

การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

STUDY ON NEGATIVE RESISTANCE PHENOMENA IN Gd-Ba-Cu-O
SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIALS



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **50323**
วัน,เดือน,ปี **29 เม.ย. 2547**

b.....
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2545
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด
Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

STUDY ON NEGATIVE RESISTANCE PHENOMENA IN Gd-Ba-Cu-O
SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIALS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2545 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด
Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

STUDY ON NEGATIVE RESISTANCE PHENOMENA IN
Gd-Ba-Cu-O SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIALS

จัดทำโดย นาย ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์
นาย ปิยะบุตร ขวัญเมือง



ปริญญานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ..........อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.วิสุทธี ฐิติรุ่งเรือง)

วันที่ 2.../...4.../2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

นาย ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์ รหัสประจำตัว 43015209

นาย ปิยะบุตร ขวัญเมือง รหัสประจำตัว 43015216

รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งพบว่ามีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น โดยคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถควบคุมได้โดยกระบวนการสร้าง เช่น แรงอัดขณะขึ้นรูป อุณหภูมิการเผา เป็นต้น ส่วนสาเหตุของการเกิดคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ เนื่องจากสารแกดโดลิเนียม ซึ่งเป็นสารตระกูลเฟอร์โรแมกเนติก จึงทำให้มีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นและส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กนี้เองที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON NEGATIVE RESISTANCE PHENOMENA IN Gd-Ba-Cu-O
SUPERCONDUCTING CERAMIC MATERIALS

Mr.Songkiate Kittisontirak

Mr.Piyabut Khwanmuang

Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang (Advisor)

Educational Year 2002

Abstract

This project present about electric qualification of superconductor in the type of Gd-Ba-Cu-O That have negative resistance phenomena.

The qualification of negative resistance in superconductor is controlled by process e.g. pressure , temperature etc. And the negative resistance process emergecocour because of Gd , which are in ferromagnatic type consequently , based on these ferromagnatic type leads to negative resistance phenomena.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้ความรู้แนวทางการแก้ไขปัญหาและช่วยสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบพระคุณ คุณวิสิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรม ที่ให้ปรึกษาในการทำโครงการนี้และขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้กำเนิดและให้การสนับสนุนทั้งด้านกำลังทรัพย์และกำลังใจมาโดยตลอด

ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสารที่ใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงกันอย่างแพร่หลาย อย่างเช่นในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O จึงเกิดเป็นแนวคิดที่จะศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นๆอีก ที่กระบวนการสร้างไม่ค่อยซับซ้อน ซึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้ทำการศึกษาครั้งนี้ คือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งมีเนื้อสารเป็นเซรามิก จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ ทำให้พบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง คือ ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ซึ่งตามปกติทั่วไปแล้ว จะไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่น ในปริณิษยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแสของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O พารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ได้แก่ แรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	1
1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ	2
1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)	2
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 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect)	4
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)	5
1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)	6
1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	7
1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก	7
1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)	8
1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ	8
1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)	9
1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	10
2.1 บทนำ	10
2.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	10
2.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	10
2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา	11
2.3 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	13
2.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.5	แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด	
	Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก	16
2.5.1	แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	16
2.5.2	การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง	
	กระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก	18
2.5.2.1	การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า	
	โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	18
2.5.2.2	การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลอง	
	โครงสร้างมหภาค	20
บทที่ 3	การทดลองและผลการทดลอง	27
3.1	กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O	27
3.1.1	การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	27
3.1.2	ขั้นตอนกระบวนการเผา	28
3.1.3	การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	30
3.1.3.1	ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)	30
3.1.3.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน	31
3.2	ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	32
3.2.1	กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	
	ที่แรงอัดค่าต่างๆ	32
3.2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัดค่าต่างๆ	34
3.3	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	37
3.3.1	การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	37
3.3.2	กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเตรียมเม็ดสาร	38
3.3.3	ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)	38
3.3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	40
3.4	ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	44
3.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับกระแสวิกฤต	51
3.4.2.2 ความสัมพันธ์ของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับขนาด ของความต้านทานเชิงลบที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ	52
3.5 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O (1:2:3) ที่ผสมด้วย Gd-Ba-Cu-O (1:2:4)	53
3.5.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O (1:2:4)	53
3.5.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา	54
3.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	56
บทที่ 4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก.....	59
4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	59
4.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ.....	60
4.3 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	62
4.3.1 อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ.....	62
4.3.2 อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ.....	67
4.3.3 อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ.....	69
4.3.4 อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ.....	72
สรุปและวิจารณ์	77
เอกสารอ้างอิง	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes	1
1.2 แสดงความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส	3
1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	5
1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	6
1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	6
1.6 แสดงปรากฏการณ์ฮิลสบี	6
1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ และ ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ	8
1.8 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)	9
1.9 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)	9
2.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O	12
2.2 ซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	13
2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	13
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	14
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	15
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ	15
2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	17
2.8 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	17
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้าง มหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต	19
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้าง มหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต	20
2.11 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อ มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำที่กระแสไอส์เท่ากับหรือมากกว่ากระแสวิกฤต	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำที่กระแสไปน้อยกว่ากระแสวิกฤต	22
2.13 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B = 0$) ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต	23
2.14 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B1 = 4 \text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต	24
2.15 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B2 = 5.5 \text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต	25
2.16 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B3 = 9.4 \text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต	26
3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	29
3.2 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก และ ข) การดูดแม่เหล็ก	30
3.3 ซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	31
3.4 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	31
3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	34
3.6 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดในการขึ้นรูป 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน	32
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัด 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน	35
3.8 แสดงปริมาณกระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ	36
3.9 กราฟแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบที่แรงอัดค่าต่างๆ	36
3.10 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	37
3.11 กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเผาที่อุณหภูมิ 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส	38
3.12 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส	40
3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส	41
3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับกระแสวิกฤต	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ	42
3.16 กระบวนการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาต่างๆ	43
3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัด และอุณหภูมิการเผาต่างๆ	50
3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป ที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส	51
3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความต้านทานเชิงลบกับแรงอัด ที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส	52
3.20 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผสมด้วยผงสาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) ปริมาณ 2%, 5%, 10%, 15%, 20%	55
3.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อัตราส่วนการผสมสาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) ปริมาณ 0%, 2%, 5%, 10%, 15%, 20%	59
4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	59
4.2 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	60
4.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส.....	61
4.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 ตัน (930 องศาเซลเซียส) เมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ กระแสวิกฤต.....	63
4.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (930 องศาเซลเซียส).....	65
4.6 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (950 องศาเซลเซียส).....	68
4.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (970 องศาเซลเซียส).....	71
4.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (990 องศาเซลเซียส).....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

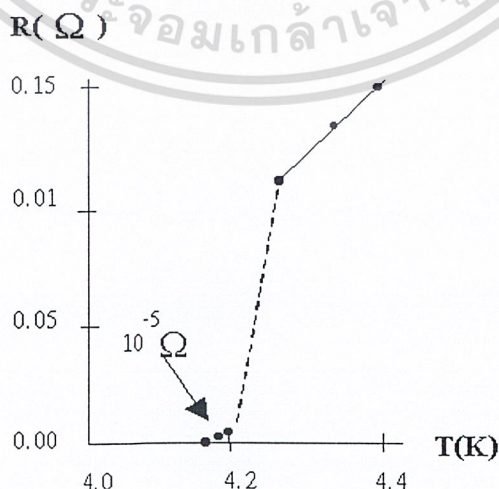
บทที่ 1

บทนำ

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือ ตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดี จึงไม่ทำให้เกิดแรงดันและไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นในโลหะตัวนำทั่วไป จึงมีการพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้สามารถไปใช้ประโยชน์และช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ให้มีความก้าวหน้ามากขึ้น ตัวอย่างเช่น การนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปสร้างเป็นสายเคเบิลแทนกราสร้างด้วยโลหะ การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนแม่เหล็กถาวร และใช้ทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ขึ้น จึงทำให้อุปกรณ์ต่างๆ มีขนาดเล็กลงและไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีกด้วย

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1911 [1] โดยนาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ซึ่งทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำมาก พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท (Hg, mercury) ลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และเรียกสภาวะนี้ว่า สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเรียกอุณหภูมิต่ำทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (T_c Critical temperature)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ารูปที่ 1.1 ก็กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลอง

ของ Heike Kamerlingh Onnes

นอกจากนี้ นาย Onnes ยังค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะชนิดอื่นอีก รวมทั้งโลหะผสมอีกหลายชนิด ทำให้ นาย Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1913

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

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการทดลองสารสตรอนเทียม (Sr) ทำให้ อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงขึ้นถึง 54 เคลวิน จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. ยังได้ทำการทดลองกับธาตุอิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95 เคลวิน ซึ่งสร้างความตื่นเต้นแฉ่งวงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถที่จะใช้ในไฮโดรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งในไฮโดรเจนเหลวนี้มีราคาถูกและสามารถเตรียมได้ง่ายกว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มอิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) เราเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า HTSC และหลังจากนั้นก็มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยเป้าหมายคือจะพัฒนาตัวนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวิน

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับ ค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ซึ่งค่าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารแต่ละชนิด ในทางปฏิบัติเราต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตและค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูง เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (T_c Critical Temperature)

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ยังทำให้สารยังคงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ โดยทั่วไปวัสดุต่างๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{3}{4} T_c$ นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง โดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า T_c เข้าใกล้ 100 K เช่น $T_c \approx 95$ K ก็จะสามารถนำสารไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้าเราต้องการนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ชิ้นสารนั้นต้องมีอุณหภูมิวิกฤต มากกว่า 400 K อันเป็นสิ่งที่ต้องการและกำลังวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิรูปเทคโนโลยีต่อไป

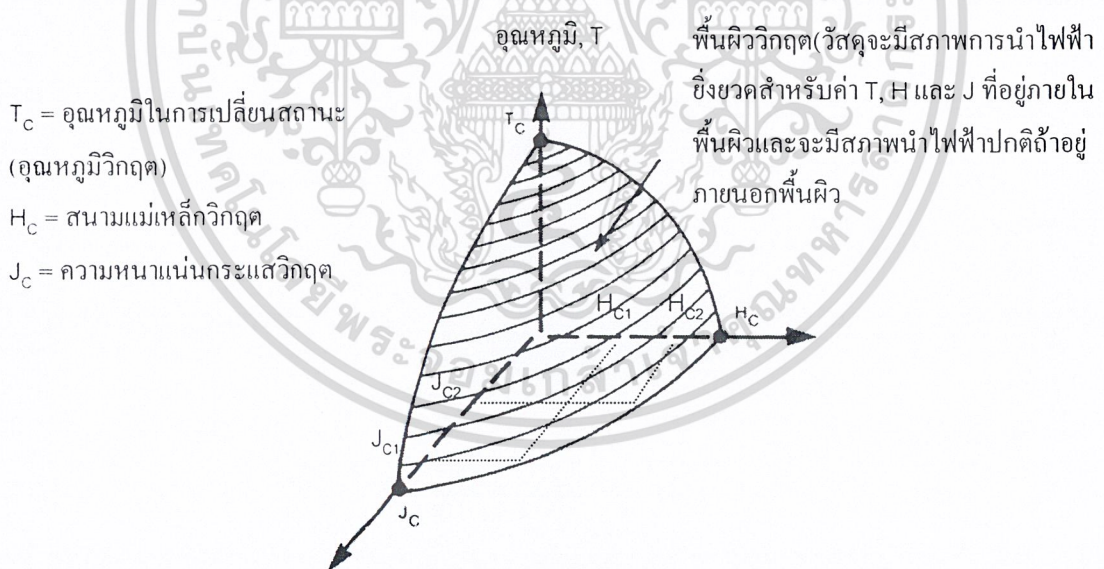
1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (H_C : Critical Magnetic Field)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กจะทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (H_C : Critical Magnetic Field)

1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (J_C : Critical Current Density)

สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อมีป้อนกระแสไฟฟ้าในปริมาณเพียงพอที่จะทำให้ชิ้นสารนั้นเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสารขึ้น หรือมีความต้านทานนั่นเอง เราจะเรียกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้ว่า กระแสวิกฤต (I_C : Critical Current)

การพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น จะพิจารณาในรูปของความหนาแน่นวิกฤต (J_C : Critical Current Density) ซึ่งความหนาแน่นกระแสวิกฤต คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤตกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน



รูปที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 ถ้าพิจารณาขณะป้อนกระแสให้กับชิ้นสาร โดยปริมาณความหนาแน่นกระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต J_c เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเป็น H_1 ค่า J_c จะมีขนาดลดลงเป็น J_{c1} และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น H_2 ค่า J_c ก็จะลดลงเหลือ J_{c2} แสดงว่า ค่าสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลง หรือก็คือ สนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลาย ทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปรากฏการณ์สำคัญที่แสดงถึงสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของวัสดุหรือสารต่างๆ ได้แก่ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance) และปรากฏการณ์ซิลบี (Silsbee Effect)

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็ก คือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77 K

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

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

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

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

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 คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

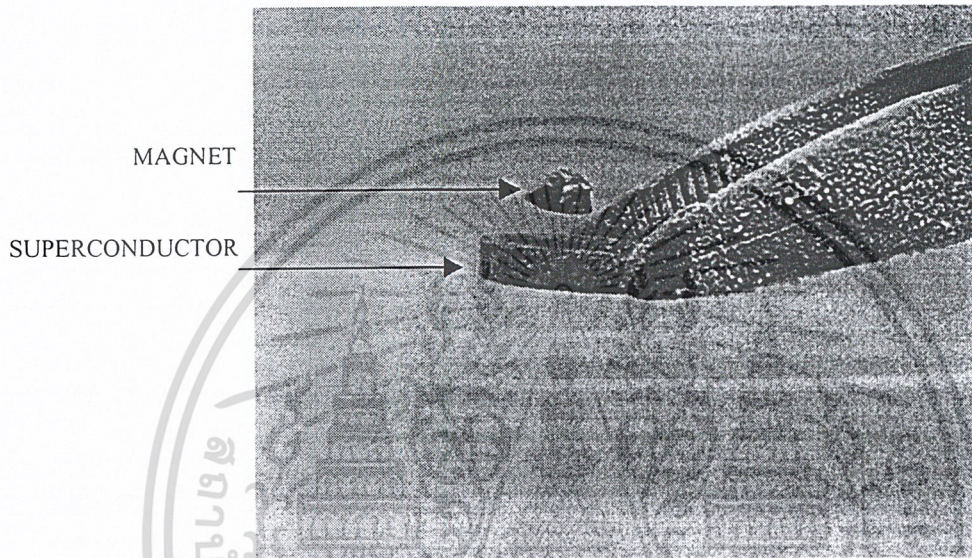
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้ $B = 0$ ทำให้

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

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

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

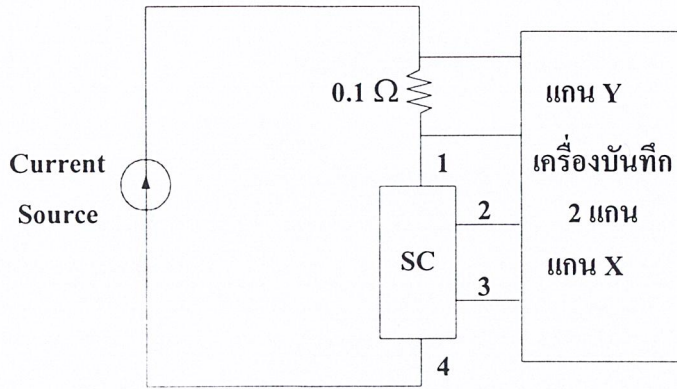


รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์

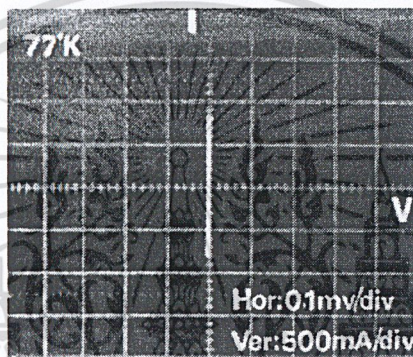
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_C) ชิ้นสารนั้นจะยังคงมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ ความต้านทานภายในชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ สามารถแสดงโดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชิ้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่งในขณะที่ทำการทดลองชิ้นสารอยู่ภายในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตเห็นว่า กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน y นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



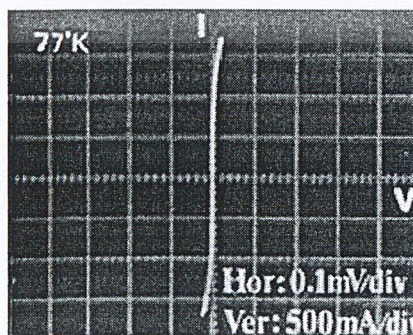
รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 ปรากฏการณ์ซีลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกินค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2$ A.) ให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้นนั่นเอง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซีลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อมีกระแสไหลเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั้นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้ แสดงดังรูป 1.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 1.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ซีลสบี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก

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

เมื่อ	$T < T_C$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a = 0$	เป็นสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด
	$T < T_C$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_C > H_a > 0$	เป็นสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด
	$T < T_C$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a > H_C$	เสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

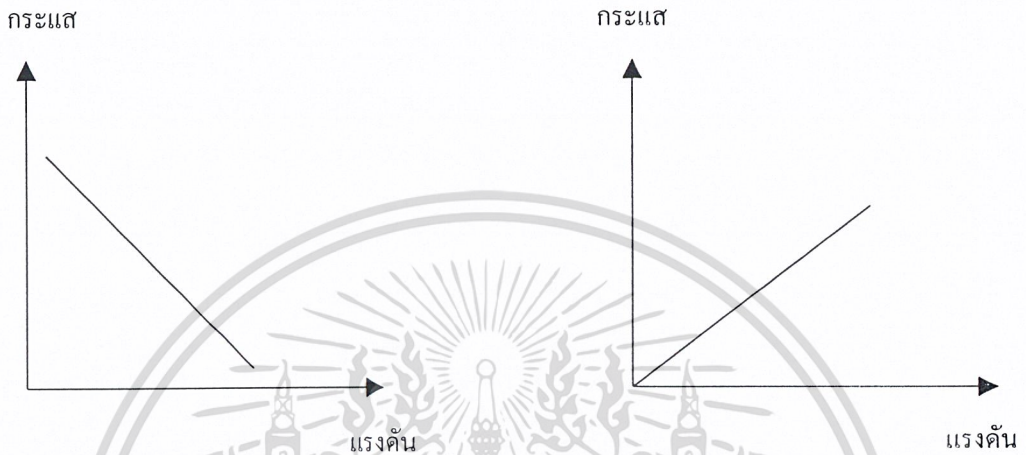
$$H_C(T) = H_C(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

เป็นความต้านทานที่กระแสไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน
 ก) ชนิดความต้านทานเชิงลบ
 ข) ชนิดความต้านทานเชิงบวก

