัวนำทั่วไป จึงทำให้มีการปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์และช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาสร้างเป็นสายเคเบิลแทนโลหะ การใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนแท่งแม่เหล็กถาวร และใช้ทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จึงช่วยให้อุปกรณ์ต่างๆ มีขนาดเล็กลงและไม่มีการสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีกด้วย

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปกติในโลหะตัวนำโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานเกิดขึ้น ซึ่งนักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป นาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลวโดยใช้ปรอทเป็นวัสดุในการทดลอง

ปี ค.ศ. 1911 [1] นาย Heike Kamerlingh Onnes ได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำมากๆ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท (mercury, Hg) ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภานำไฟฟ้ายิ่งยวด และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c)

นอกจากนี้ นาย Onnes ยังพบสภานำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะชนิดอื่นๆ รวมทั้งโลหะผสมอีกหลายชนิด ทำให้นาย Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1913



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

หลังจากนั้นก็มึ้นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาสนใจและทำการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค้นหาคำนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิลดลงที่สูงกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ได้ค้นพบคำนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิลดลง 15 เคลวิน จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) และในปี ค.ศ. 1969 สามารถเพิ่มอุณหภูมิลดลงสูงขึ้นไปเป็น 20 เคลวิน และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลว (H) (จุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) ทำเป็นตัวหล่อเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้สำเร็จเป็นครั้งแรก

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองสารสตรอนเชียม (Sr) ปรากฏว่า อุณหภูมิลดลงมีค่าสูงถึง 54 เคลวิน จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. Chu ได้ทำการทดลองกับธาตุอิทเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิลดลงได้สูงขึ้นไปเป็น 95 เคลวิน ซึ่งสร้างความตื่นเต้นแก่วงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถที่จะใช้ในโคโรเจนเหลว (N) ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิลดลงของคำนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นาย C.W. Chu ทดลอง) เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งในโคโรเจนเหลว นี้มีราคาถูกมากและสามารถจัดเตรียมได้ง่ายกว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารคำนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มอิทเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) เรามักเรียกคำนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิลดลงสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาคำนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิลดลงสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าหมายไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำคำนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิลดลงหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องมีความหนาแน่นของกระแสวิกฤตที่สูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)

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

1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)

ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเป็นปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารนั้นเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสารหรือมีความต้านทานเกิดขึ้น เราจะเรียกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical Current: I_c)

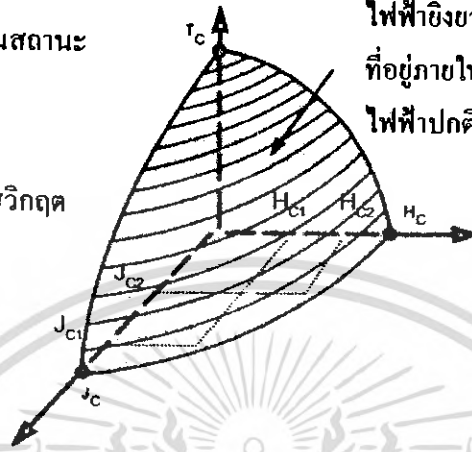
โดยทั่วไปการพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น มักจะพิจารณาในรูปของความหนาแน่นวิกฤต (Critical Current Density; J_c) ซึ่งความหนาแน่นกระแสวิกฤต คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤตกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน

อุณหภูมิ, T พื้นผิววิกฤต (วัสดุจะมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสำหรับค่า T , H และ J ที่อยู่ภายในพื้นผิวและจะมีสภาพนำไฟฟ้าปกติถ้าอยู่ภายนอกพื้นผิว)

T_c = อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ (อุณหภูมิวิกฤต)

H_c = สนามแม่เหล็กวิกฤต

J_c = ความหนาแน่นกระแสวิกฤต



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.2 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไบอัสให้กับซินซาร์ โดยมีปริมาณความหนาแน่นกระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต J_c เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ซินซาร์เป็น 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 Effect) และปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee Effect)

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามี่ค่าเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง นั่นคือ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ซึ่ง

เป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกล่าวคือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอา (diamagnetic) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect) ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 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)

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

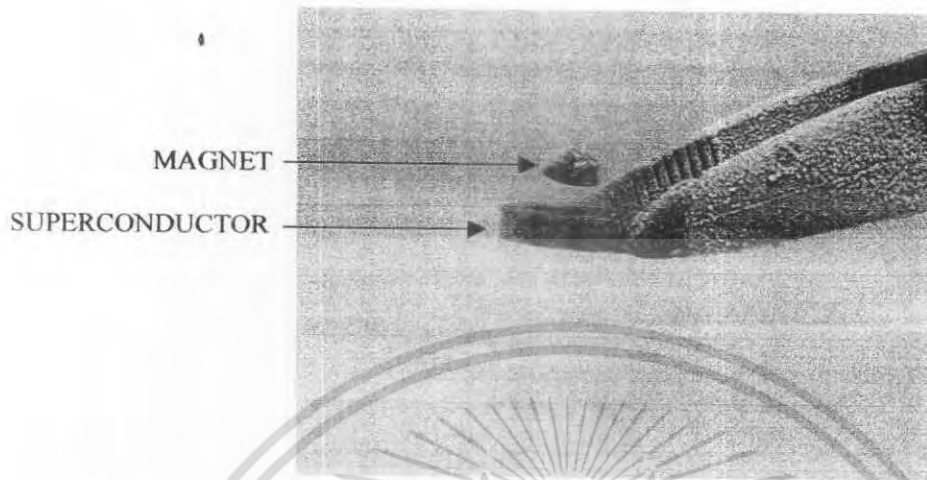
โดยที่	B	คือ	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(Magnetic flux density)
	H	คือ	ความเข้มสนามแม่เหล็ก(Magnetic field)
	M	คือ	สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)
	χ_m	คือ	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)
	μ_0	คือ	ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)
	μ_r	คือ	ความซึมซับได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability)

เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้ $B = 0$ ทำให้

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

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

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

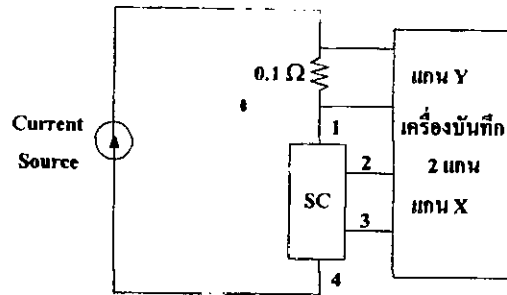


รูปที่ 1.3 ปรัชการณไมสนอร

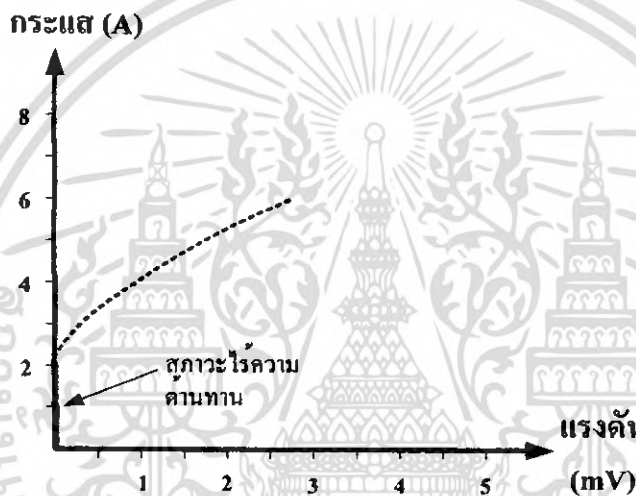
1.3.2 ปรัชการณไรความต้านทาน (Zero Resistance Effect)

ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อวางอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ชั้นสารนั้นจะมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น นั่นคือความต้านทานภายในชั้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่คกร้อมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชั้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชั้นสารได้ถูกแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตได้ว่า กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน y นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วขั้วนำไฟฟ้าที่ยังขดจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2 \text{ A.}$) จะทำให้เกิดมีแรงดันคคคร่อมขั้วขั้วหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วขั้วเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั้นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าที่ยังขดได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก [2]

การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีหนึ่ง คือการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_C) และอีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชิ้นสารจนกระทั่งมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต $H_C(T)$ ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิจะสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ที่อุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ $H_C(T_C) = 0$ สนามแม่เหล็กและอุณหภูมิวิกฤตมีความสัมพันธ์กันดังนี้

เมื่อ $T < T_C$ สนามแม่เหล็กภายนอก $H_a = 0$ เป็นสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด

$T < T_C$ สนามแม่เหล็กภายนอก $H_C > H_a > 0$ เป็นสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด

$T < T_C$ สนามแม่เหล็กภายนอก $H_a > H_C$ เสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จะเห็นได้ว่าในขณะที่ $T = T_C$ เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ($T = T_C$ ได้ $H_C = 0$) แต่ถ้า $T \ll T_C$ ต้องใช้สนามแม่เหล็กค่ามากๆ จึงจะทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้

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

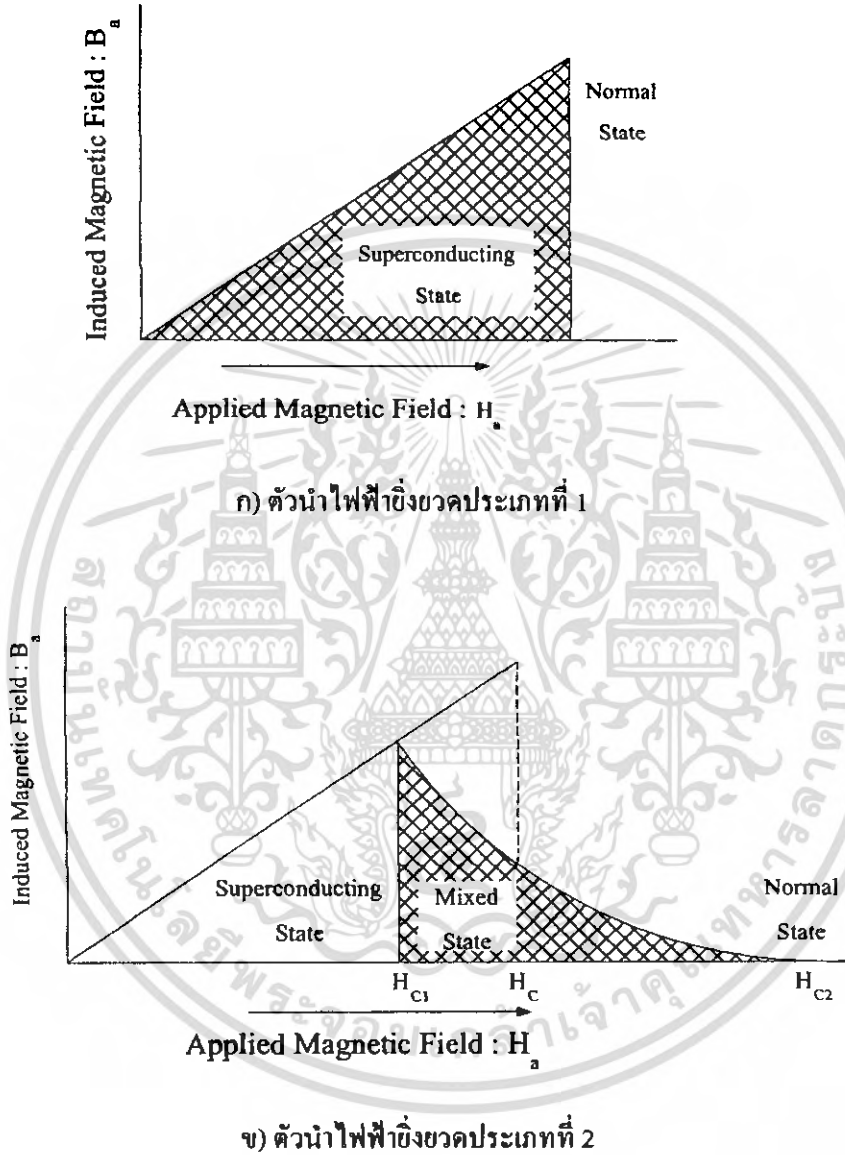
$H_C(0) =$ สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั่นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำให้เกิด Magnetization ขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ($M = -H_a$) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) และมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอะที่สมบูรณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์ 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 ความแตกต่างระหว่างตัวนำ

ไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กับประเภทที่ 2 อยู่ที่อุณหภูมิทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมสเนอร์(Meissner Effect)นั่นเอง



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_c) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสถานะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect) อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้ จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก H_{c1} หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า H_{c2} สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

1.6 ขอบเขตงานวิจัย

ในปริยายานี้นี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันได้แก่ กระบวนการสร้างพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก รวมถึงการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 3 เป็นการทดลองและผลการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 บทนำ

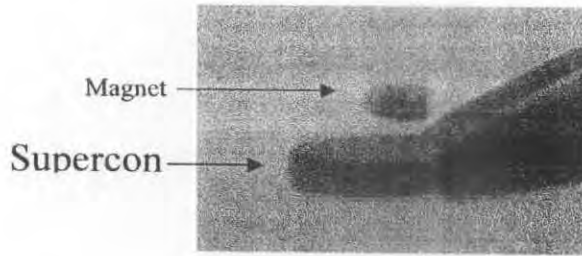
ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductor : LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor : HTSC) กันอย่างต่อเนื่อง ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y-Ba-Cu-O) และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Gd-Ba-Cu-O) แบบเซรามิก ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก

2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก

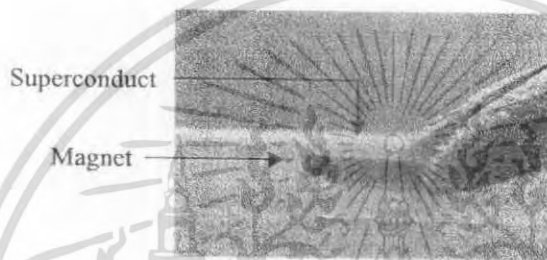
เป็นการวัดคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ มีดังนี้

2.2.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)

เป็นวิธีการทดสอบเมื่คสารว่าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยการนำเมื่คสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว(77 เคลวิน) ถ้าเมื่คสารมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ขึ้น โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเมื่คสารจากการทดสอบพบว่า