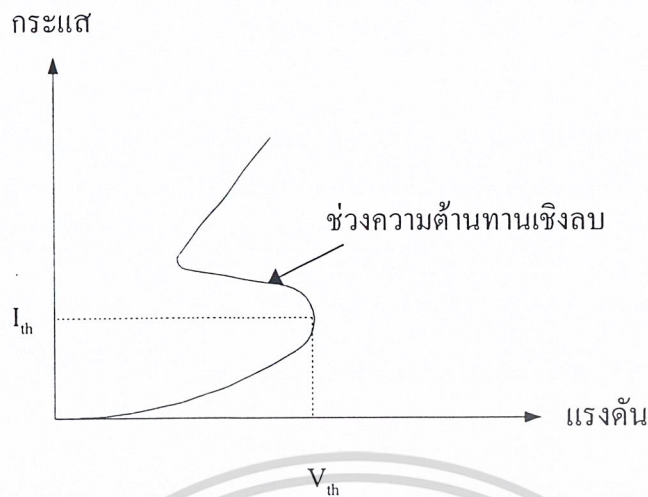
1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

ความต้านทานเชิงลบแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)

ความต้านทานเชิงลบแบบ S จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษรตัว S ดังรูปที่ 1.8 ความต้านทานเชิงลบแบบ S นี้เกิดได้โดยการควบคุมด้วยกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแสมีค่าเท่ากับกระแสวิกฤต I_{th} (Threshold current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบนี้ขึ้น จึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current controlled negative resistance (CCNR) ซึ่งจะพบในอุปกรณ์ดังนี้ Silicon-Controlled-rectifier (SCR), Uni-Junction Transistor (UJT) เป็นต้น

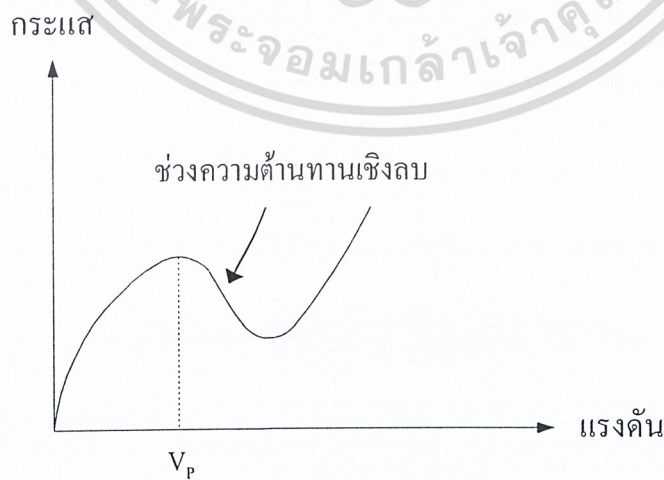
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.8 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)

ลักษณะของความต้านทานเชิงลบแบบ N จะมีลักษณะคล้ายกับตัวอักษรตัว N ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ เกิดได้โดยการควบคุมด้วยแรงดัน โดยแรงดันต้องมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง (Peak Voltage) จึงเรียกความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ว่า Voltage controlled negative resistance (VCNR) ซึ่งจะพบใน Tunnel diode เป็นต้น



รูปที่ 1.9 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีค้นคว้าเพื่อพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (LTSC : Low Temperature Superconductor) และแบบอุณหภูมิสูง (HTSC : High Temperature Superconductor) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเส้นลวด พิล์มหนาและฟิล์มบาง เป็นต้น ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตค่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง $10^3 - 10^7$ A/cm² ทำให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานทางด้านไฟฟ้ากำลัง และด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์

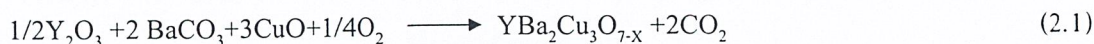
ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBa₂Cu₃O_{7-x} (Y-Ba-Cu-O) แบบเซรามิก ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ และยังใช้อุณหภูมิในการเผาไม่สูงมากซึ่งใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก

2.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBa₂Cu₃O_{7-x}

2.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBa₂Cu₃O_{7-x}

สำหรับธาตุที่ใช้ในการสร้าง YBa₂Cu₃O_{7-x} ประกอบด้วย อิทเทรียม แบเรียมและทองแดง ธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบ ดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ (Y₂O₃) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำมาบดผสมกันโดยใช้อัตราส่วนโดยอะตอม Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 โดยอัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุด

ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้



โดยมวลอะตอมของธาตุต่างๆ มีดังนี้ Y = 88.905 กรัม , Ba = 137.34 กรัม Cu = 63.546 กรัม , C = 12.011 กรัม , O = 15.99 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	$\frac{1}{2}$	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

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

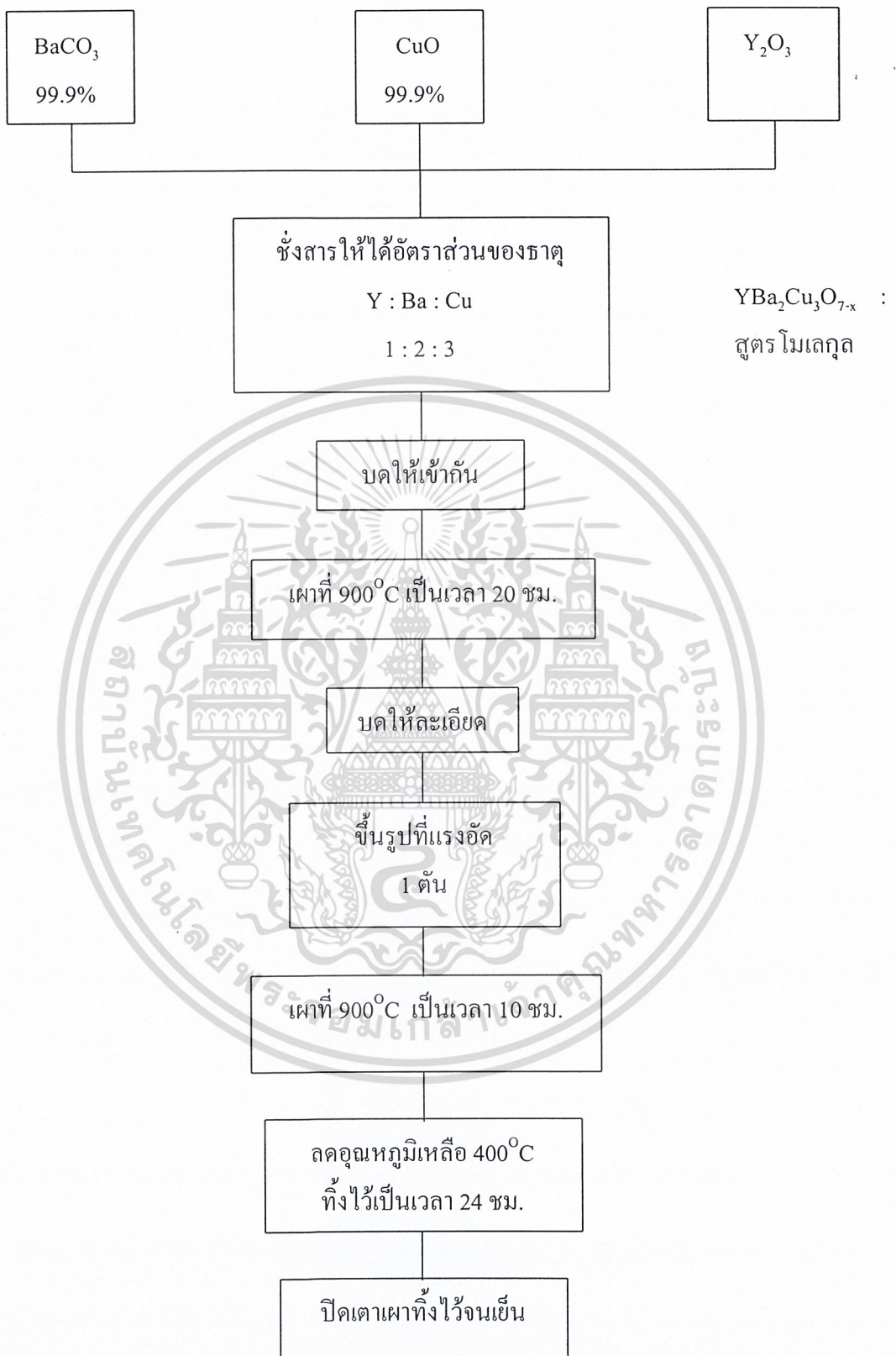
ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ = 746.2345 กรัม

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

2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

1. ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Y : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ ควอไซต์
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป (ซึ่งส่วนสีเขียวเกิดขึ้นจากการบดผสมที่ไม่ได้อัตราส่วน) จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ Sintering
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ $400^\circ C$ อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อ ป้องกันไม่ให้โครงสร้างภายในเนื้อ

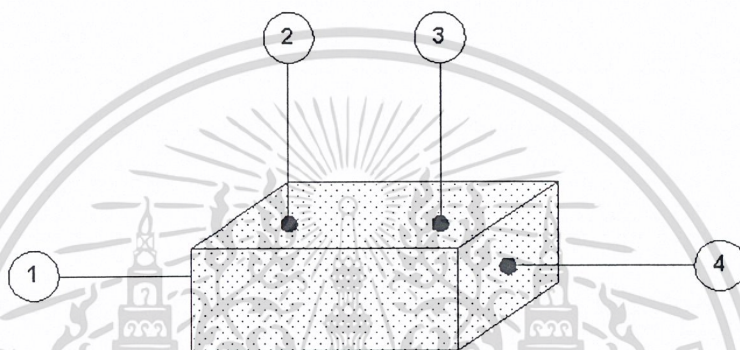
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ก็ตาม ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



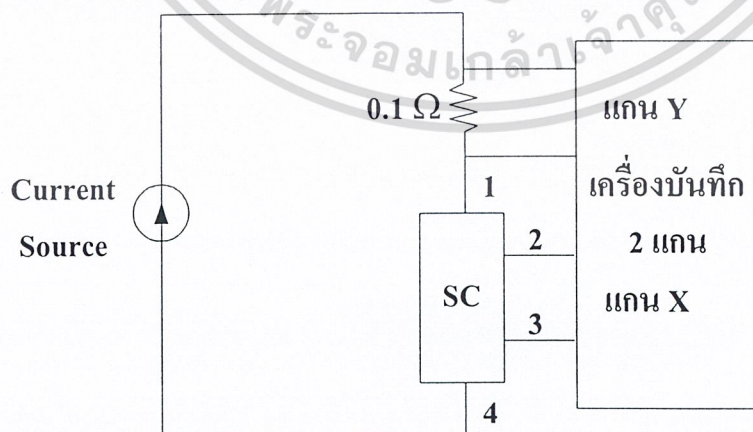
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

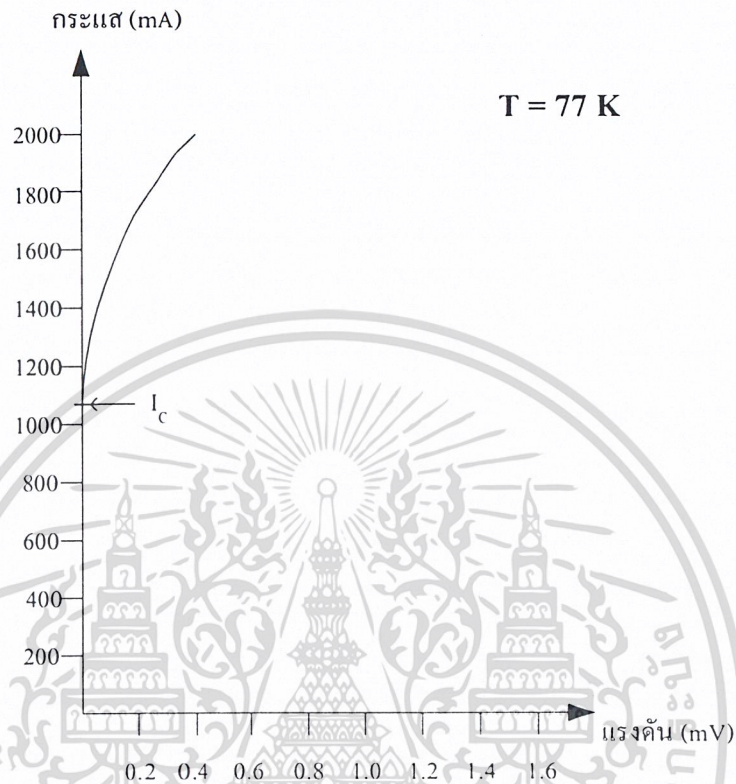
โดยนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการแล้ว นำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรง ดังรูป 2.2 จากนั้นนำชิ้นสารไปทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 โดยที่กระแสจะไหลเข้า-ออก จากชิ้นสารที่ขั้ว 1 และ 4 ตามลำดับ และวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 2 และ 3 ในขณะที่ทำการทดลอง ชิ้นสารจะแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว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



รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

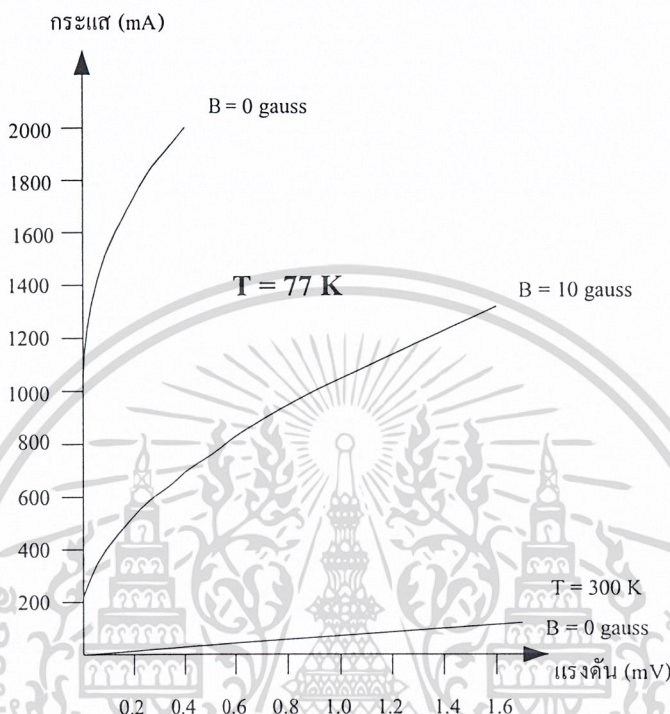
จากกราฟจะเห็นกระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวามีค่าเท่ากับ 1.08 A. ดังนั้นถ้าป้อนกระแสเกินกว่า 1.08 A. ชิ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเกิดขึ้น ดังรูป 2.4

2.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

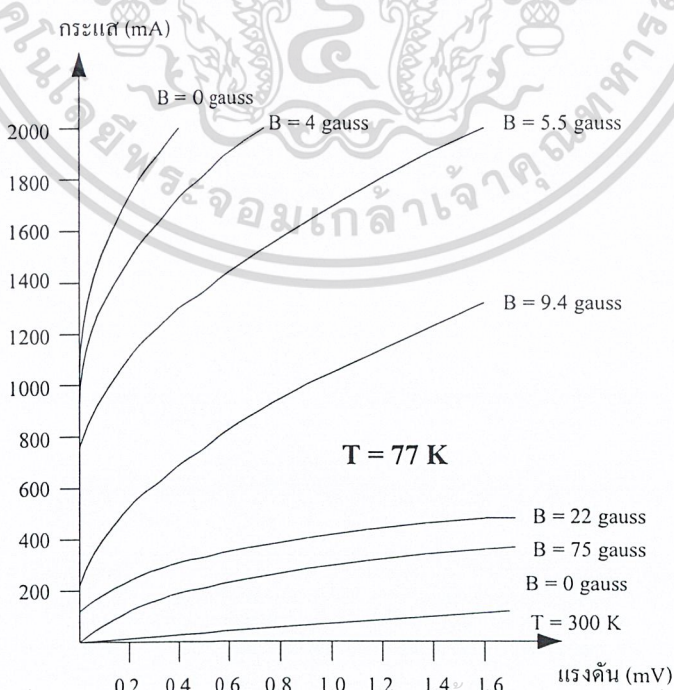
จากการสังเกตปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect) พบว่าสาเหตุที่ทำให้ชิ้นสารเสียสภาพนั้นเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชิ้นสาร เป็นตัวเข้าไปทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น หรือเกิดความต้านทานไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง ซึ่งในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราจะใช้วงจรดังรูป 2.3 โดยแสดงผลการทดลองลงบนเครื่องบันทึกสองแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่า ขณะที่ตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งอยู่ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) จะมีคุณสมบัติเหมือนตัวต้านทานแต่เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิต่ำ 77 K ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้ประมาณ 1.08 แอมแปร์ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามา 10 gauss จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเหลือประมาณ 200 มิลลิแอมป์



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าที่ยวดยิ่งเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวขึ้นเดิมที่อุณหภูมิ 77 K แต่ให้สนามแม่เหล็กค่าต่างกัน ผลที่ได้แสดงดังรูป 2.6 แสดงว่า เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าลดลง

สามารถสรุปถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาวได้ดังนี้ พิจารณาจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าชั้นสารที่อุณหภูมิ 300 K นั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาว แต่กลับแสดงคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานค่าต่ำๆ แต่เมื่อชั้นสารอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T_c = 92$ K) อย่างเช่นที่อุณหภูมิ 77 K ชั้นสารจะแสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาว จะเห็นได้ว่า ตอนป้อนกระแสให้กับชั้นสารต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (ต่ำกว่า 1.08 แอมป์แปร์) จะไม่มีความต้านทานเกิดขึ้น แต่เมื่อป้อนกระแสสูงกว่ากระแสวิกฤต (สูงกว่า 1.08 แอมป์แปร์) ชั้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจึงทำให้เกิดความต้านทานขึ้น เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชั้นสารเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวทำให้เกิดความต้านทานขึ้นจึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชั้นสาร

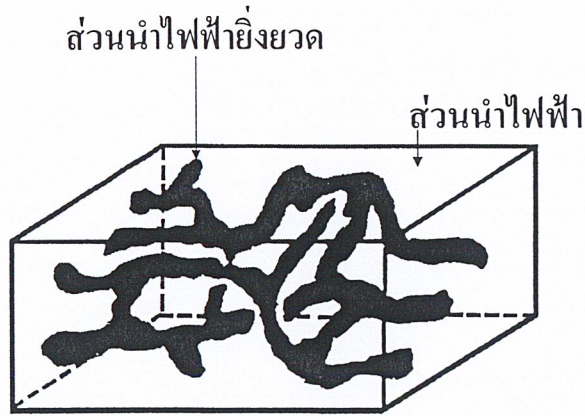
จากแนวความคิดที่ว่าสนามแม่เหล็กเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาว สามารถทดลองได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชั้นสาร แสดงได้จากผลการทดลองในรูปที่ 2.6 เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าลดต่ำลง

2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

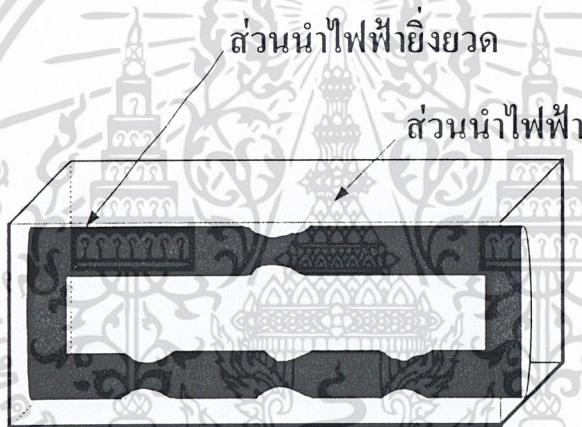
2.5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวชนิด Y-Ba-Cu-O มีลักษณะเนื้อสารเป็นแบบเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ซึ่งจากสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแสดงด้วยส่วนที่เป็นสีดำ โดยอยู่ประปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวซึ่งเราพิจารณาว่าเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้แสดงในส่วนที่ไม่เป็นสีดำ ดังนั้นการที่ชั้นสารจะสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวได้นั้น ในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจะต้องเชื่อมต่อกันอยู่ และจากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าในส่วนของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและการเชื่อมต่อแบบหลวมๆ หรือที่เรียกว่า จุดคอด และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างมหภาค จึงพิจารณาในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่าย โดยการนำเอาส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O