ก) การผลักแม่เหล็ก



ข) การดูดแม่เหล็ก

รูปที่ 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

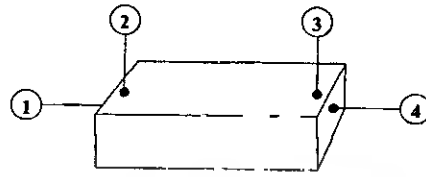
เม็ดสารมีการผลักแม่เหล็กให้ลอยขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้าน เพื่อมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เรียกว่า กระแสคงสภาพ (Persistent Current) ดังรูปที่ 2.1 ก) และที่น่าสนใจก็คือ บริเวณขอบของเม็ดสารบางส่วนมีการดูดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.1 ข) การที่บางส่วนของเม็ดสารมีการดูดแม่เหล็ก น่าจะมีสาเหตุมาจากสารแกสโคลิเนียมที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก [4]

2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

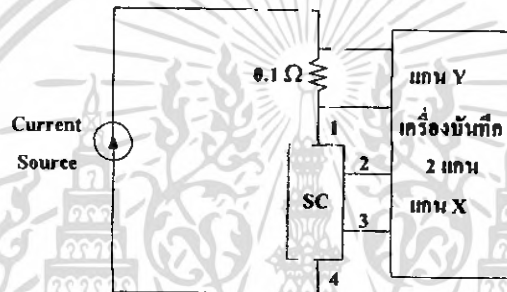
ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับชั่ว 2-3 นาที จะเป็นชั่วที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

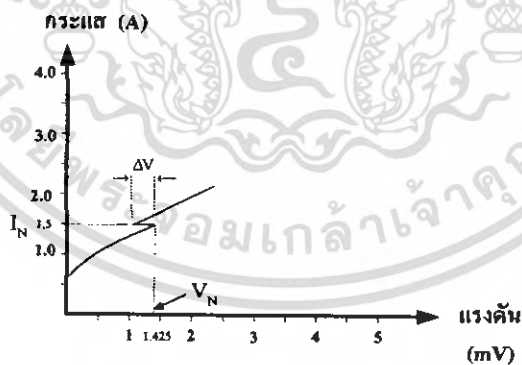
ครั้งหนึ่ง สำหรับเม็คสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่าน การตัดแต่งเม็คสารให้มีรูปทรงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



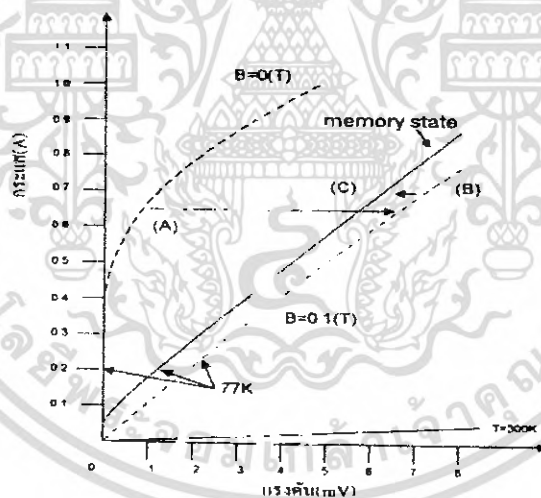
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

ในรูปที่ 2.4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า ยิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นซึ่งมีความ แตกต่างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ ความต้านทานเชิงลบที่วัดได้

เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกระแส (I_N) เท่ากับ 1.5 A และที่แรงดัน (V_N) เท่ากับ 1.425 mV ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) เท่ากับ 0.25 mV และจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ S

2.3 การจำสภาพแม่เหล็ก

ตามปกติเมื่อมีสนามแม่เหล็กปริมาณน้อยจากภายนอกมาตกกระทบชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะทำให้เกิดมีกระแสคงสภาพ (Persistent Current) และสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นเพื่อหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก แต่ถ้าปริมาณสนามแม่เหล็กมีค่าสูงๆจะทำให้เกิดมีแม่เหล็กตกค้างอยู่ในชั้นสารหรือเรียกว่าเกิดการแทรกแม่เหล็กขึ้น พิจารณารูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าขณะที่ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนตัวนำไฟฟ้าทั่วไปและสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 0.5 A แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่ชั้นสาร 0.1 T จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเป็นศูนย์ และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกพบว่าคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่กลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ โดยยังคงมีแรงดันตกคร่อมชั้นสารอยู่ซึ่งมากกว่าขณะก่อนให้สนามแม่เหล็ก แรงดันที่ตกค้างอยู่นี้เรากล่าวได้ว่า เกิดการจำสภาพแม่เหล็กขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในขณะที่เกิดการจำแม่เหล็กขึ้น

บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง,

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ซึ่งมีเนื้อสารเป็นแบบเซรามิก และเรื่องของการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สำหรับในบทนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบด้วย อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แกลโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยมีรายละเอียดของสารดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด

ชื่อสาร	ความบริสุทธิ์ของสาร
(Y_2O_3)	99.99%
(Gd_2O_3)	99.99%
($BaCO_3$)	99.99%
(CuO)	99.99%

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

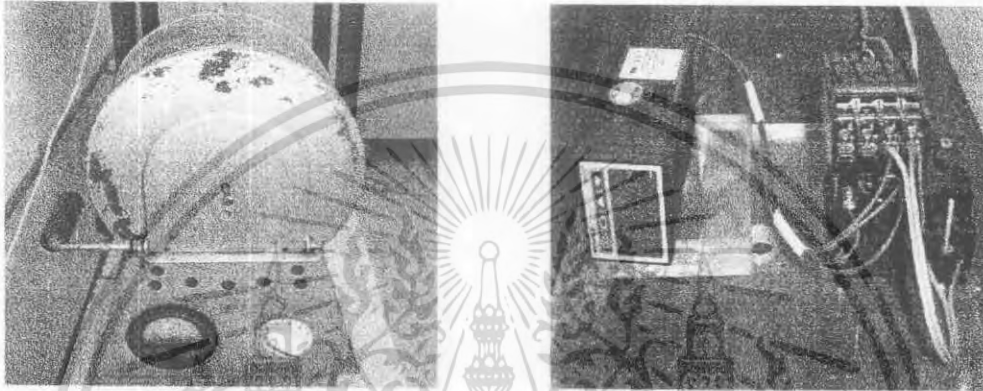


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnace and Temperature control)

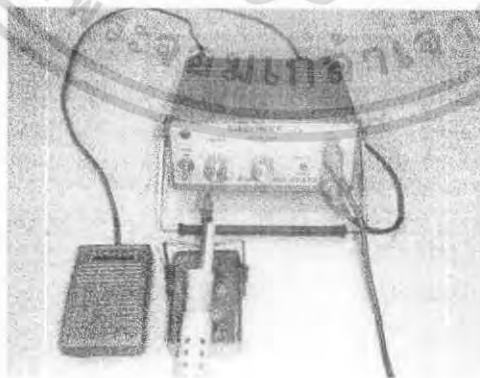
เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นเตาเผาชนิดความถี่สูงที่สามารถให้ความร้อนได้จนถึง 1,050 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในส่วนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ จะต่อร่วมกับเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค



รูปที่ 3.2 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1.4 ชุดบัคกรี้อัตราไซคลิก

เป็นชุดที่ใช้บัคกรี้อัตราไซคลิกขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่ตะกั่วบัคกรีจะมีส่วนผสมของอินเดียม ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ ในส่วนของชุดบัคกรี้อัตราไซคลิกจะมีการสั่นของหัวบัคกรี ซึ่งจะทำให้รอยต่อระหว่างตะกั่วบัคกรีและชิ้นสารมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อไอห์มมิก

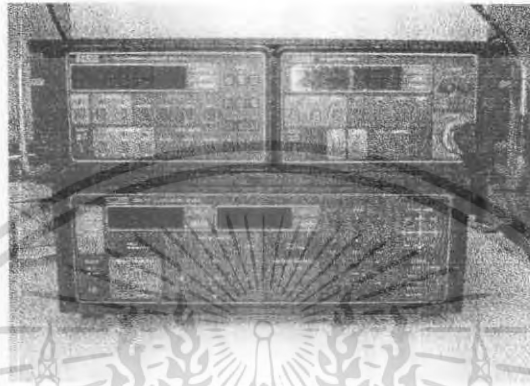


รูปที่ 3.3 ชุดบัคกรี้อัตราไซคลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constance current source) ซึ่งมี 2 ชุด คือ ชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-100 mA และชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-10 A รวมถึงนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nano voltmeter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำถึง 10 nV



รูปที่ 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

3.2.1 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 ปฏิกริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการ ได้ดังนี้



จากตารางธาตุจะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้ Y = 88.905 กรัม , Ba = 137.34 กรัม

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

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

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

$$\text{BaCO}_3 = 137.34 + 12.011 + (3 \times 15.99) = 197.348 \text{ กรัม/โมล}$$

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

การคำนวณจากสมการเคมี

1) Y_2O_3 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 225.807 กรัม

ถ้า ½ โมล ต้องเตรียมสาร = 112.9035 กรัม

2) BaCO_3 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม

ถ้า 2 โมล ต้องเตรียมสาร = 394.696 กรัม

3) CuO 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม

ถ้า 3 โมล ต้องเตรียมสาร = 238.635 กรัม

มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด = $112.9035 + 394.696 + 238.635$

$$= 746.2345 \text{ กรัม}$$

ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ = 746.2345 กรัม

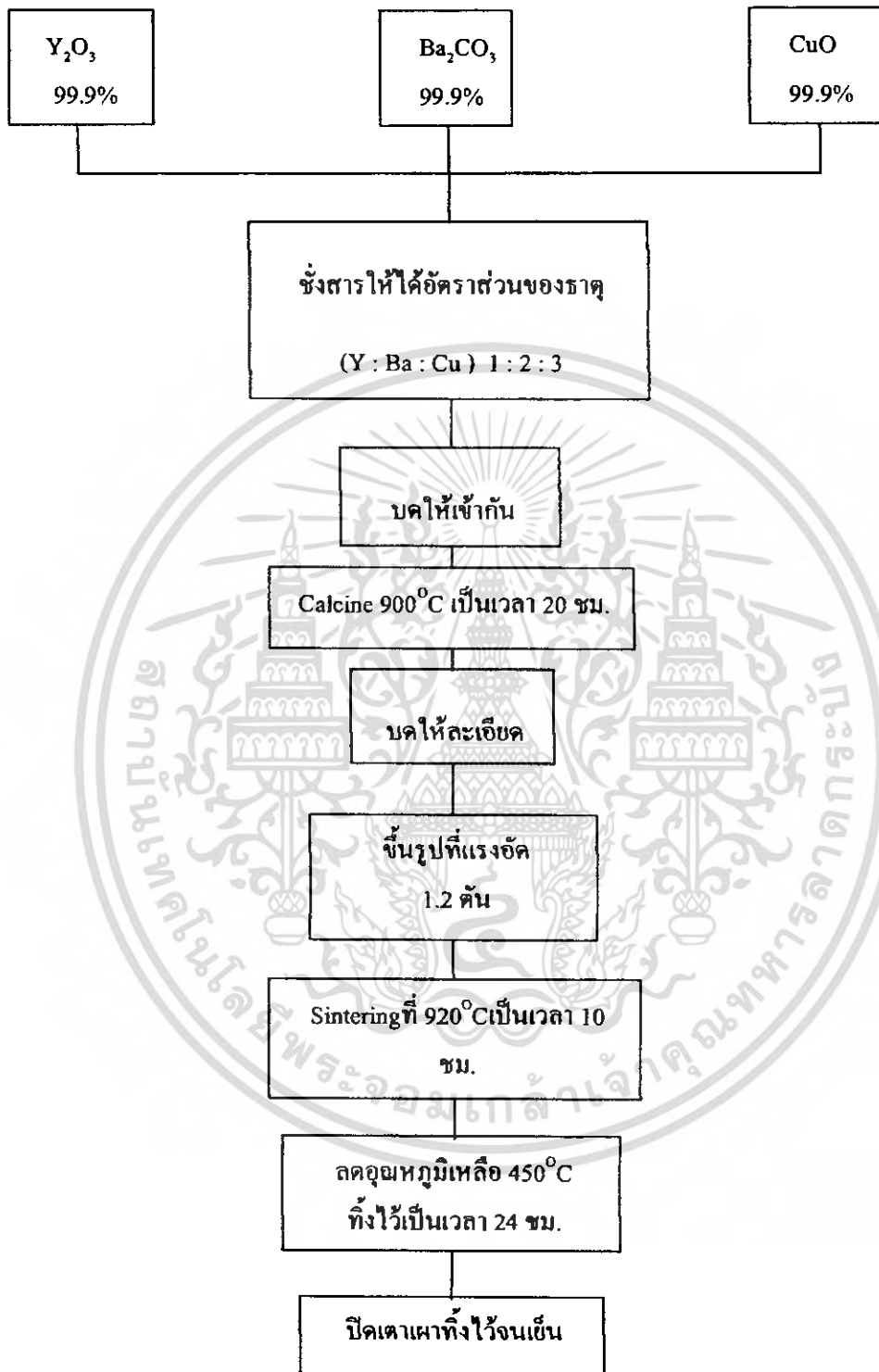
ปริมาณ x หมายถึง ปริมาณของออกซิเจนที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายค่าตามแต่การเกิดปฏิกิริยาเคมี จากสารตั้งต้นทั้งหมด 746.2345 กรัม ถ้าต้องการ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้อิทธิพลออกไซด์ 1.513 กรัม แมกนีเซียมคาร์บอเนต 5.289 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 3.198 กรัม

3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

ในขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการเผามาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

1. ชั่งสาร Y_2O_3 , BaCO_3 และ CuO โดยใช้อัตราส่วน Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้คั่วไล่ด้วยความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900°C ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่คาร์บอน
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1.2 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 920°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงเพื่อให้พันธะเคมีของสารที่อัดเม็ดยึดติดกันดีขึ้น
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ 450°C อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

3.3.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ แกลโคลิเนียม แบเรียม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ แกลโคลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งอัตราส่วนนี้ได้มีการวิจัยมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดี ซึ่งปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้งสาม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



จากสมการที่ 3.2 พบว่า อัตราส่วนโดยอะตอมของสารประกอบจะได้ $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3

จากตารางธาตุ จะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้ $Gd = 157.26$ กรัม, $Ba = 137.34$ กรัม, $Cu = 63.54$ กรัม, $O = 15.99$ กรัม