รูปที่ 2.8 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

รูปที่ 2.7 มาแทนด้วยท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อกัน สำหรับท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเห็นว่ามีจุดคอดเกิดขึ้น 1 จุด ที่บริเวณกลางท่อตัวนำด้านบนและจุดคอดอีก 3 จุดจะอยู่ในส่วนของท่อตัวนำด้านล่าง สำหรับจุดคอดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.8 นั้นมีอยู่จริงในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพราะในขณะที่ทำการอัดเม็ดสาร เนื้อสารจะอัดตัวชิดติดกัน และเมื่อนำเม็ดสารไปทำการเผาก็จะทำให้เนื้อสารนั้นหลอมตัวชิดติดกันมากยิ่งขึ้นและกลายเป็นโครงสร้างของเซรามิกขึ้น แต่ก็ยังพบว่ามีบางจุดที่เนื้อสารยังไม่หลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดเป็นจุดคอดขึ้นมา

จากแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายในรูปที่ 2.8 พิจารณาได้ว่า ในขณะที่ชิ้นสารยังอยู่ในสภาพเอกสารนี้เป็นของแข็ง เมื่อนำไปเชื่อมต่อกันแล้วเนื้อสารจะหลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิและเวลาในการเผาไหม้ เป็นต้น

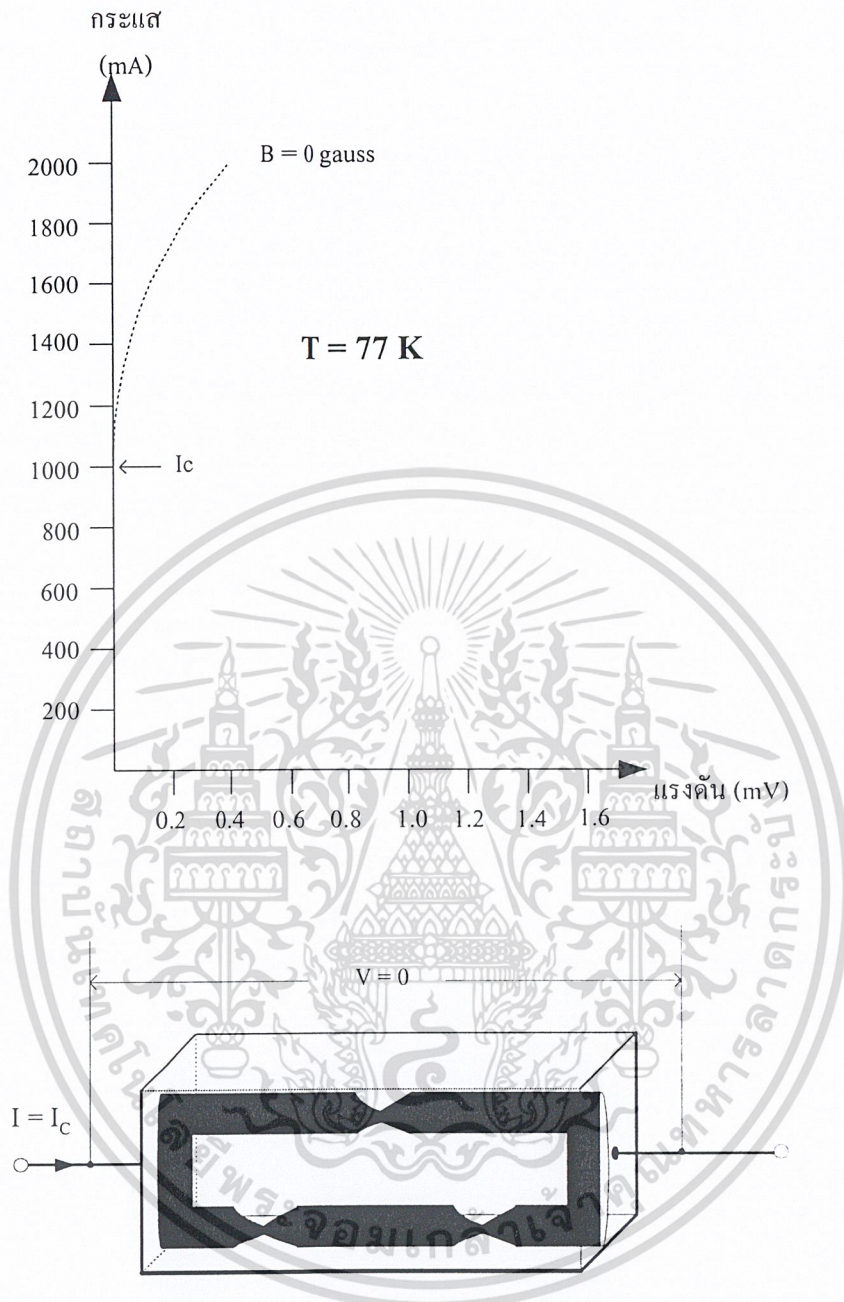
ยวดยิ่ง ในส่วนของท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะขาดออกจากกัน ซึ่งส่วนของท่อตัวนำบริเวณที่ขาดก่อน ก็คือส่วนของจุดคอด และในหัวข้อต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Y - Ba - Cu - O$

2.5.2 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก

2.5.2.1 การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

จากผลการทดลองในรูปที่ 2.4 สามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.9 จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชิ้นสารน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต (I_c) ซึ่งพบว่าในขณะนี้ชิ้นสารยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่าท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะยังคงเชื่อมต่อกันอยู่ความต้านทานในชิ้นสารจึงไม่เกิดขึ้นทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารในขณะนี้

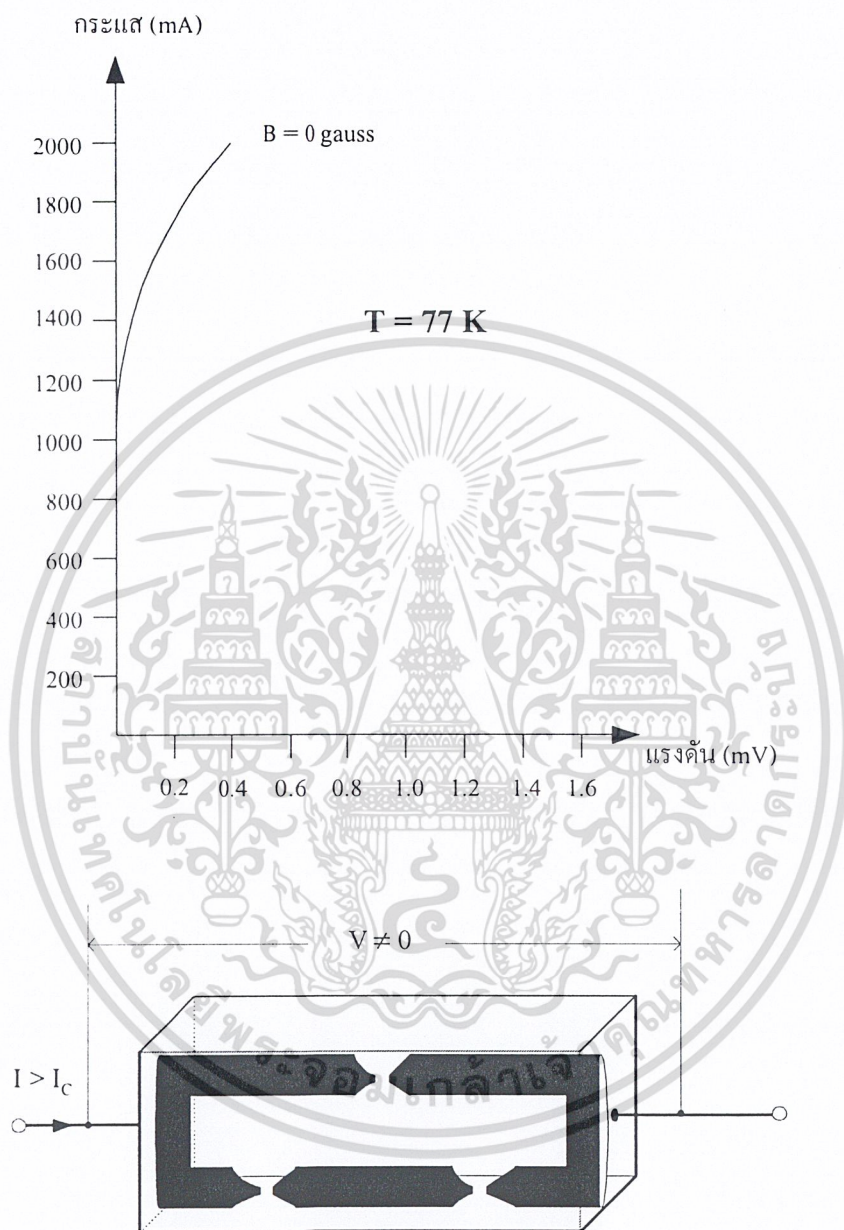
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

พิจารณารูปที่ 2.10 เป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาริบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชิ้นสารมากกว่าค่ากระแสวิกฤต (I_c) ซึ่งในขณะนี้ชิ้นสารได้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปแล้ว จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่า ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่เป็นจุดคอดจะขาดออกจากกัน จึงมีความต้านทานไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นภายในชั้นสารทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้นและจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแส
สูงขึ้น

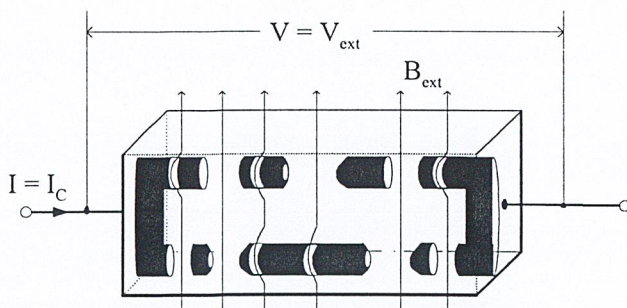
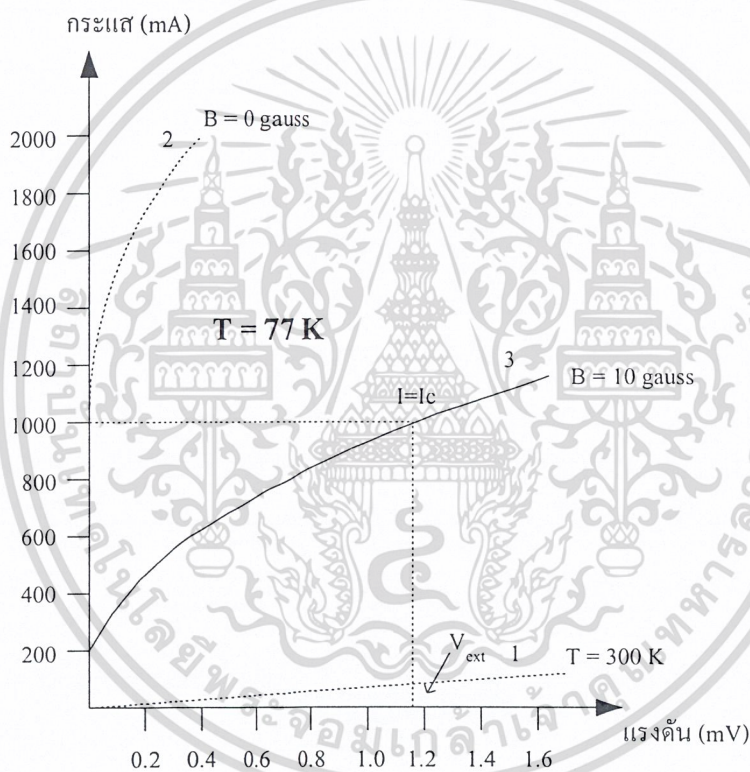


รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาค
ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต

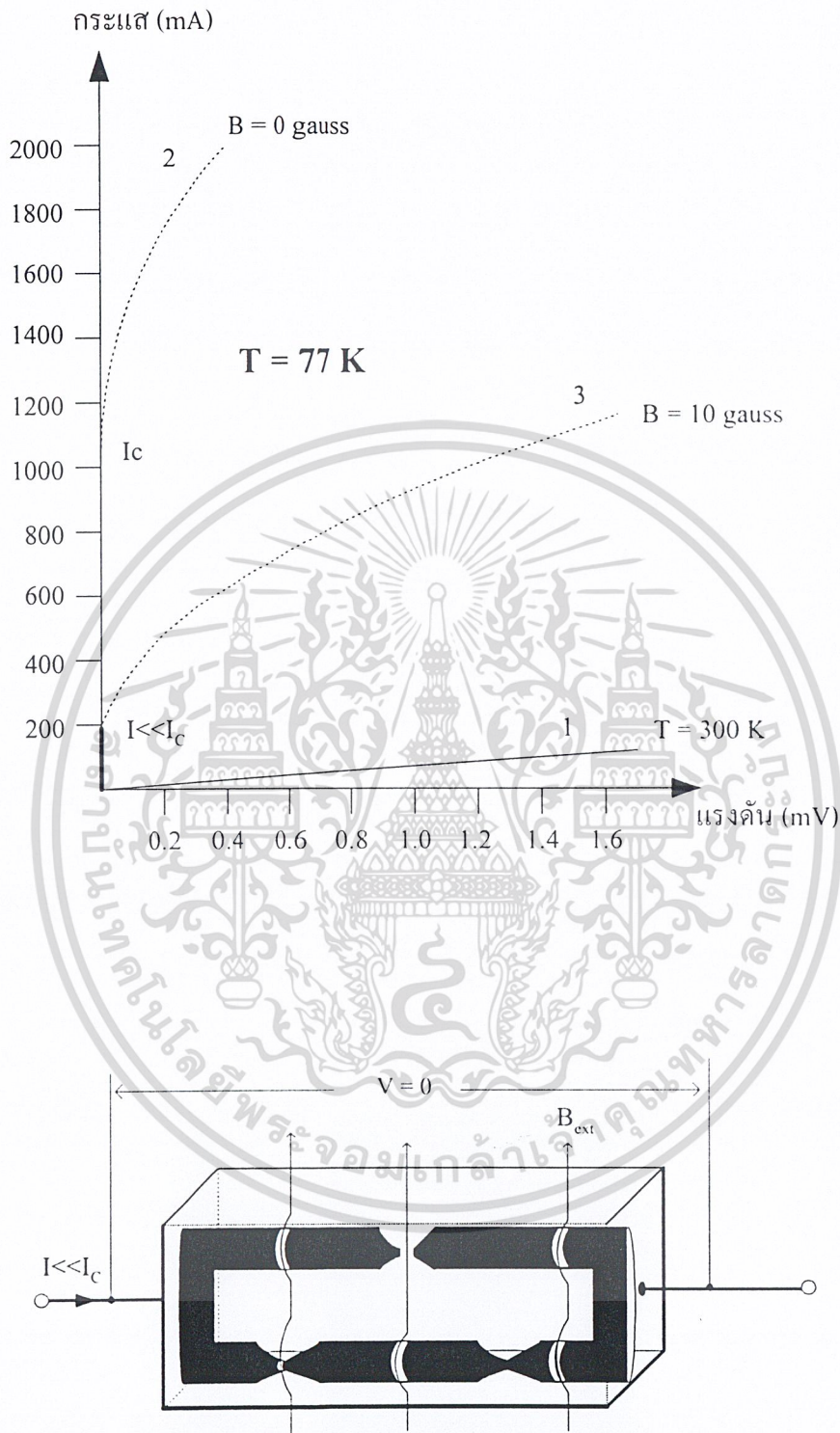
2.5.2.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแส
และแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆให้กับชั้นสาร
ที่มีการนำไปใช้

จากหัวข้อ 2.5.2.1 ได้อธิบายเกี่ยวกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเส้นที่ 2 ของรูปที่ 2.11 ไปแล้ว ต่อไปจะเป็นการพิจารณารูปเส้นที่ 3 ของรูป 2.11 ซึ่งเป็นผลการทดลองในหัวข้อ 2.4.1 ดังนี้ เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ (10G) ให้กับชิ้นสารในสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนจะถูกทำลาย โดยเฉพาะส่วนที่เป็นจุดคอดและส่วนที่ไม่สมบูรณ์จะขาดออกและเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น (V_{ext}) แต่อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กภายนอก จะไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร ($V=0$) ถ้ากระแสที่เราป้อนให้กับชิ้นสารมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสวิกฤต (I_C) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 2.12 และจากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ชิ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้นได้ ก็โดยการป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 –2.16

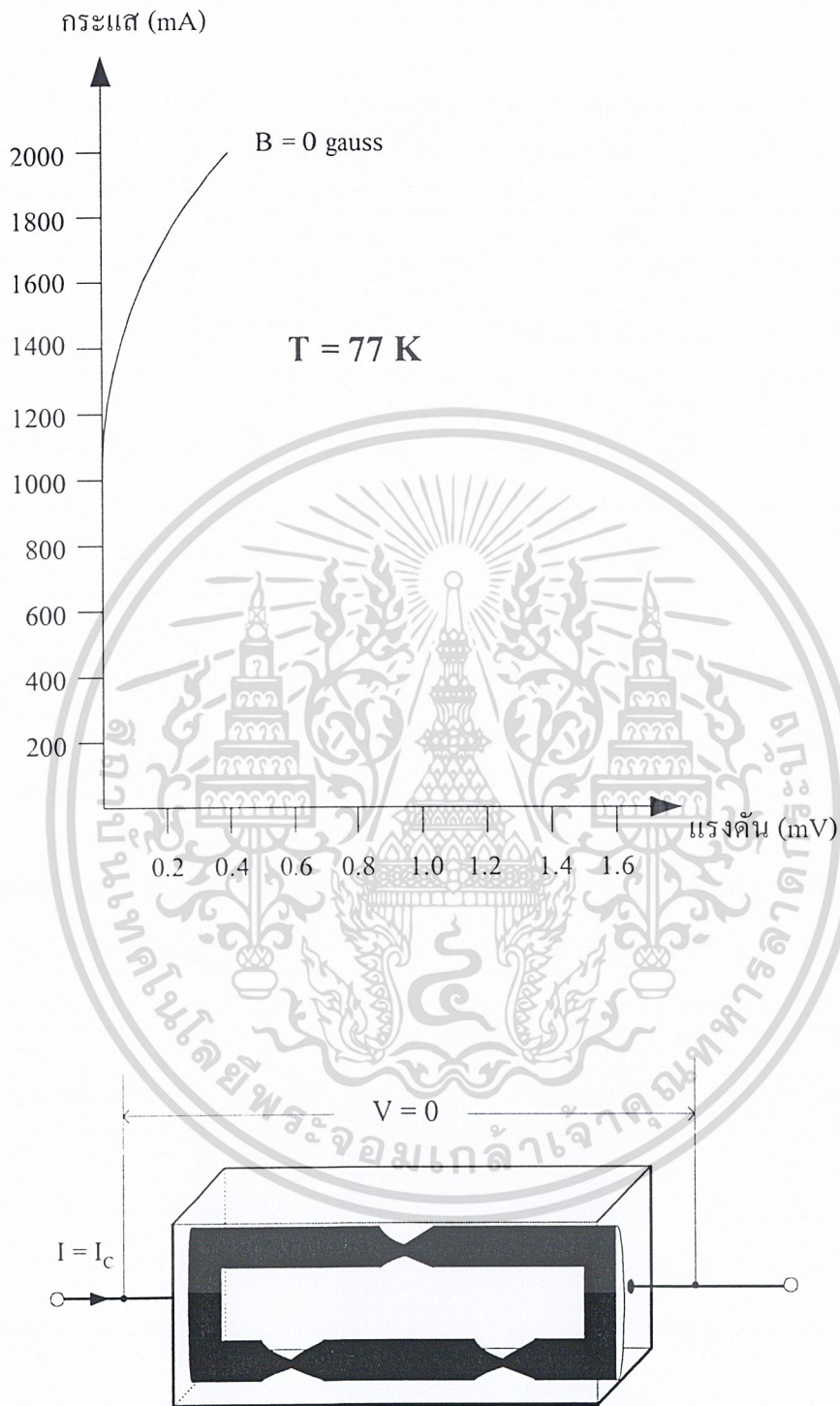


รูปที่ 2.11 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำที่กระแสไอส์เทอิกหรือมากกว่ากระแสวิกฤต