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

$$Gd_2O_3 = (2 \times 157.26) + (3 \times 15.99) = 362.49 \text{ กรัมต่อโมล}$$

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

$$CuO = 63.546 + 15.99 = 79.545 \text{ กรัมต่อโมล}$$

การคำนวณจากสมการเคมี

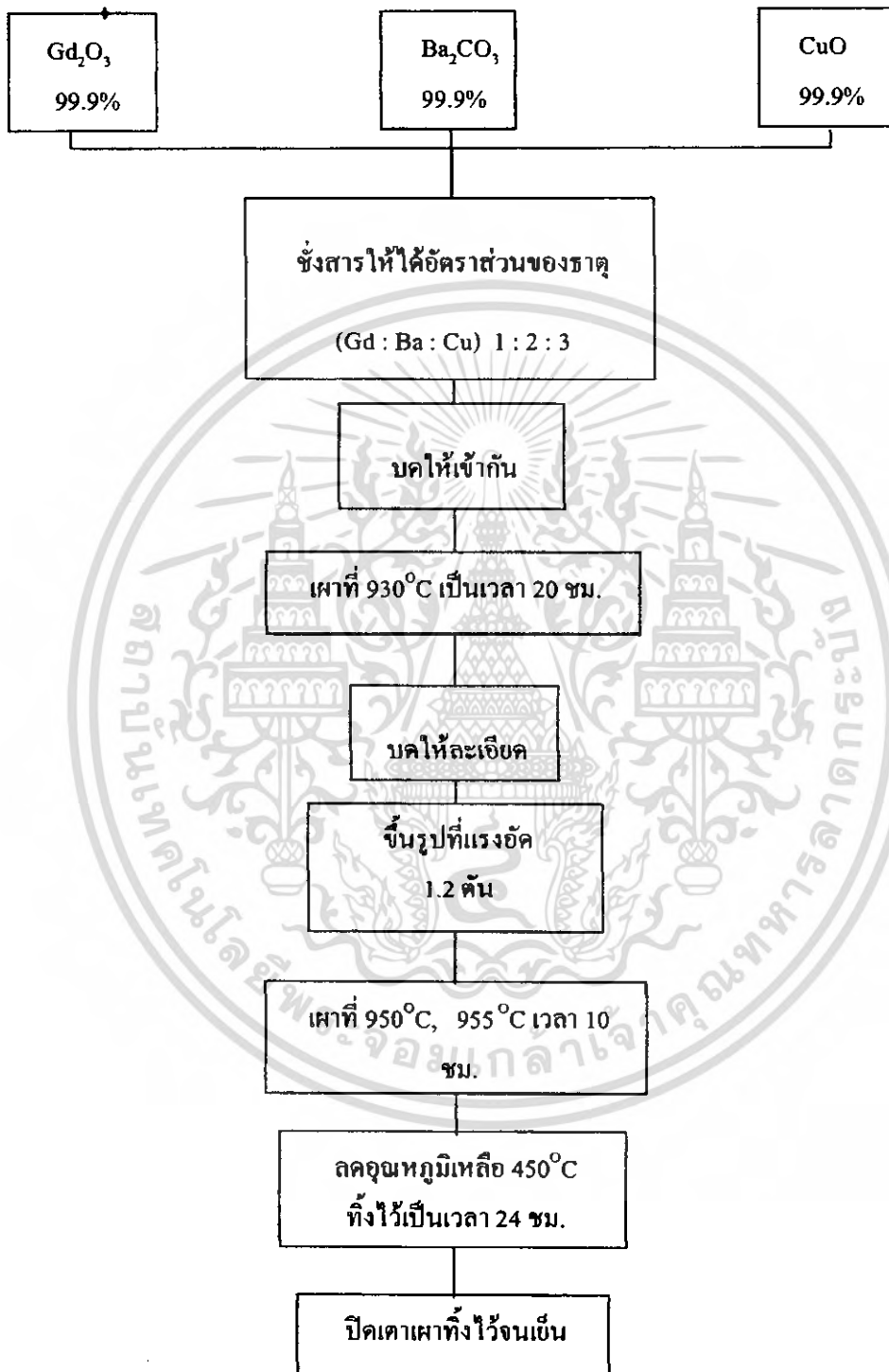
1) Gd_2O_3	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 362.49 กรัม
ถ้า	$\frac{1}{2}$	โมล	ต้องเตรียมสาร = 181.245 กรัม
2) $BaCO_3$	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม
ถ้า	2	โมล	ต้องเตรียมสาร = 394.696 กรัม
3) CuO	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม
ถ้า	3	โมล	ต้องเตรียมสาร = 238.635 กรัม

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด} &= 181.245 + 394.696 + 238.635 \\ &= 814.576 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร $GdBa_2Cu_3O_{7-x} = 814.576$ กรัม

จากสารตั้งต้นทั้งหมด 814.576 กรัม ถ้าต้องการ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้แกลโคลิเนียมออกไซด์ 2.225 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 4.845 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 2.929 กรัม

3.3.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$



รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_7$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

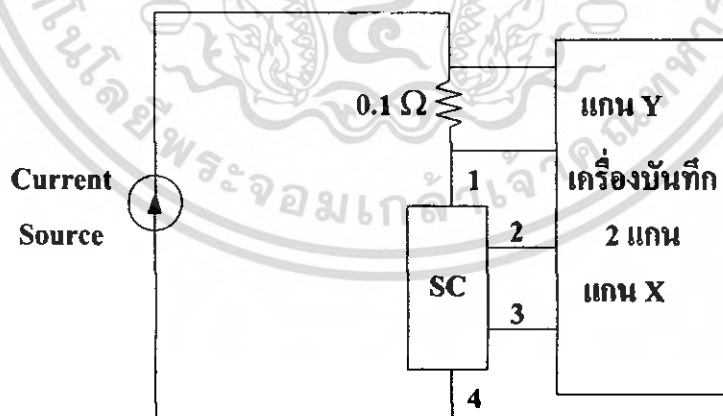
3.4 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

การทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 3.8 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเมดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเมดสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 3.8 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ แสดงค่าได้ดังนี้

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

ที่อุณหภูมิการเผา 920°C ได้ค่ากระแสวิกฤต $I_c = 0.65 \text{ A}$

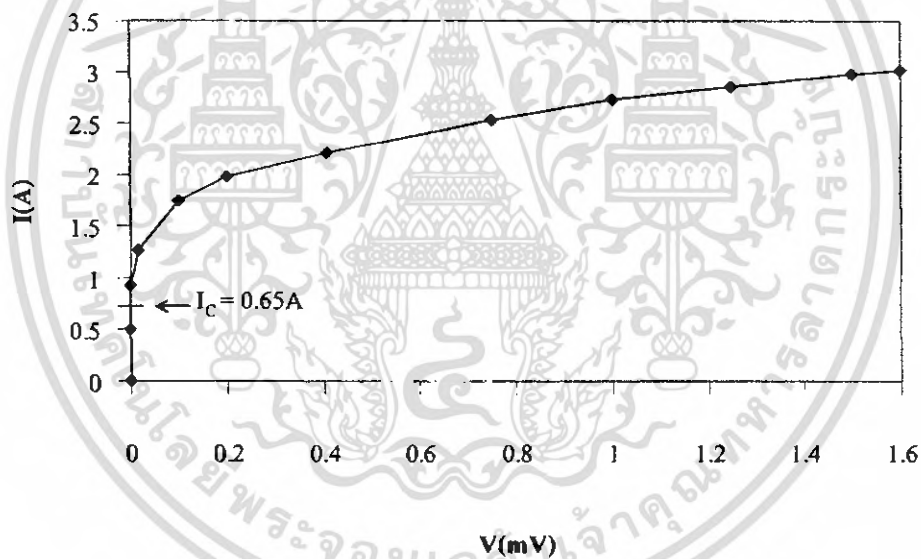
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

ที่อุณหภูมิการเผา 950°C ได้ค่ากระแสวิกฤต $I_c = 0.78 \text{ A}$

ที่อุณหภูมิการเผา 955°C ได้ค่ากระแสวิกฤต $I_c = 0.52 \text{ A}$

3.5 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

ในการทดลองวัดผลของสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น จะทำการวัดค่าโดยการป้อนไบอัสกระแสสลับที่มีค่าเท่ากับค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสาร โดยสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.9

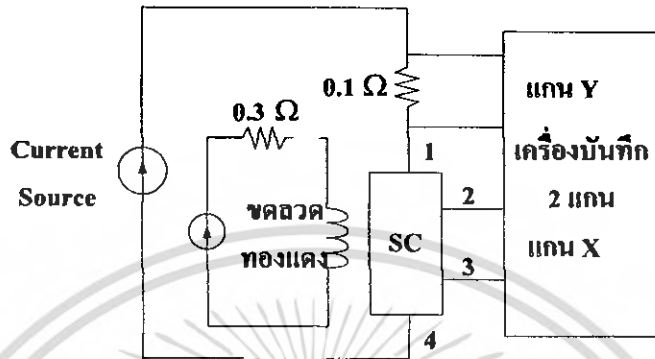


รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

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

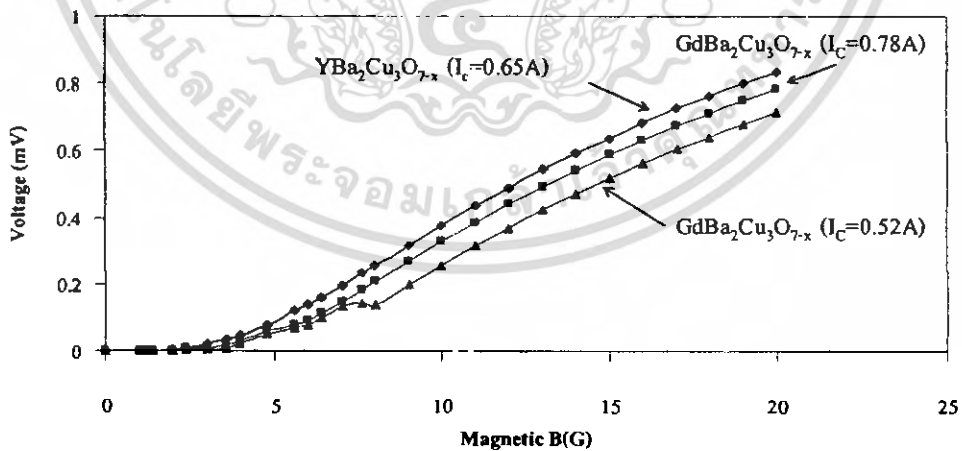
จากผลการทดลองในรูปที่ 3.9 เห็นได้ว่าเมื่อจ่ายกระแสให้กับชิ้นสาร ไม่เกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ชิ้นสารยังคงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ แต่เมื่อกระแสที่จ่ายให้ชิ้นสารเกินค่ากระแสวิกฤต ชิ้นสาร

เริ่มเสียดทานนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเราจะสังเกตได้จากมีแรงดันตกคร่อมชั้นสารเกิดขึ้นซึ่งเป็นค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ มีค่า $I_C = 0.65 \text{ A}$



รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

ส่วนวงจรที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3. 10 โดยมีขดลวดเป็นตัวป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชั้นสาร ซึ่งการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำการทดลองโดยการป้อนค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ให้กับชั้นสาร ในขณะที่ไบอัสกระแสให้กับชั้นสาร โดยมีค่าเท่ากับค่ากระแสวิกฤตของแต่ละชั้นสารนั้นแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3. 11

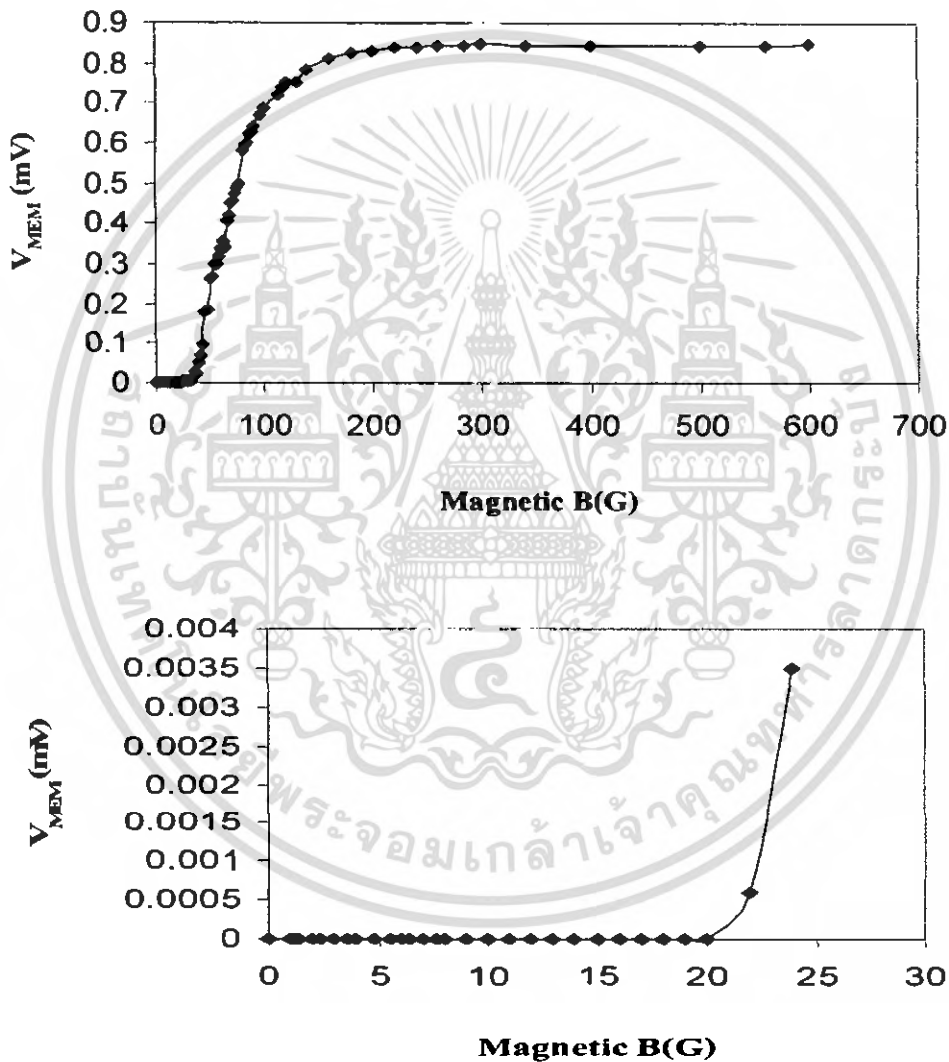


รูปที่ 3.11 กราฟแรงดันตกคร่อมชั้นสารเมื่อให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 3. 11 พบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ได้ดีกว่า $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ โดยสังเกตได้จากเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชั้นสารที่ค่าหนึ่งๆ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ จะมีค่าแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสารเพิ่มมากขึ้นกว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