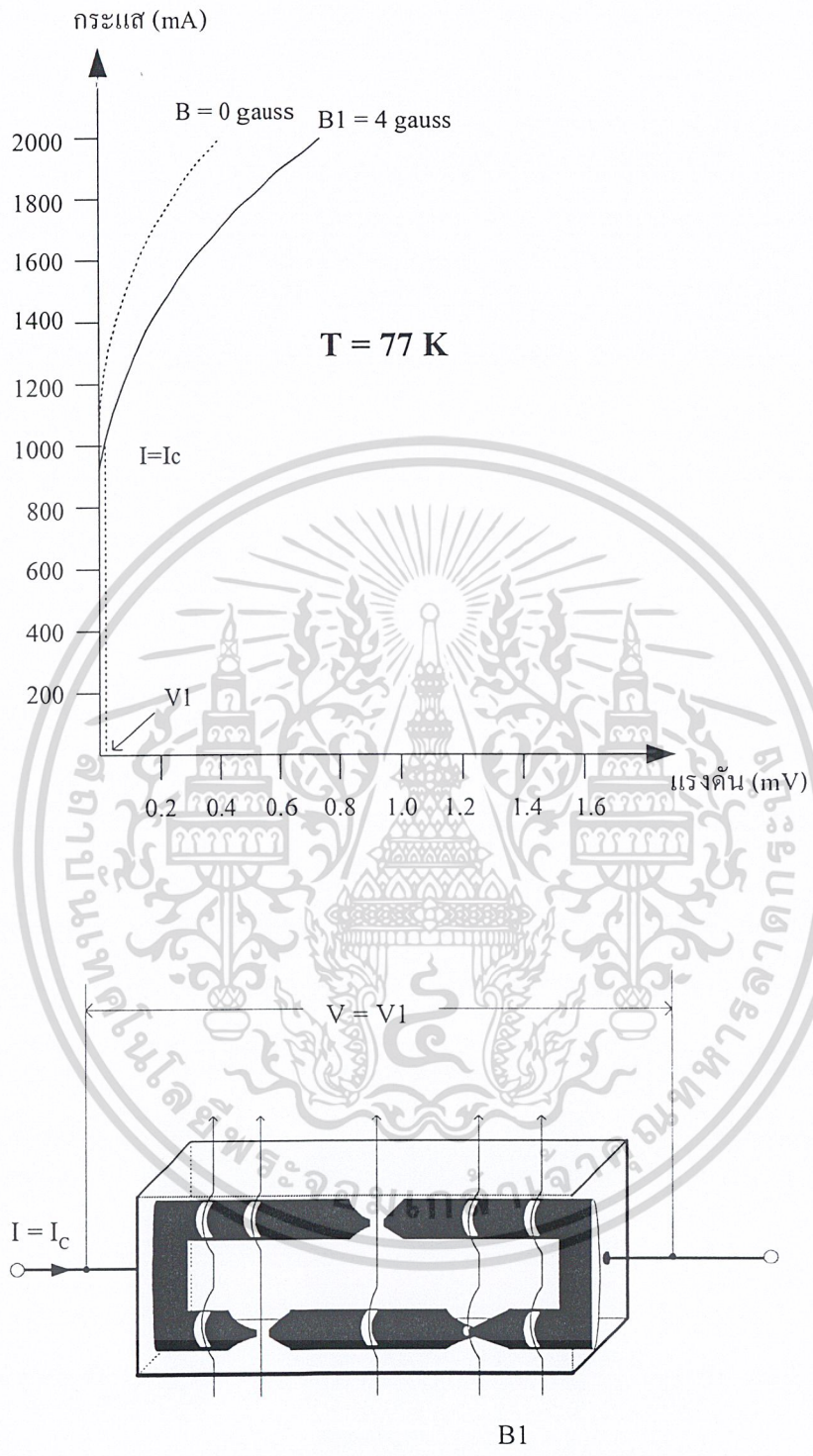
รูปที่ 2.12 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3)เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำที่กระแสไปอัสน้อยกว่ากระแสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



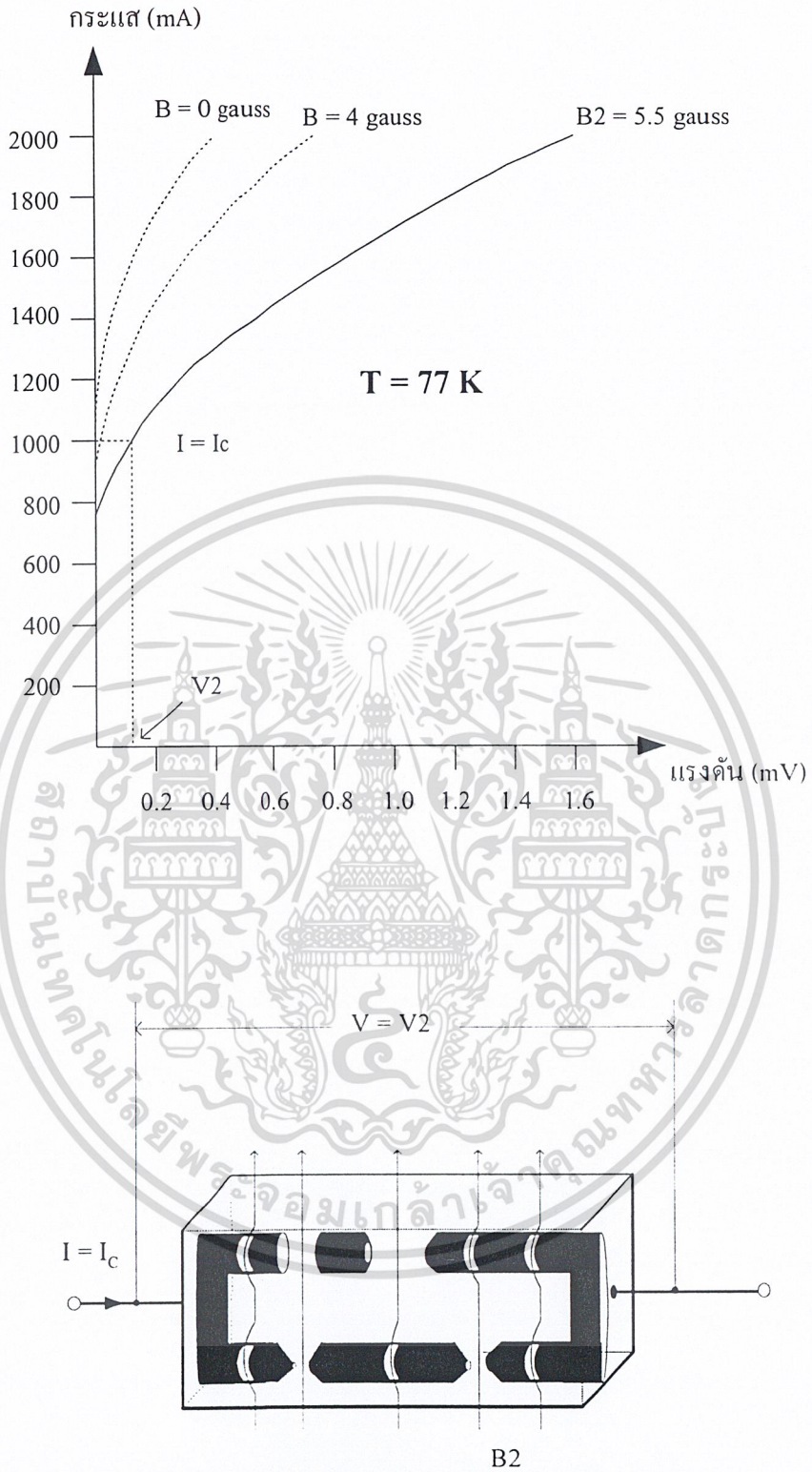
รูปที่ 2.13 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B = 0$) ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



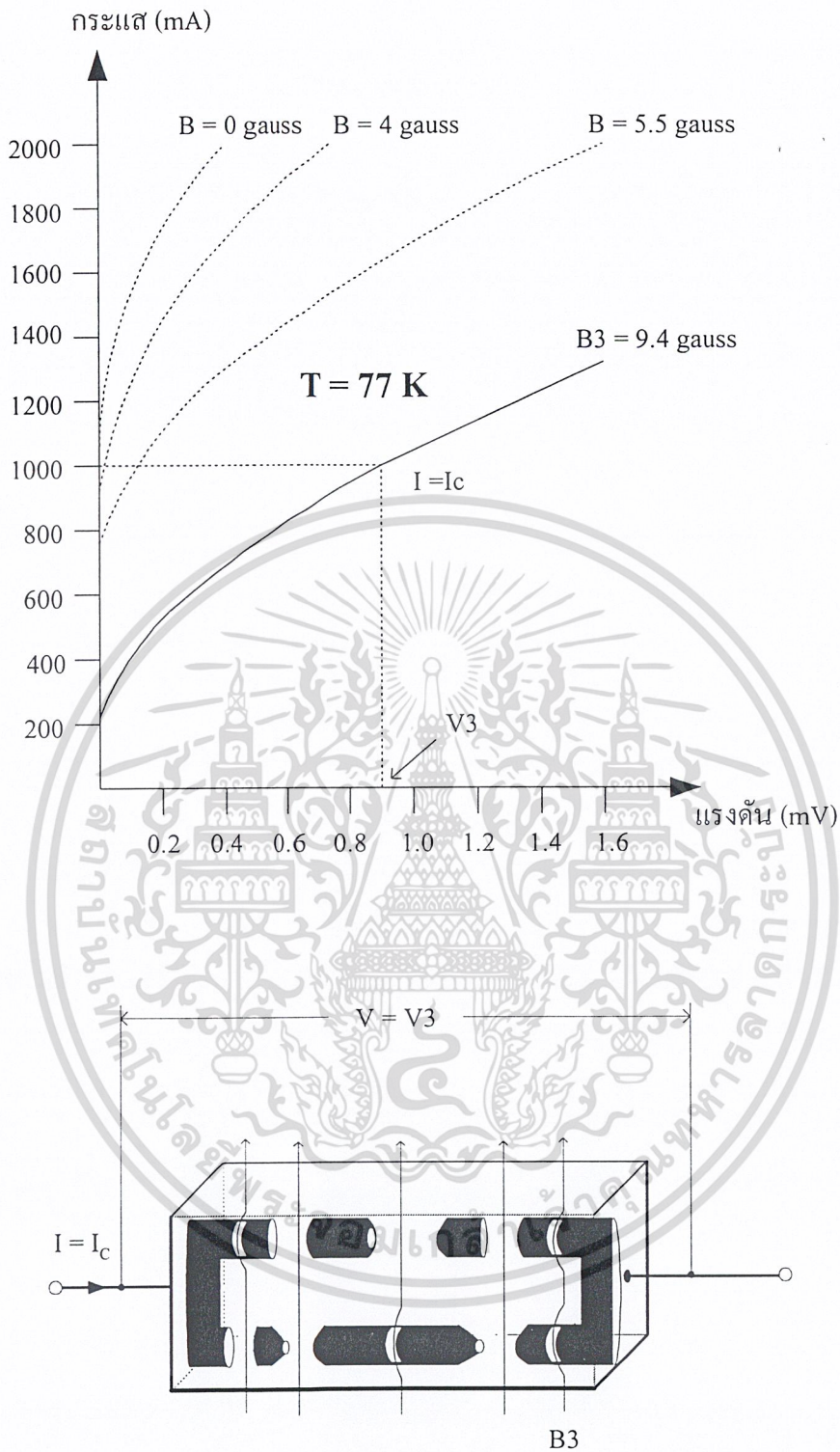
รูปที่ 2.14 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_1 = 4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สนามแม่เหล็กภายนอก $B_2 = 5.5\text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_3 = 9.4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

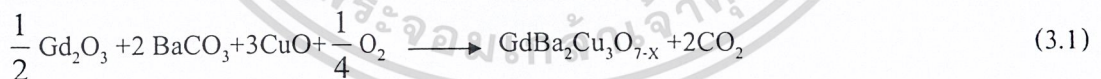
การทดลองและผลการทดลอง

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ไปแล้ว แต่บทนี้จะเป็นการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีกชนิดหนึ่งคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($Gd-Ba-Cu-O$) ซึ่งเนื้อสารเป็นแบบเซรามิก โดยจะศึกษาถึงกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น ผลของอุณหภูมิในการเผาและแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีต่อปริมาณกระแสวิกฤต และขนาดของความต้านทานเชิงลบ

3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $Gd-Ba-Cu-O$ [6-8]

3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Gd-Ba-Cu-O$

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ แกลดโคลิเนียม แบริยม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ แกลดโคลิเนียม ออกไซด์ (Gd_2O_3) แบริยมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งอัตราส่วนนี้ได้มีการวิจัยมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดี ซึ่งปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้งสาม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



จากสมการที่ 3.1 พบว่า อัตราส่วนโดยอะตอมของสารประกอบจะได้ $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3

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

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การคำนวณจากสมการเคมี ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น ยินดีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ซึ่งหมายความว่าเราได้สาร $GdBa_2Cu_3O_{7-x} = 814.576$ กรัม

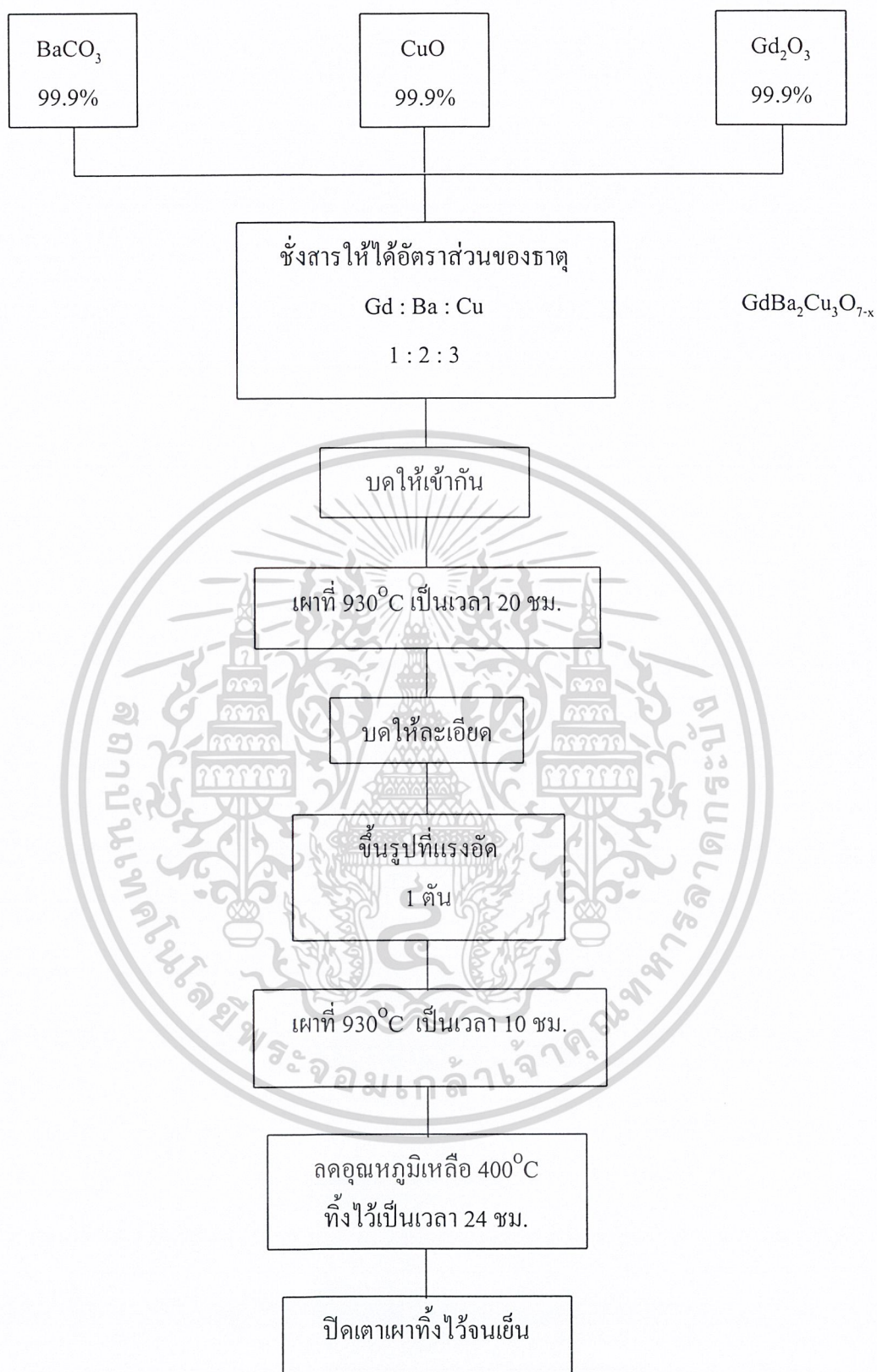
จากสารตั้งต้นทั้งหมด 814.576 กรัม ถ้าต้องการ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้แคลโคลิเนียมออกไซด์ 2.225 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 4.845 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 2.929 กรัม

3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

ในขั้นตอนกระบวนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการเผามาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

1. ชั่งสารประกอบ Gd_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ $930^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ $930^\circ C$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ $400^\circ C$ อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



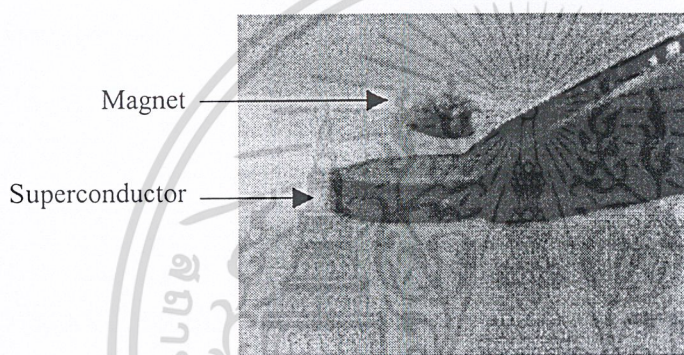
รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายวตชนิด Gd-Ba-Cu-O
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

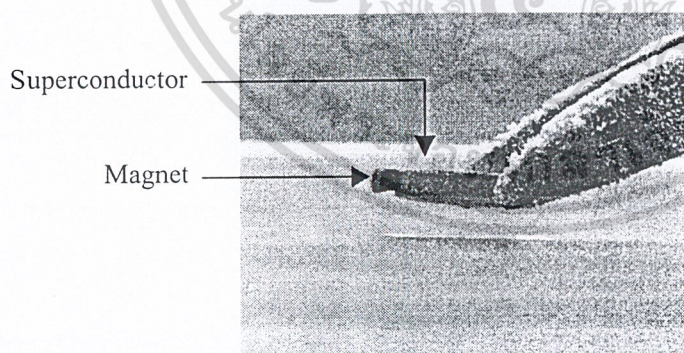
หลังจากที่ได้มีดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.1 มาแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของมีดสารเพื่อแสดงว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สมบูรณ์ดังนี้

3.1.3.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)

เป็นวิธีการทดสอบมีดสารว่าอยู่ในสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยการนำมีดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว ถ้ามีดสารมีสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ขึ้น โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือมีดสารจากการทดสอบพบว่า



ก) การผลักแม่เหล็ก



ข) การดูดแม่เหล็ก

รูปที่ 3.2 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

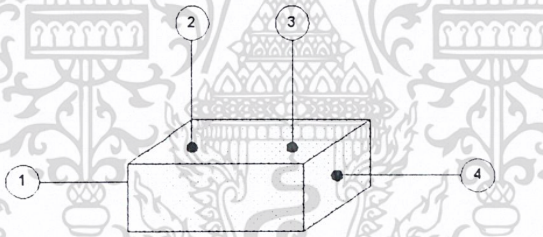
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อดำเนินการปลูกแม่เหล็กให้ลอยขึ้น ดังรูปที่ 3.2 ก) และที่น่าสนใจก็คือบริเวณขอบของเมื่อดำเนินการบางส่วนมีการดูดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.2 ข) การที่บางส่วนของเมื่อดำเนินการมีการดูดแม่เหล็ก น่าจะมีสาเหตุมาจากสารแกดโกลิเนียมที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก [9]

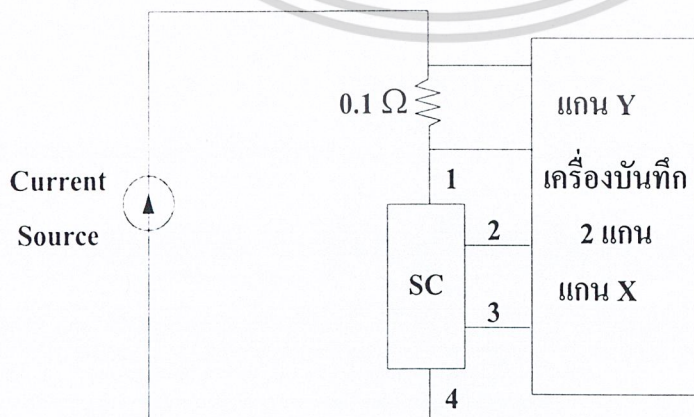
3.1.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 3.4 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสารโดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเมื่อดำเนินการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเมื่อดำเนินการให้มีรูปทรงดังรูป 3.3

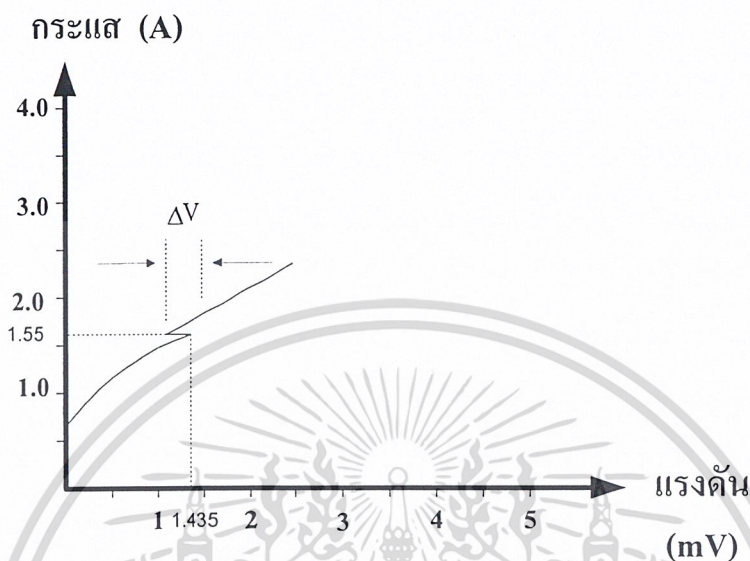


รูปที่ 3.3 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม้ว่ารูปที่ 3.4 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

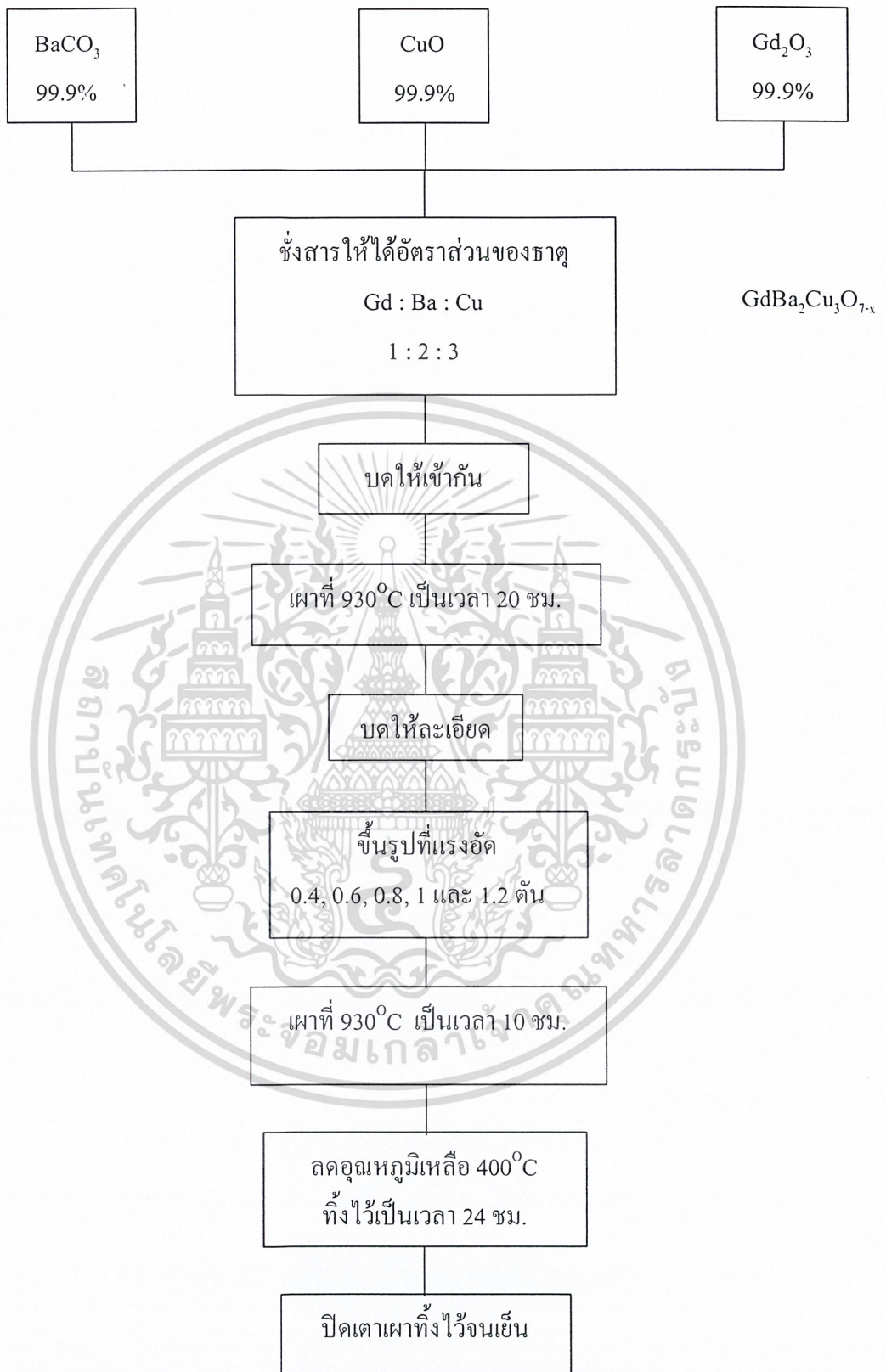
ในรูปที่ 3.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นซึ่งมีความแตกต่างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ ความต้านทานเชิงลบที่วัดได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกระแสเท่ากับ 1.5 A. และที่แรงดันเท่ากับ 1.425 mV. ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) เท่ากับ 0.25 mV. และจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ S

3.2 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น

3.2.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่แรงอัดค่าต่างๆ

ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะเป็นการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่แรงอัดค่าต่างๆ ดังนี้ 0.4, 0.6, 0.8, 1 และ 1.2 ตัน โดยมีขั้นตอนและกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.6

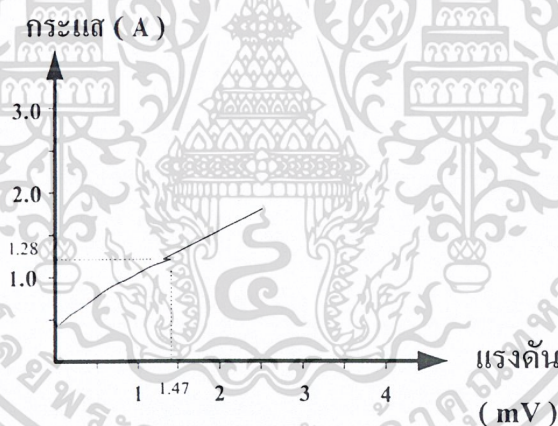


เอกสารรูปที่ 3.6 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดในการขึ้นรูป 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน การค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

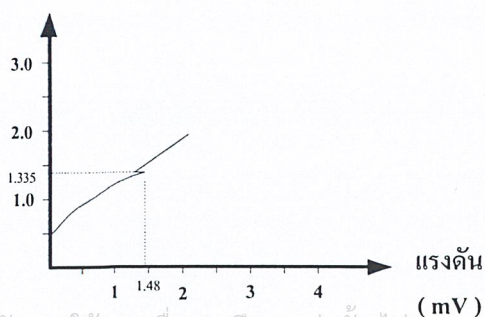
จากกระบวนการสร้างในรูปที่ 3.6 ในขั้นตอนแรกจะเป็นการนำเอาสาร $BaCO_3$, CuO และ Gd_2O_3 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:2:3 นำมาบดให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง นำสารที่ผ่านการเผามาบดให้ละเอียดเป็นผง จากนั้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำผงสารมาอัดขึ้นรูปให้เป็นเม็ด โดยเราจะแบ่งเม็ดสารที่ได้ออกเป็นกลุ่มตามแรงอัดในการขึ้นรูป จากนั้นนำเม็ดสารทั้งหมดมาเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิลงเหลือ $400^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาทำการปิดเตาเผา

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัดค่าต่างๆ

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าว่ามีผลอย่างไร สำหรับในการทดลองเราจะนำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาตัดแต่งรูปทรงดังรูปที่ 3.3 จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.4 สำหรับจุดที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมขึ้นสารอยู่ที่ขั้ว 2-3 ส่วนขั้ว 1-4 ใช้สำหรับป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าและออกขึ้นสารตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 ก)-จ)

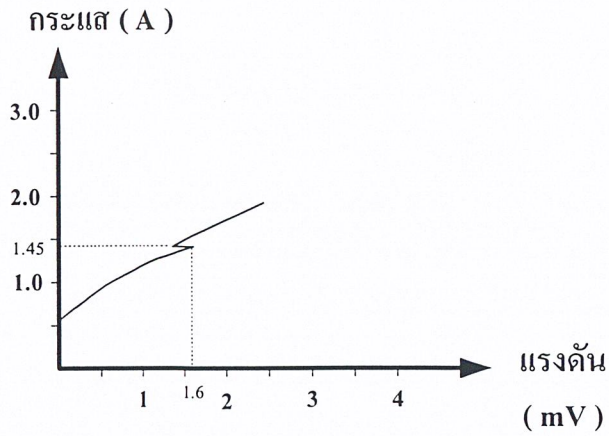


ก) แรงอัด 0.4 ตัน

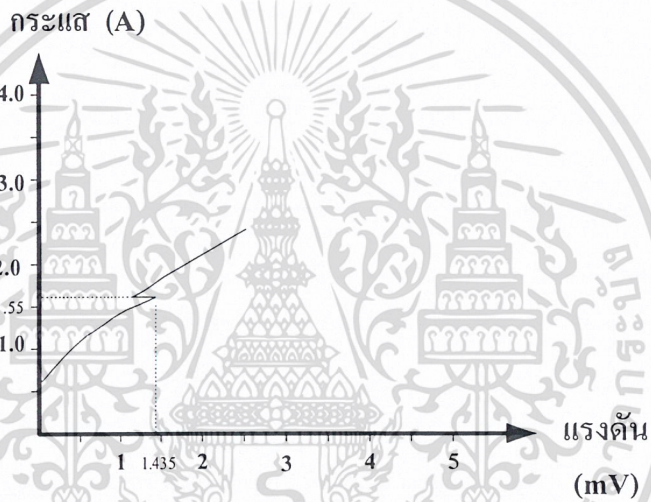


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

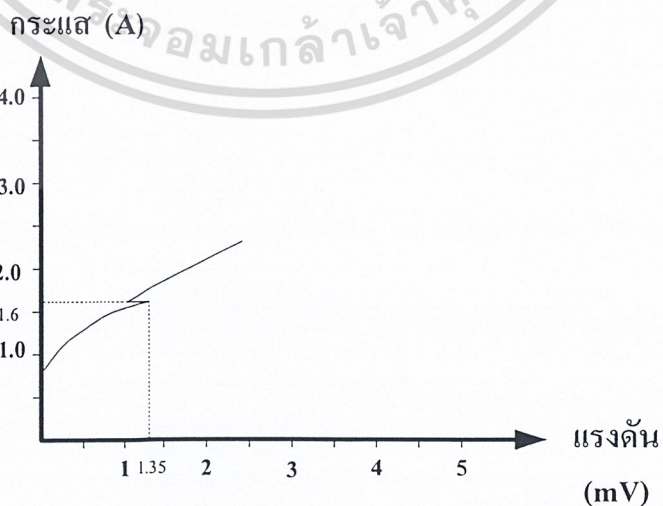
ข) แรงอัด 0.6 ตัน



ค) แรงอัด 0.8 ตัน

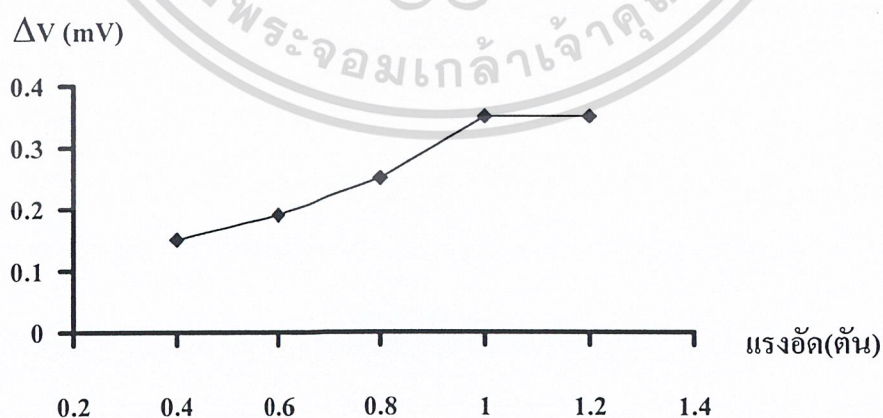
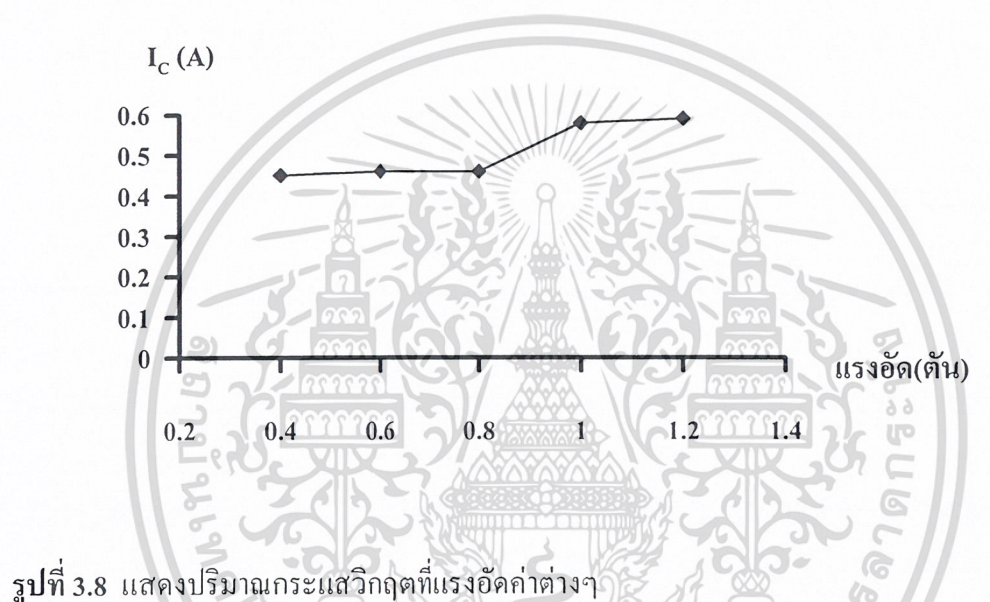


ง) แรงอัด 1.0 ตัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของเครื่องอัดรีดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัด 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.7 ก-จ) แสดงให้เห็นว่า ที่แรงอัดค่าต่ำสุดคือ 0.4 ตันจะมีปริมาณกระแสวิกฤตที่ต่ำสุดและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ (ΔV) จะน้อย เมื่อให้แรงอัดสูงขึ้นปริมาณกระแสวิกฤตจะสูงขึ้นและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔV) มีขนาดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับปริมาณกระแสวิกฤตแสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ (ΔV) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งพบว่าที่แรงอัด 1.2 ตัน ปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบเริ่มจะคงที่เมื่อเทียบกับแรงอัด 1 ตัน



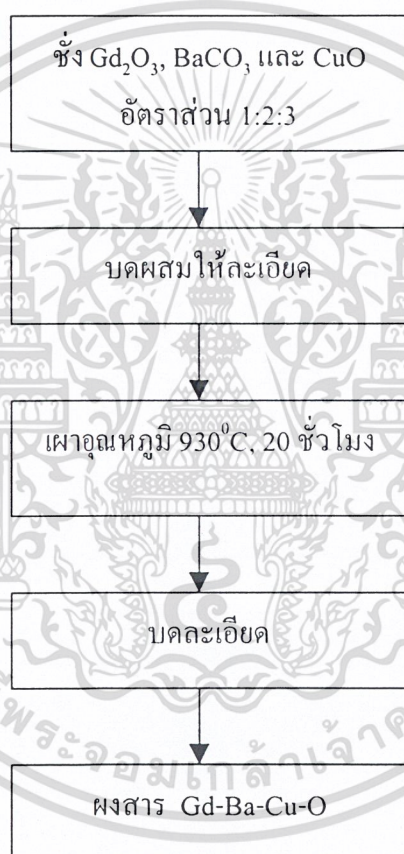
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบที่แรงอัด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้
ค่าต่างๆ

3.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า และปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น