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



รูปที่ 3.12 ผลการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรที่ใช้ในการทดลองการจำแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ยังคงใช้วงจรในรูปที่ 3. 10 โดยเราจะสังเกตสถานะการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกระแสวิกฤต ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 3. 12 ซึ่งพบว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเกินมากกว่า 20 G สถานะการจำแม่เหล็กเริ่มเกิดขึ้น โดยสังเกตได้จาก เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไป ยังคงมีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารอยู่ (V_{MEM}) และจะเริ่มเข้าสู่สถานะการอิมตัวเมื่อให้สนามแม่เหล็กเกินกว่า 200 G โดยดูได้จาก V_{MEM} จะเข้าสู่สถานะคงที่

3.6 การพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

3.6.1 การเตรียมสารเคมีของ Y_2BaCuO_5

สำหรับธาตุที่ใช้ในการสร้างตัว Y_2BaCuO_5 ชนิดนี้ประกอบด้วย อิทเทรียม แบเรียม และทองแดง ธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบ ดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันโดยใช้อัตราส่วนโดยอะตอม Y : Ba : Cu เป็น 2 : 1 : 1 อัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุดวิธีคำนวณ

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 | 2 | โมล | ต้องเตรียมสาร = 541.807 | 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 |

$$\text{มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด} = 541.807 + 197.348 + 79.545 = 728.7 \text{ กรัม}$$

ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร $Y_2BaCuO_5 = 728.7$ กรัม

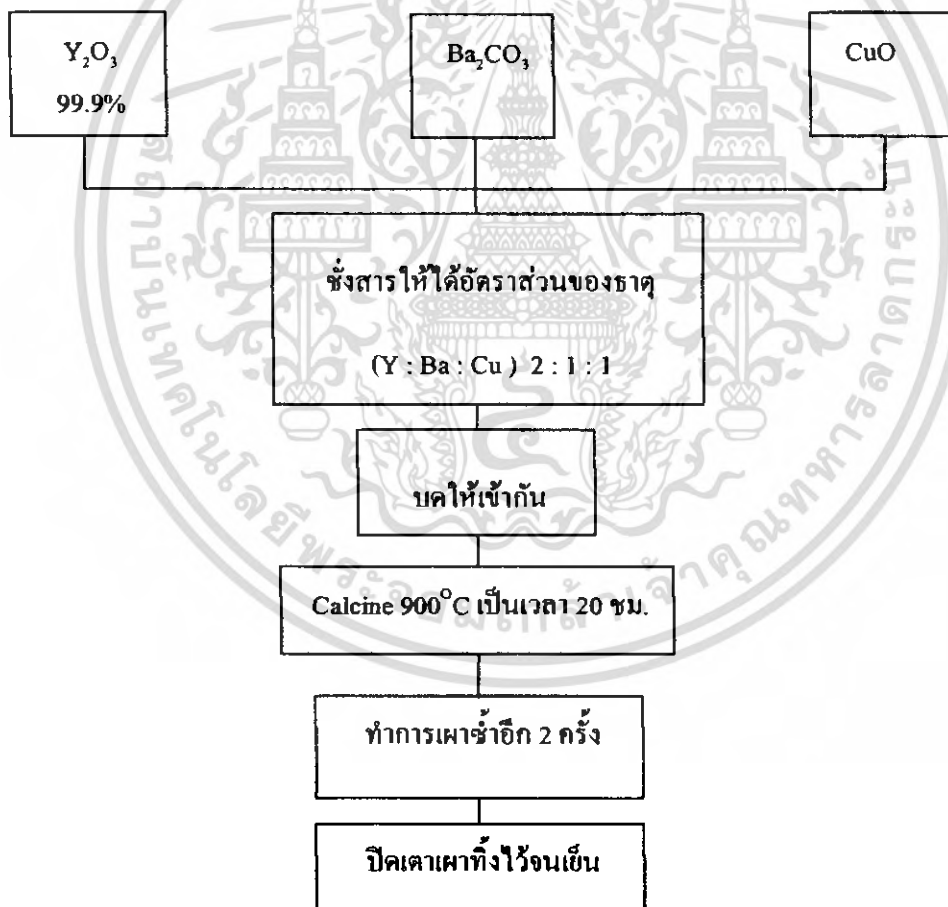
ปริมาณ x หมายถึง ปริมาณของออกซิเจนที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายค่าตามแต่การเกิดปฏิกิริยาเคมี

จากสารตั้งต้นทั้งหมด 728.7 กรัม ถ้าต้องการ Y_2BaCuO_5 ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้ อิทเทรียมออกไซด์ 7.435 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 2.708 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 1.092 กรัม

3.6.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง Y_2BaCuO_5

ในขั้นตอนกระบวนการสร้างที่จะกล่าวถึงนี้เป็นกระบวนการมาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

1. ชั่งสาร Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน Y : Ba : Cu เป็น 2 : 1 : 1
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ $940^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่คาร์บอนออกจากสารประกอบคาร์บอเนต
4. ทำการเผาซ้ำตามขั้นตอนที่ 3 อีก 2 ครั้ง



รูปที่ 3.13 กระบวนการสร้างมาตรฐานของ Y_2BaCuO_5

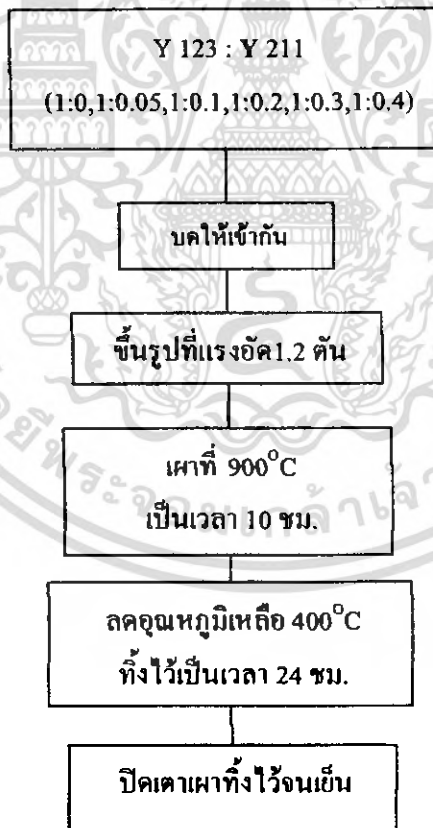
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$

(Y123:Y211) ที่อัตราส่วนต่างๆ

ในขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการเผา
มาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

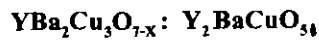
1. นำผงสาร Y123 และ Y211 ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาผสมกันในอัตราส่วน (Y123:Y211) 1:0, 1:0.05, 1:0.1, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4
2. นำสารมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง
3. นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1.2 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
4. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 920°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงเพื่อให้พันธะเคมีของสารที่อัดเม็ดยึดติดกันดีขึ้น
5. ลดอุณหภูมิลงเหลือ 450°C อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
6. ปิดเตาเผา



รูปที่ 3.14 กระบวนการสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Y_2BaCuO_5$ (Y123:Y211)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