3.3.1 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะเป็นการเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เริ่มจากนำผงสาร Gd_2O_3 , $BaCO_3$, และ CuO ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มาผสมกันในอัตราส่วน 1:2:3 นำผงสารมาบดผสมให้เข้ากันจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการแยกเอาส่วน Non-Superconductor ซึ่งมีสีเขียวทิ้งไป แล้วนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่เป็นสีด้ามบดให้ละเอียด จะได้ผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ออก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเตรียมเม็ดสาร

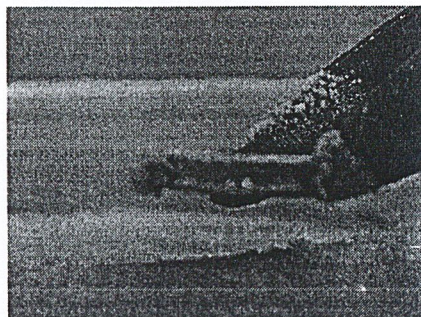
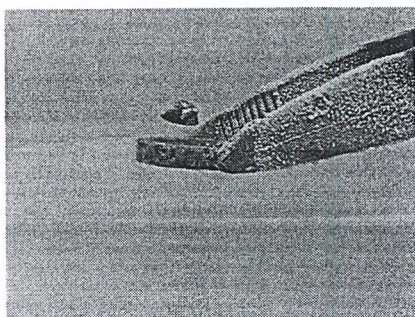
ในการอัดขึ้นรูปและการเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.11 เริ่มโดยการนำผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้จากขั้นตอนในรูปที่ 3.10 มาอัดขึ้นรูปที่แรงอัด 1.2 ตัน (ที่ใช้แรงอัด 1.2 ตัน เนื่องจากให้ปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีค่ามากที่สุด) นำเม็ดสารที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาแยกเผาที่ อุณหภูมิ 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ 400 องศาเซลเซียส อบทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดเตาเผา (ในการทดลองเรา จะไม่ใช้อุณหภูมิการเผาที่ต่ำกว่า 930 องศาเซลเซียส เนื่องจากเม็ดสารจะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด)



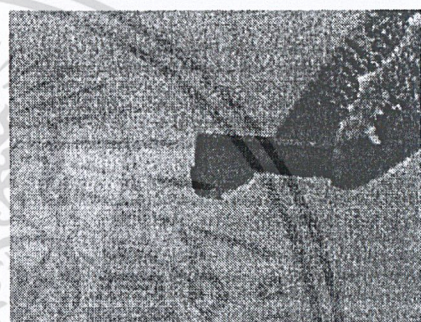
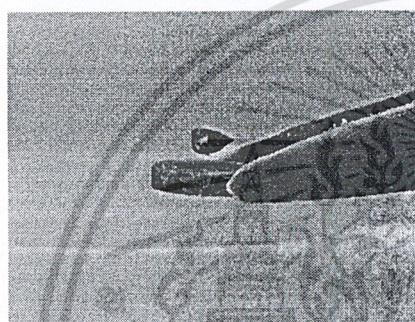
รูปที่ 3.11 กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเผาที่อุณหภูมิ 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

3.3.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)

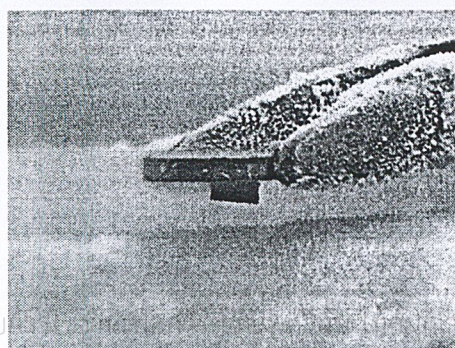
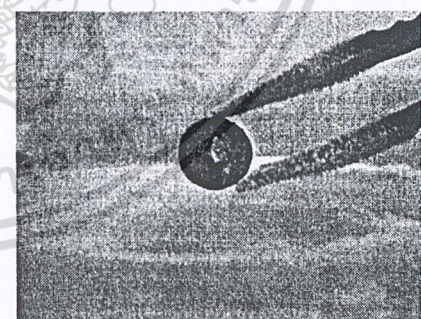
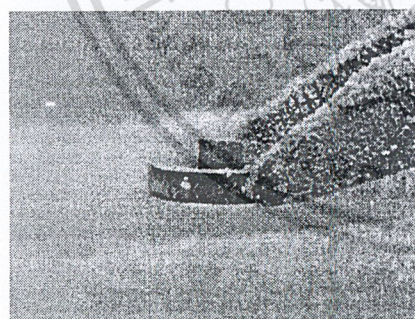
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดขึ้นรูป 1.2 ตัน มาทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.12 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส

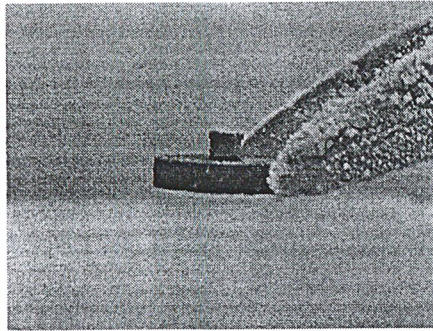


ข) อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค) อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส



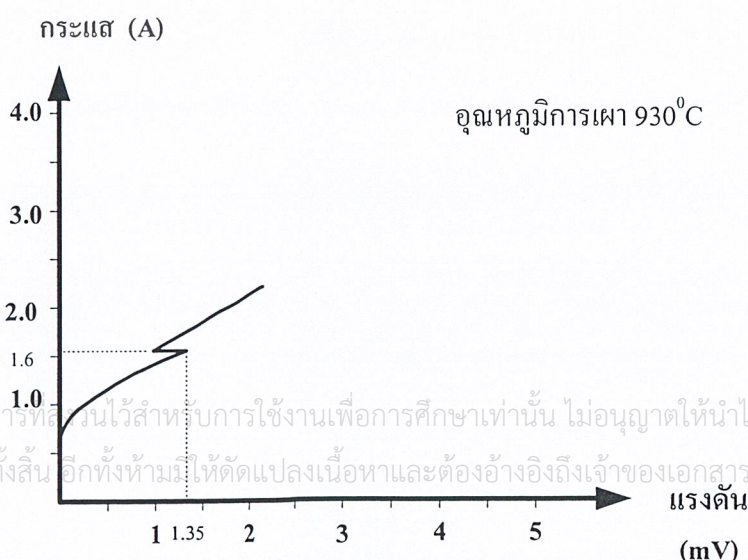
ง) อุณหภูมิ 990 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.12 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

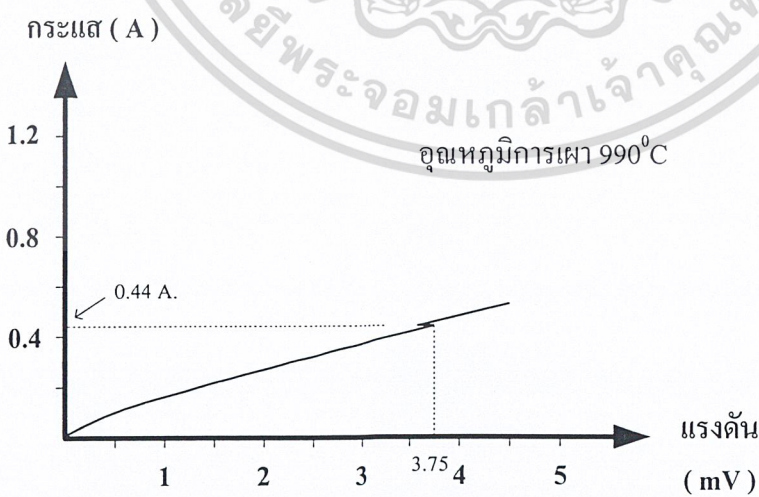
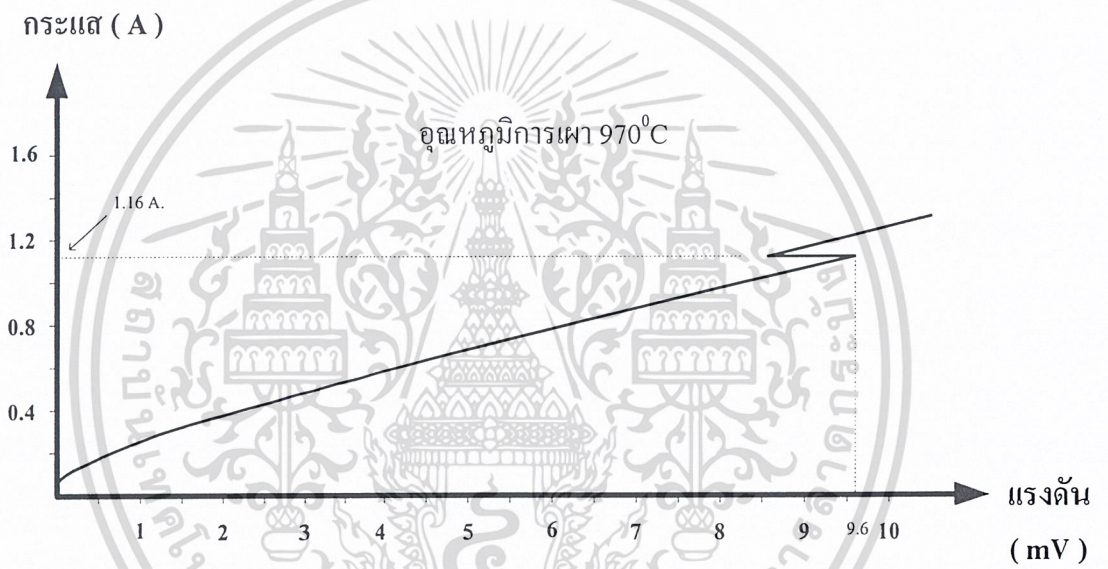
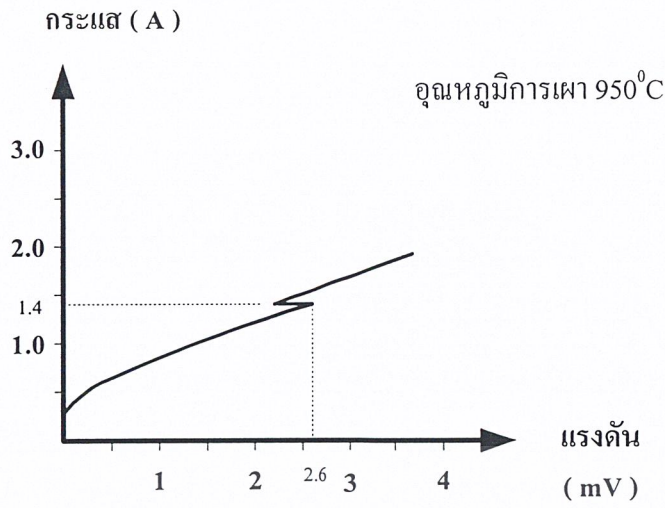
จากรูปที่ 3.12 พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะมีการผลักแม่เหล็กได้สูงสุด และจะมีเพียงส่วนขอบของเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดบางส่วนเท่านั้นที่สามารถดูดแม่เหล็กได้ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ระยะในการผลักแม่เหล็กจะต่ำลงและจะมีบริเวณที่สามารถดูดแม่เหล็กได้มากขึ้น ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส นั้น ระยะในการผลักแม่เหล็กจะต่ำมาก แต่ส่วนที่สามารถดูดแม่เหล็กจะมีมากและมีแรงในการดูดแม่เหล็กมากกว่าอุณหภูมิการเผาอื่น ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส แทบจะไม่มี การผลักแม่เหล็กเลยและการดูดแม่เหล็กมี น้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเผาอื่น

3.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

หลังจากนำเม็ดสารมาทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำเม็ดสาร ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวมาตัดแต่งรูปทรง จากนั้นนำชิ้นสารทั้งหมดมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง กระแสกับแรงดัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.13



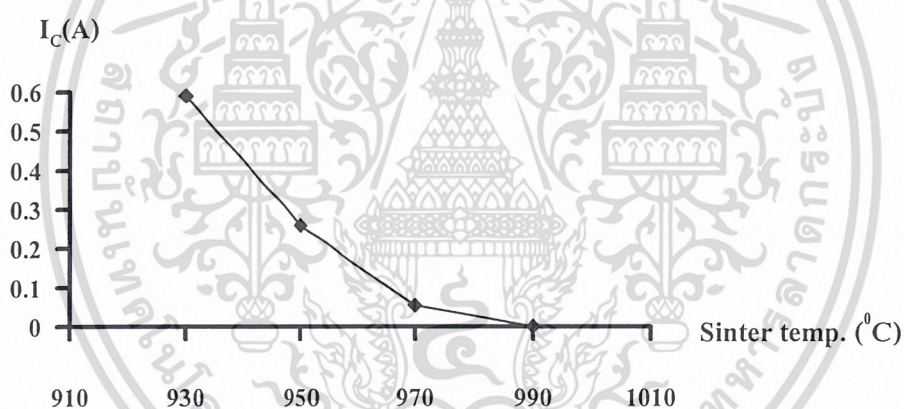
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สนับสนุนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



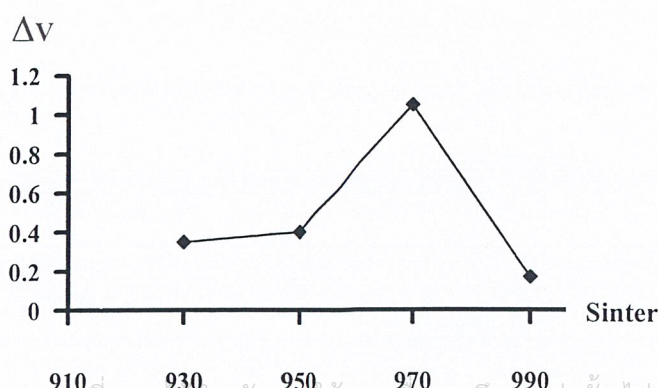
รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 องศาเซลเซียส และ 990 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงมติรับทราบในพิธีการทบทวนเนื้อหาในชั้นเรียน ผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้โดยไม่แจ้งขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อปริมาณกระแส
 วิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบดังนี้ พิจารณาที่
 อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณกระแสวิกฤตที่สูงที่สุด เท่ากับ 0.59 A. แต่จะมี
 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔV) ขณะเกิดความต้านทานเชิงลบน้อยที่สุด เท่ากับ 0.35
 mV. แต่เมื่อให้อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 950 องศาเซลเซียส กระแสวิกฤตจะลดลงเหลือ 0.26 A.
 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าเท่ากับ 0.4 mV. ซึ่งเพิ่มมากขึ้น และเมื่อให้อุณหภูมิการ
 เผาเป็น 970 องศาเซลเซียส กระแสวิกฤตจะลดลงเหลือ 55 mA. แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน
 (ΔV) มีค่ามากที่สุดคือ 1.05 mV. และเมื่ออุณหภูมิจการเผาเป็น 990 องศาเซลเซียส นั้นกระแสวิกฤต
 จะมีค่าที่ต่ำที่สุดคือน้อยกว่า 1 mA และปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าเท่ากับ 0.17 mV.
 ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเผาอื่น และเมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
 อุณหภูมิการเผากับกระแสวิกฤต และอุณหภูมิการเผากับปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะ
 เกิดความต้านทานเชิงลบ (ΔV) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับกระแสวิกฤต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก้าวใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

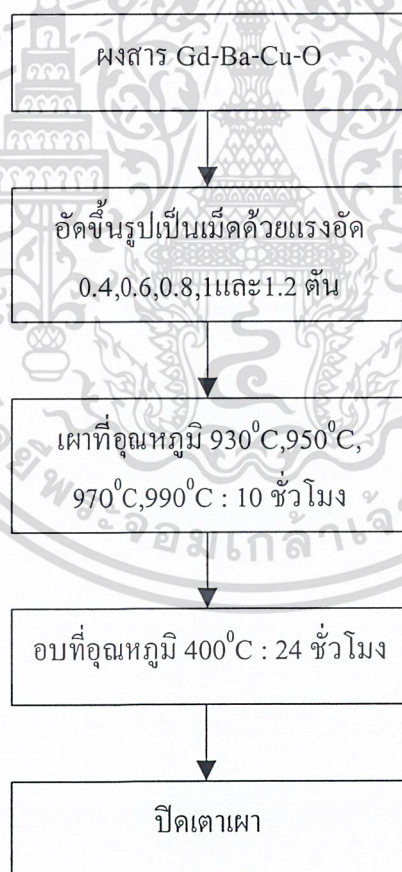
รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะ
 ที่เกิดความต้านทานเชิงลบ

3.4 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส ที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

3.4.1 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะเป็นการเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งมีขั้นตอนกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.16 โดยเริ่มจากการนำผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่ได้เตรียมไว้นำมาอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน จากนั้นนำเม็ดสารทั้งหมดที่ได้แยกออกเป็นกลุ่มเพื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิลงเหลือ 400 องศาเซลเซียส อบทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดทำการปิดเตา



รูปที่ 3.16 กระบวนการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

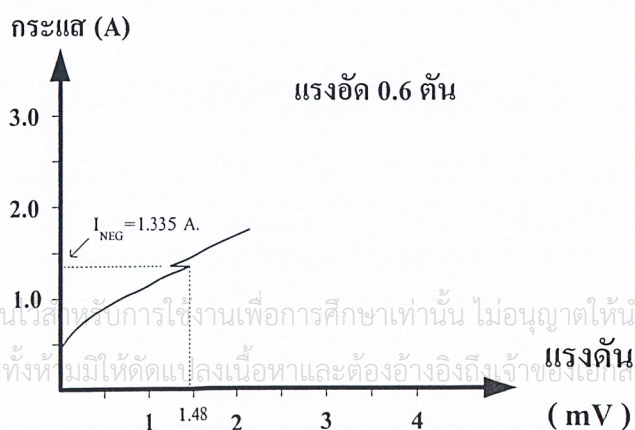
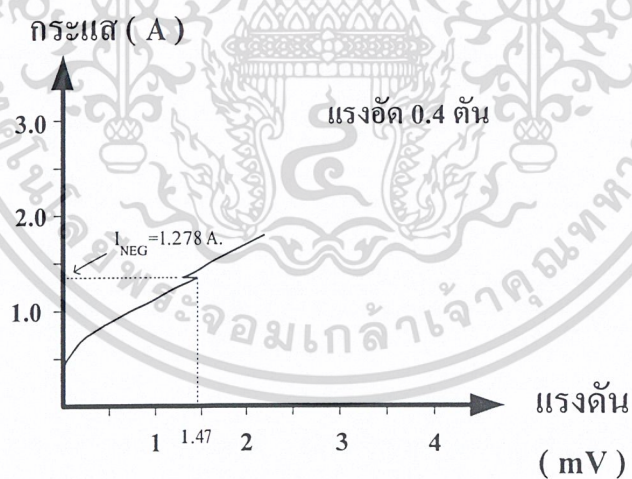
จากกระบวนการสร้างในรูปที่ 3.16 สามารถสรุปเป็นตารางแสดงการเผาเม็ดสารที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

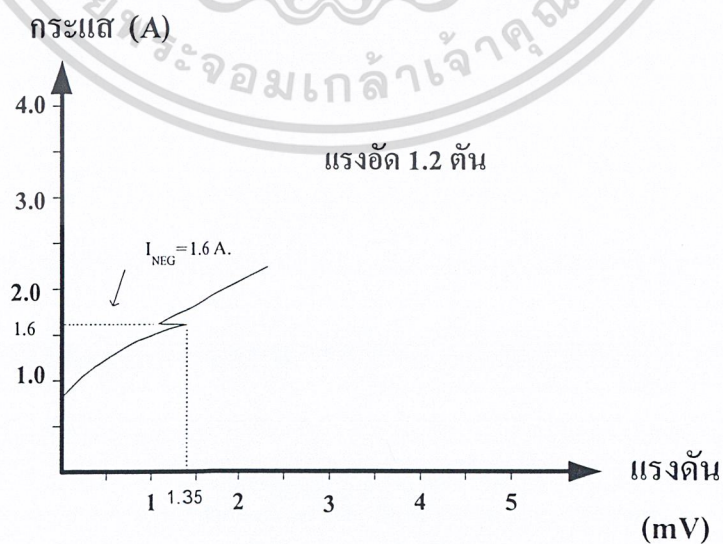
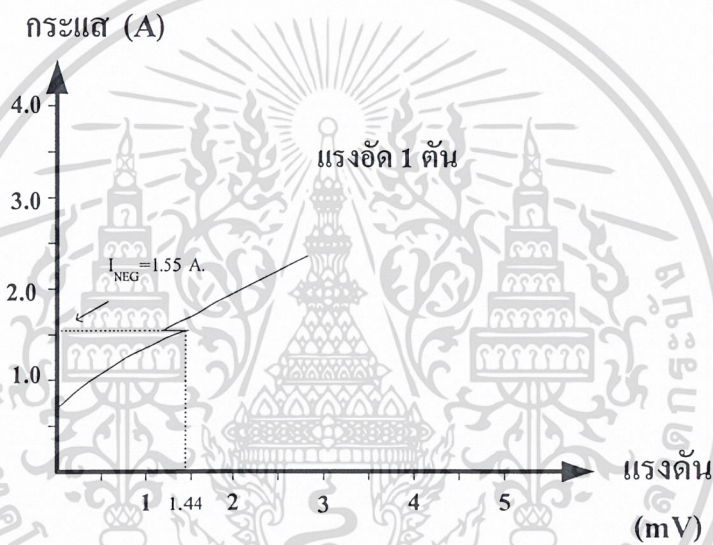
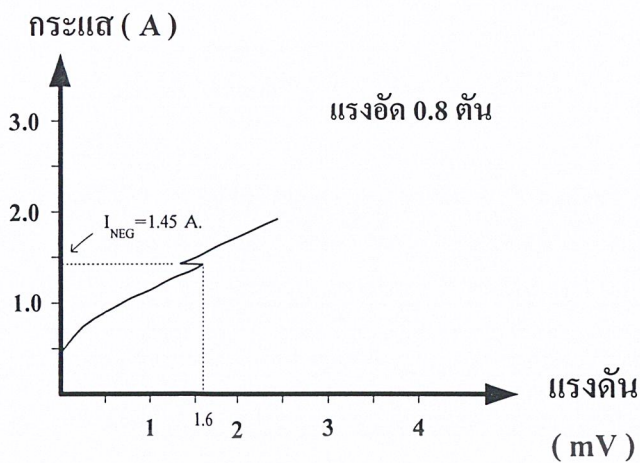
อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	แรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป (ตัน)				
	0.4 ตัน	0.6 ตัน	0.8 ตัน	1 ตัน	1.2 ตัน
930	✓	✓	✓	✓	✓
950	✓	✓	✓	✓	✓
970	✓	✓	✓	✓	✓
990	✓	✓	✓	✓	✓

3.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

หลังจากที่ได้เม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.16 แล้ว ต่อไปจะเป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.17 ก-ง)

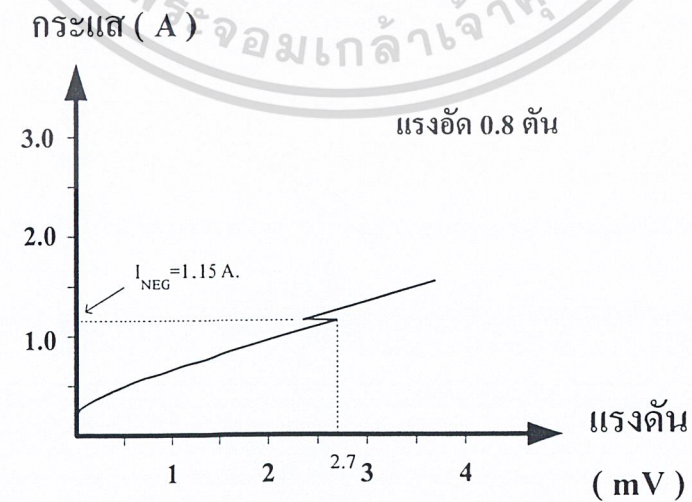
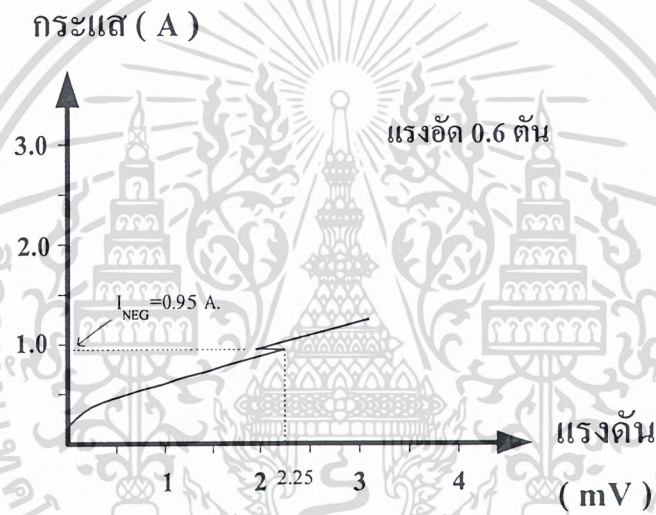
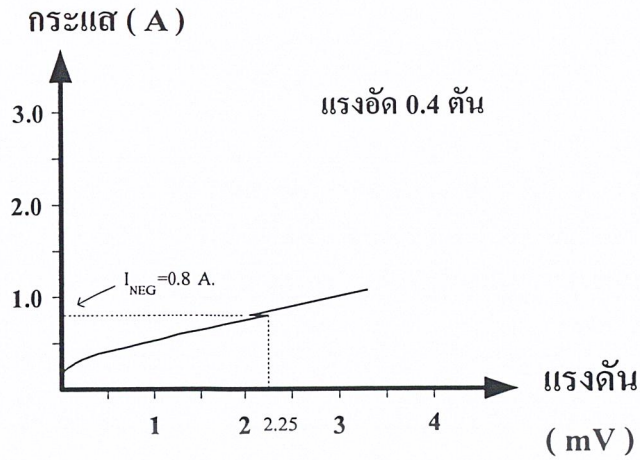


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

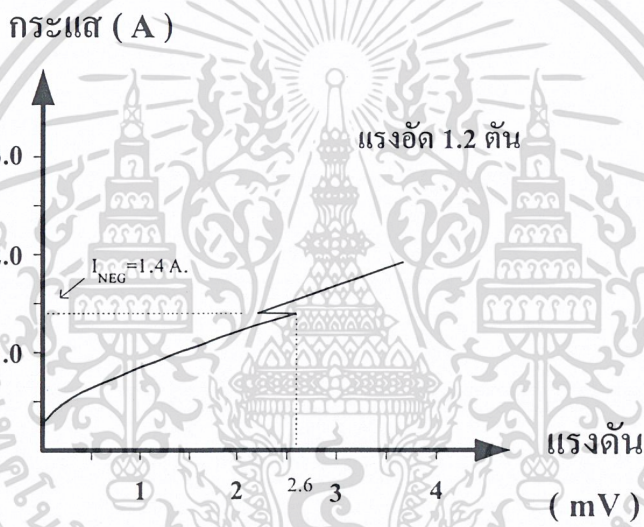
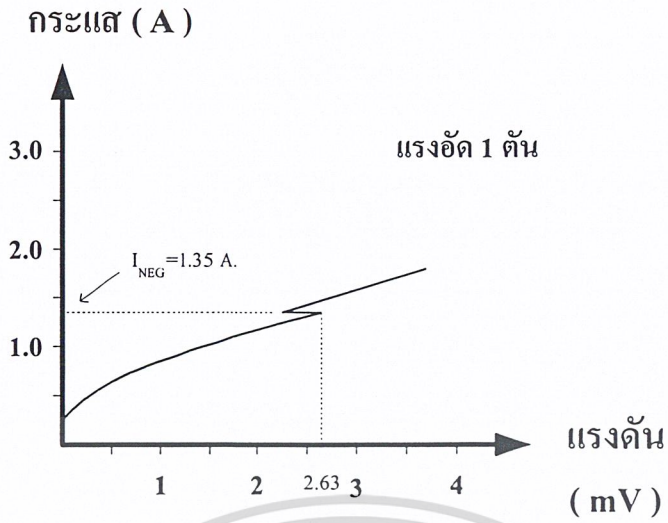


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

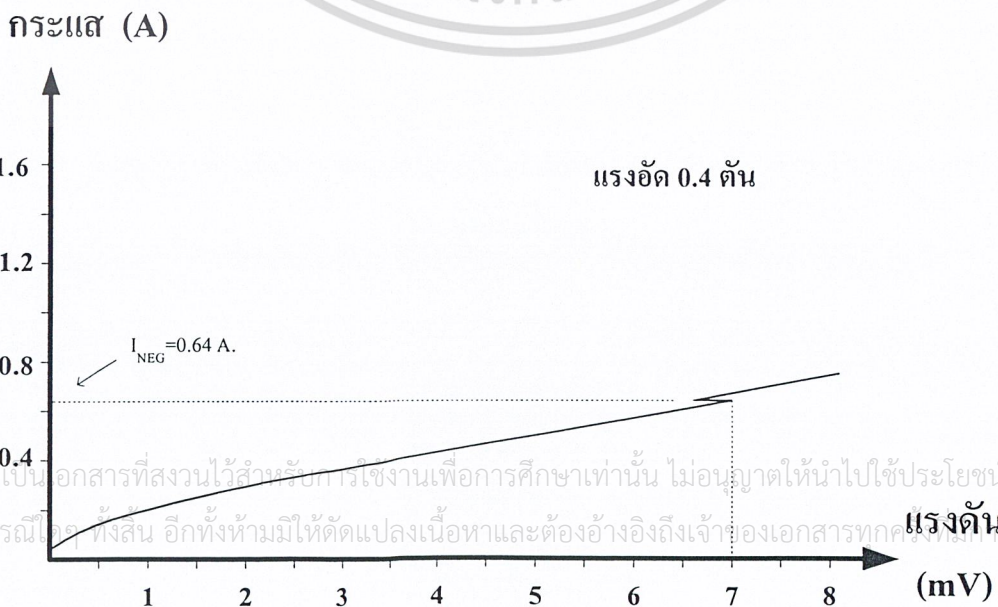
ก) อุณหภูมิการเผา 930°C



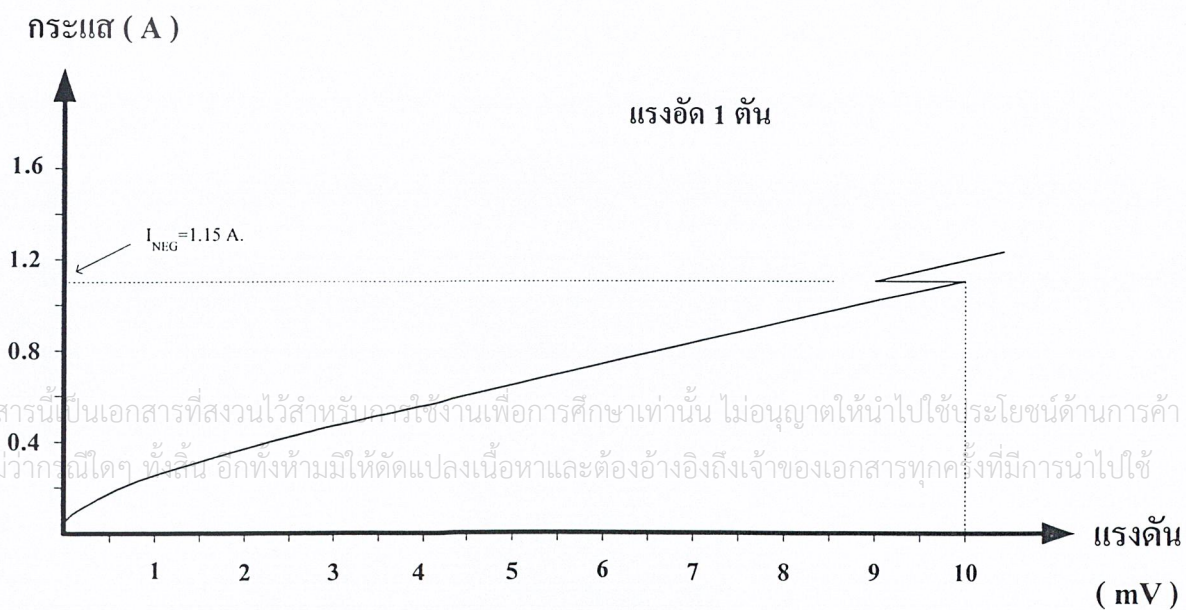
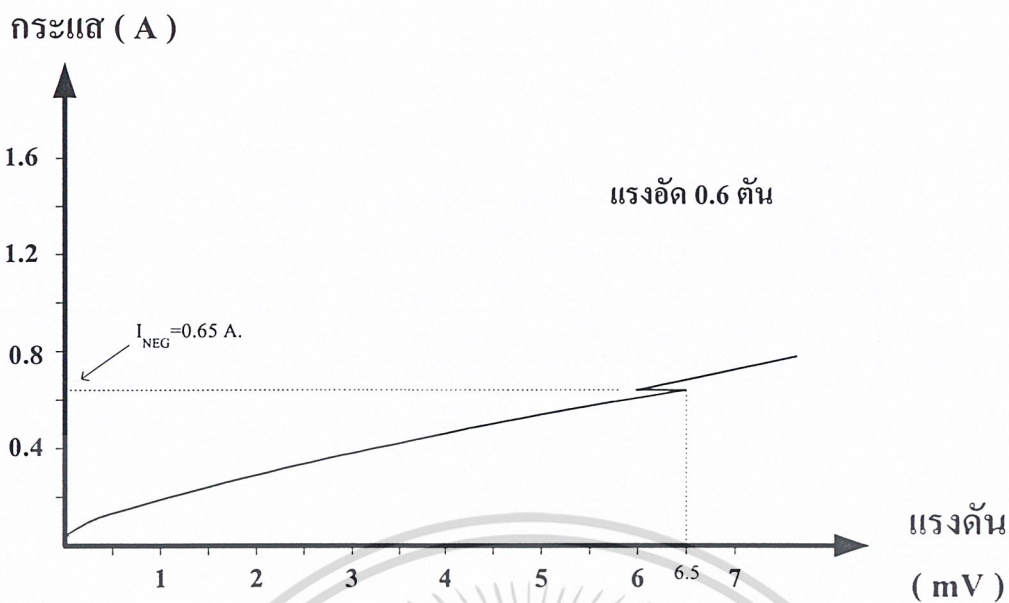
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



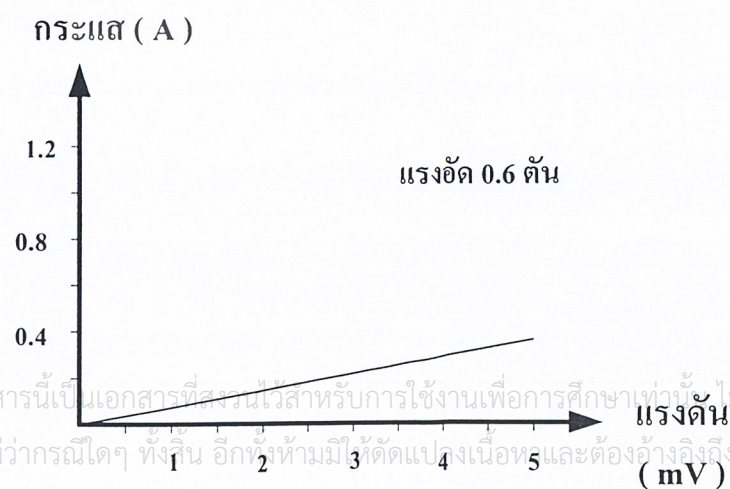
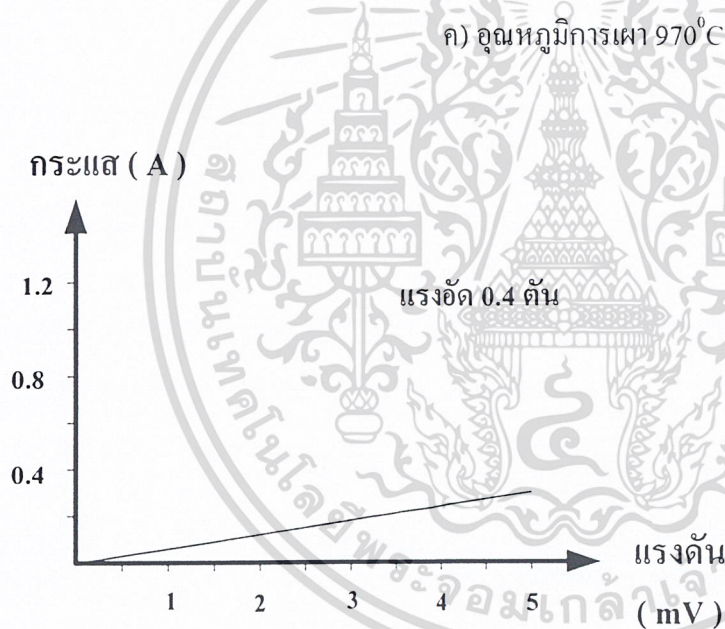
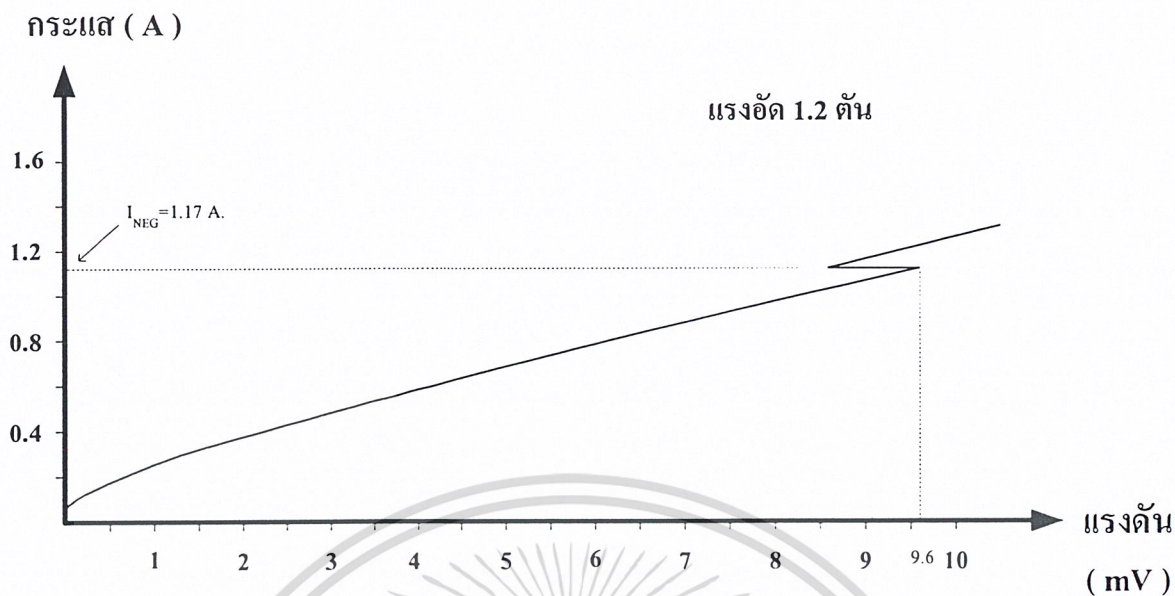
ข) อุณหภูมิการเผา 950°C