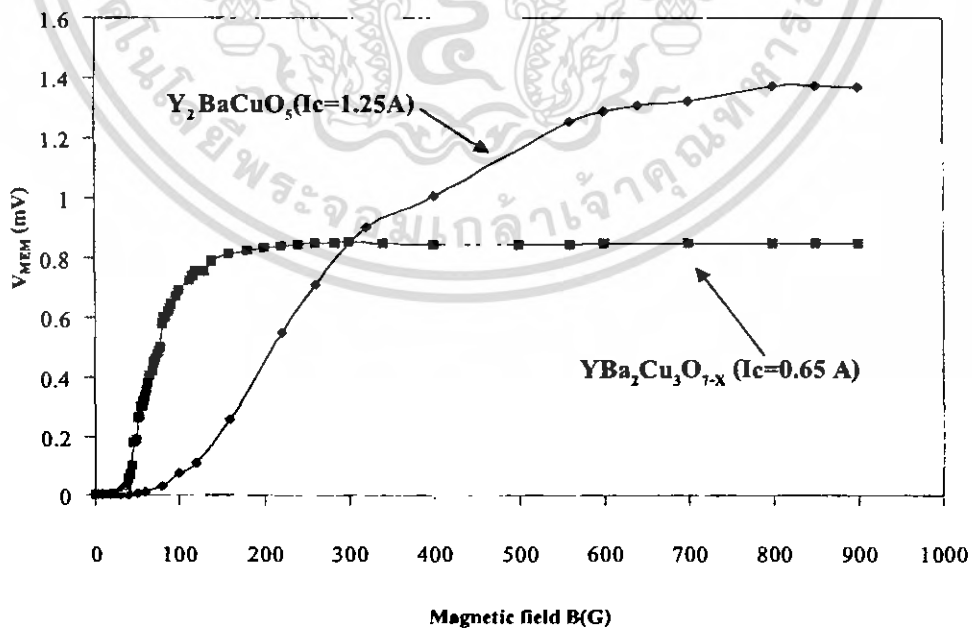
3.6.4 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด



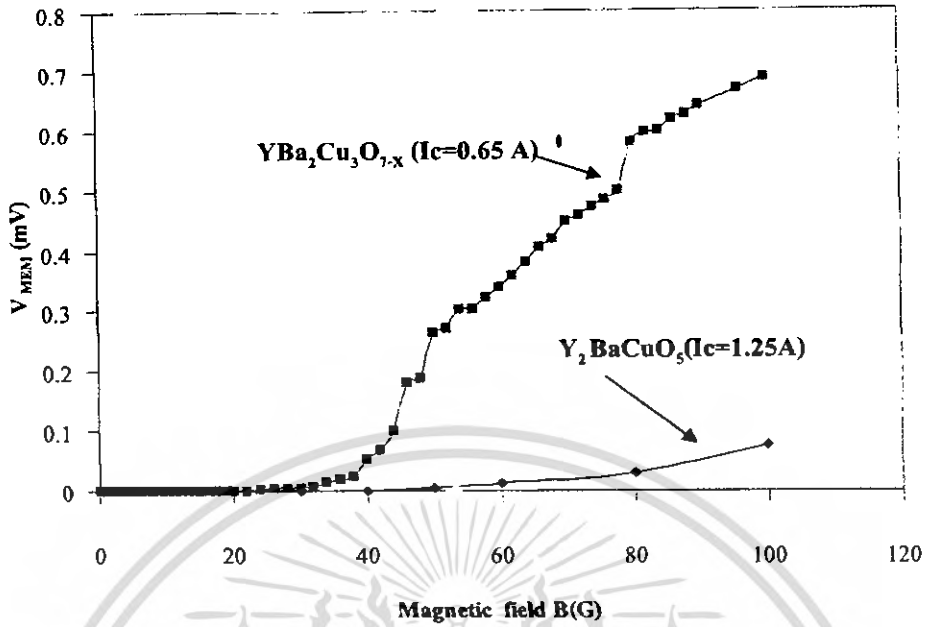
การทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรในรูปที่ 3.8 จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ แสดงค่าได้ดังนี้ ตาราง 3.2 แสดงอัตราส่วนผสมกับค่ากระแสวิกฤต

Y123:Y211	$I_c(\text{A})$
1:0	0.65
1:0.05	1.05
1:0.1	1.25
1:0.2	0.85
1:0.3	0.13
1:0.4	0.00

3.6.5 สถานะการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ผลการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$

สำหรับวงจรที่ใช้ในการทดลองการจำแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ ยังคงใช้วงจร ในรูปที่ 3. 10 โดยเราจะสังเกตสภาวะการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง กระแสวิกฤต ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 3. 15 ซึ่งพบว่า ชั้นสารชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ เมื่อให้ สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสาร เกินมากกว่า 20 G สภาวะการจำแม่เหล็กเริ่มเกิดขึ้น โดยสังเกตได้จาก เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไป ยังคงมีแรงดันคคร่อมชั้นสารอยู่ (V_{MEM}) และจะเริ่ม เข้าสู่สภาวะการอิมคิวเมื่อให้สนามแม่เหล็กเกินกว่า 200 G โดยดูได้จาก V_{MEM} จะเข้าสู่สภาวะคงที่ ชั้นสารชนิด Y_2BaCuO_5 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสาร เกินมากกว่า 40 G สภาวะการจำแม่เหล็กเริ่มเกิดขึ้น โดยสังเกตได้จาก เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไป ยังคงมีแรงดันคคร่อม ชั้นสารอยู่ (V_{MEM}) และจะเริ่มเข้าสู่สภาวะการอิมคิวเมื่อให้สนามแม่เหล็กเกินกว่า 640 G โดย ดูได้จาก V_{MEM} จะเข้าสู่สภาวะคงที่

สรุป

การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ให้ค่ากระแสวิกฤตที่ต่างกัน การจ่ายกระแสให้กับชั้นสาร ไม่เกินกว่าค่ากระแสวิกฤตชั้นสารยังคงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ โดยผลของสนามแม่เหล็กภายนอก จะทำการป้อนค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ให้กับชั้นสาร ในขณะที่ไบอัสกระแสให้กับชั้นสาร โดยมีค่าเท่ากับค่ากระแสวิกฤตของแต่ละชั้นสารนั้น แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร พบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ สามารถตอบสนองแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ได้ดีกว่าชนิด $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ สังเกตจากค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ เพิ่มขึ้นมากกว่าชนิด $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสารเกินมากกว่า 20 G สถานะการจำแม่เหล็กเริ่มเกิดขึ้น และจากการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ สามารถพัฒนาให้มีค่ากระแสวิกฤตและการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกให้มีค่าสูงขึ้นได้ โดยการผสม Y_2BaCuO_5 ในสัดส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการสร้าง ซึ่งสามารถเพิ่มค่ากระแสวิกฤตและการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้มากขึ้น โดยเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสาร Y_2BaCuO_5 เกินมากกว่า 40 G สถานะการจำแม่เหล็กเริ่มเกิดขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Daniel Hunt V. 1989. **Superconductivity Sourcebook**. New York : John Wiley & Sons.
2. คำรงค์ศักดิ์ มณีพงษ์สวัสดิ์. 2533. พิสูจน์ของแข็ง 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
3. Jha A.R. 1998. **Superconductor Tecnology**. New York: John Wiley & Sons.
4. Kasap S.O. 2000. **Principles of Electrical Engineering Materials and Devices**. : McGraw-Hill Companies.
5. Matsuda M., Kikuchi A , Maeda T., Ishii M., Iwai Y., Takata M. and Yamashith T. 1988. "Observation of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramic microstructure." **Jpn. J. Appl. Phys.** 27.L529-530.
6. Matsuda M., Kikuchi A , Ishii M., Takata M., Yamashith T and Okamoto S. 1988. "Processing and Superconducting Properties of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramics." **Jpn. J. Appl. Phys.** 27. L1439-1441.
7. นเรศ ชูชาดู "การควบคุมการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ " วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.