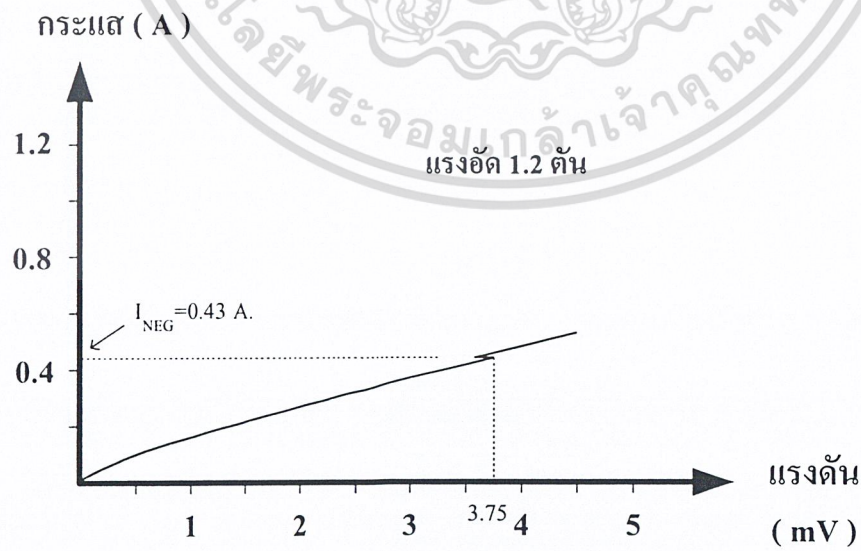
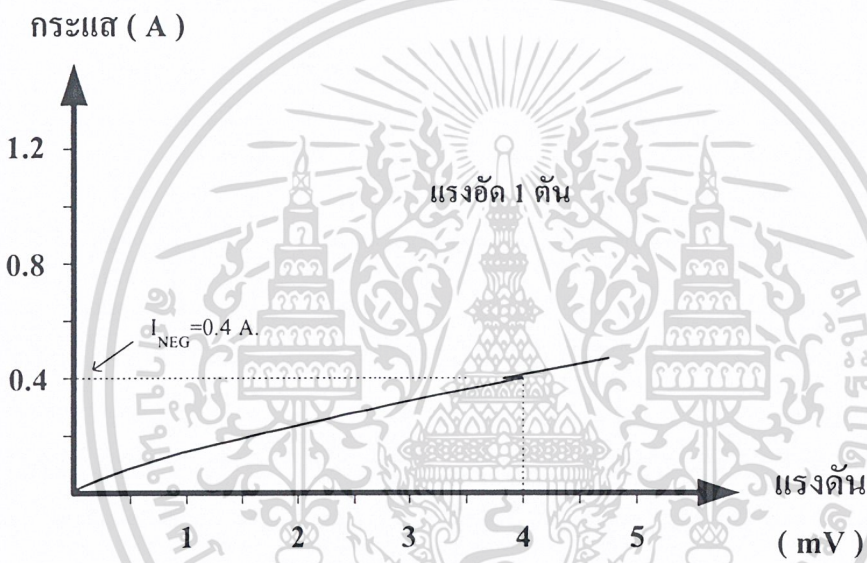
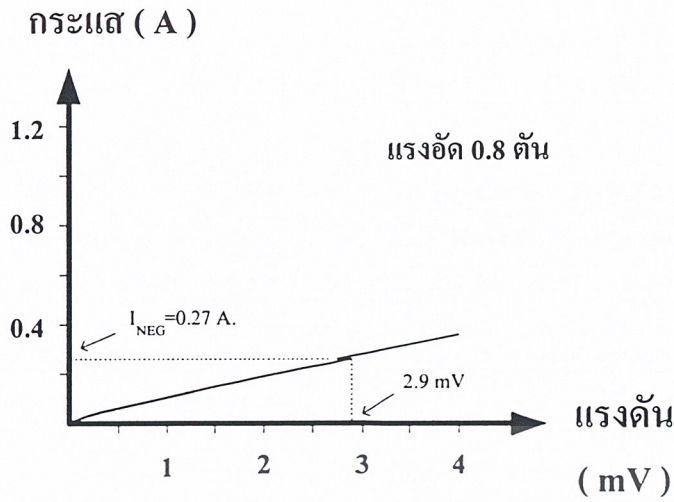
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



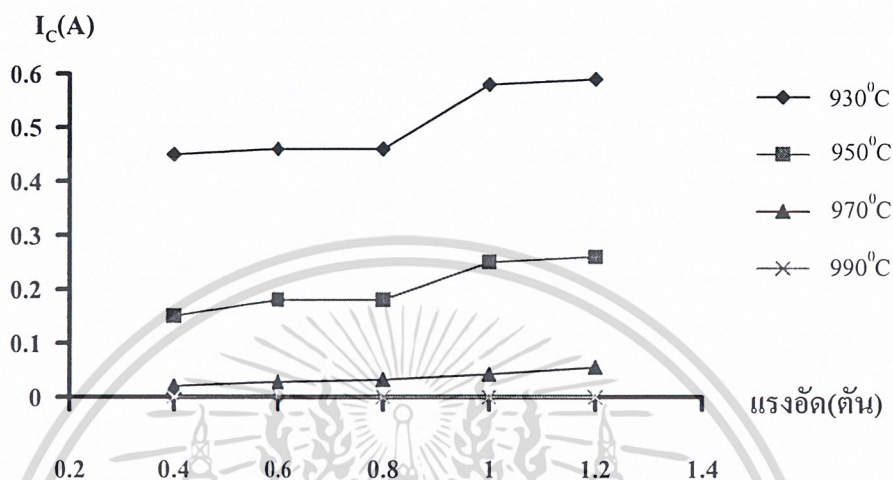
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งผู้เป็นเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้
 รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

3.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับกระแสวิกฤต

พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 3.17 ก)-ง) สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับปริมาณกระแสวิกฤตที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณกระแสวิกฤตสูงสุด และเมื่อพิจารณาแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปค่าต่างๆ ณ อุณหภูมินี้ จะเห็นว่าที่แรงอัด 0.4 ตันจะให้กระแสวิกฤตที่มีค่าต่ำสุดคือ 0.45 A. เมื่อให้แรงอัดเพิ่มมากขึ้นเป็น 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน ปริมาณกระแสวิกฤตก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะที่แรงอัด 1.2 ตัน ซึ่งเป็นแรงอัดค่าสูงสุด ก็ส่งผลให้ปริมาณกระแสวิกฤตมีค่ามากที่สุดคือ 0.59 A.

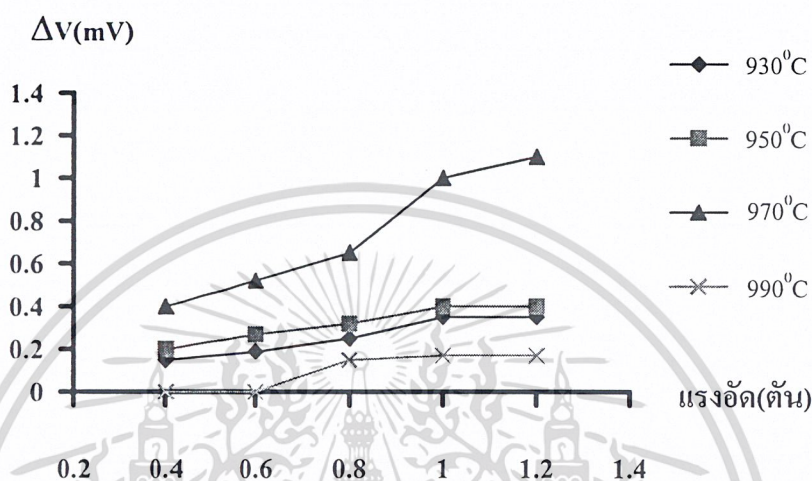
พิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส กระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ จะมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส กล่าวคือที่แรงอัดต่ำสุด 0.4 ตัน จะได้ปริมาณกระแสวิกฤต 0.15 A. และเมื่อให้แรงอัดเพิ่มมากขึ้น ปริมาณกระแสวิกฤตก็เพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งที่แรงอัด 1.2 ตัน ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.26 A.

ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ปริมาณกระแสวิกฤตที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเผา 930 และ 950 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ที่แรงอัด 0.4 ตัน ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าเท่ากับ 20 mA. และที่แรงอัด 1.2 ตันกระแสวิกฤตจะมีค่าเท่ากับ 55 mA.

เอกสารนี้เป็นส่วนที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าต่ำมาก คือต่ำกว่า 1 mA. นั้นแสดงว่าชิ้นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการเสถียรภาพได้ง่ายจากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 ความสัมพันธ์ของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับขนาดของความต้านทานเชิงลบที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.17 ก)-ง) สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับขนาดของความต้านทานเชิงลบ(ΔV) ได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความต้านทานเชิงลบกับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

จากกราฟในรูปที่ 3.19 แสดงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อขนาดของความต้านทานเชิงลบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า

ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมินี้จะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาขนาดของความต้านทานเชิงลบ (ΔV) ที่เกิดขึ้น กลับมีขนาดไม่มากนัก พิจารณาที่แรงอัดต่ำสุด 0.4 ตัน ขนาดของความต้านทานเชิงลบมีค่าเท่ากับ 0.15 mV. และเมื่อเพิ่มแรงอัดให้สูงขึ้นเป็น 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน ขนาดของความต้านทานเชิงลบ (ΔV) ก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ พิจารณาที่แรงอัดสูงสุด 1.2 ตัน ขนาดของความต้านทานเชิงลบมีค่าเท่ากับ 0.35 mV.

พิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าขนาดของความต้านทานเชิงลบ (ΔV) จะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาดของความต้านทานเชิงลบ (ΔV) ที่แรงอัดค่าต่างๆก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส กล่าวคือที่แรงอัดต่ำสุด 0.4 ตัน ขนาดความต้านทานเชิงลบมีค่าเท่ากับ 0.2 mV. และเมื่อให้แรงอัดเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งที่แรงอัดสูงสุด 1.2 ตัน ขนาดของความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.4 mV.

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดของความต้านทานเชิงลบจะมีขนาดมากที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเผาที่อื่น เริ่มที่แรงอัด 0.4 ตัน ขนาดของความต้านทานเชิงลบ (ΔV) มีค่าเท่ากับ 0.4 mV. และเมื่อให้แรงอัดเพิ่มมากขึ้น ขนาดของความต้านทานเชิงลบก็มีขนาดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งที่แรงอัดสูงสุด 1.2 ตัน มีผลทำให้ขนาดของความต้านทานเชิงลบมีขนาดใหญ่ที่สุด เท่ากับ 1.05 mV.

ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบจะเกิดขึ้นที่แรงอัดตั้งแต่ 0.8 ตันขึ้นไปเท่านั้น พิจารณาที่แรงอัด 0.8 ตัน ขนาดของความต้านทานเชิงลบมีค่าเท่ากับ 0.15 mV. และที่แรงอัดสูงสุดคือ 1.2 ตัน ขนาดของความต้านทานเชิงลบมีค่าเท่ากับ 0.17 mV.

3.5 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O (1:2:3) ที่ ผสมด้วย Gd-Ba-Cu-O (1:2:4)

3.5.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O (1:2:4)

จากหัวข้อ 3.1.1 มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

$$\text{Gd}_2\text{O}_3 = (2 \times 157.26) + (3 \times 15.99) = 362.49 \text{ กรัมต่อโมล}$$

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

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

การคำนวณจากสมการเคมี

$$1) \text{Gd}_2\text{O}_3 \quad 1 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 362.49 \text{ กรัม}$$

$$\quad \text{ถ้า} \quad \frac{1}{2} \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 181.245 \text{ กรัม}$$

$$2) \text{BaCO}_3 \quad 1 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 197.348 \text{ กรัม}$$

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

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

$$\quad \text{ถ้า} \quad 4 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 318.18 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด} = 181.245 + 394.696 + 318.18$$

$$= 825.7795 \text{ กรัม}$$

ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} = 825.7795 \text{ กรัม}$

จากสารตั้งต้นทั้งหมด 825.7795 กรัม ถ้าต้องการ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้แคลโคลิเนียมออกไซด์ 1.367 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 4.779 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 3.853 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

ในขั้นตอนกระบวนการเผาสาร ขั้นตอนแรกจะเป็นสารที่อัตราส่วน 1:2:3

1. ชั่งสารประกอบ Gd_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้จากการเผามาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีด้ามมาบดให้ละเอียดเป็นผง

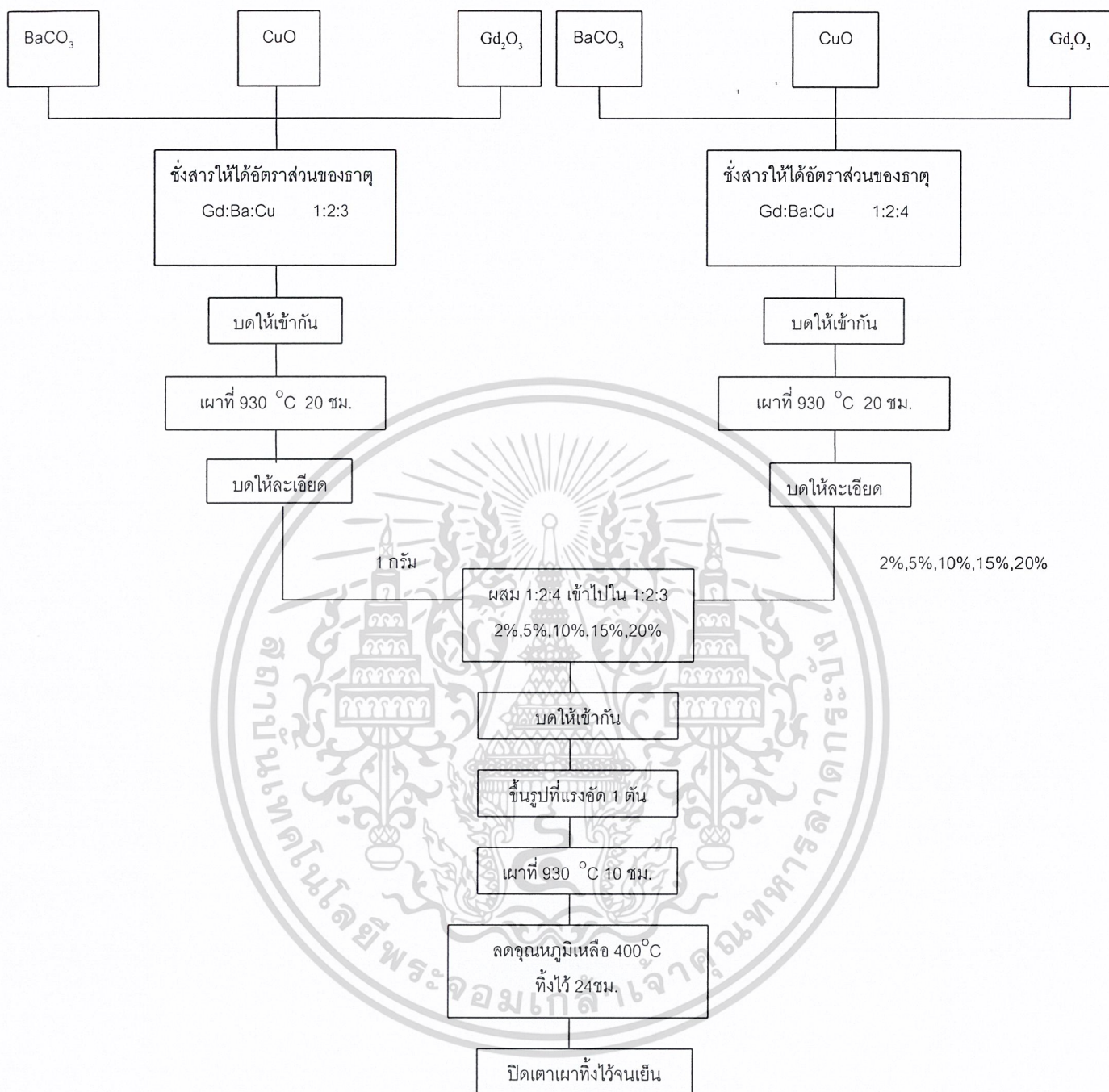
ขั้นตอนที่ สอง เป็นการเผาสารที่อัตราส่วน 1:2:4

5. ชั่งสารประกอบ Gd_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 4
6. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
7. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
8. นำผงสารมาบดให้ละเอียดเป็นผง

ขั้นตอนที่ สาม

9. นำผงสารที่อัตราส่วน 1:2:4 เข้ามาผสม กับ ผงสารที่อัตราส่วน 1:2:3 โดยแยกผสมที่อัตราส่วน (2% , 5% , 10% , 15% , 20%)
10. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน
11. นำผงสารจำนวน 1 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตัน ให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
12. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ ใช้เวลาในการเผา 10 ชั่วโมง
13. ลดอุณหภูมิลงเหลือ $400^{\circ}C$ อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
14. ปิดเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



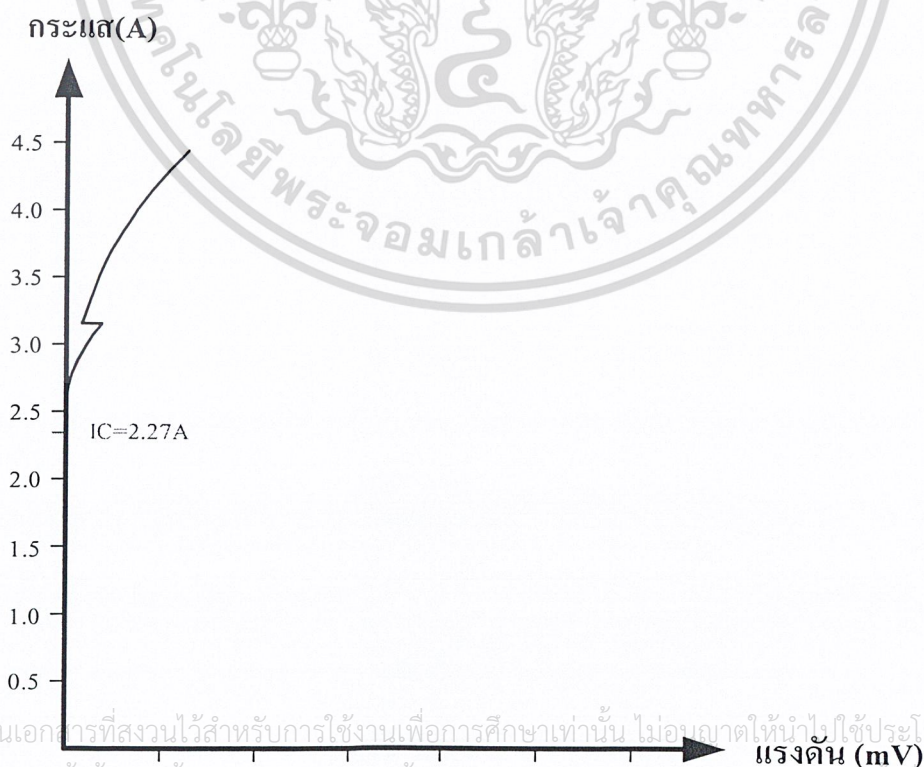
รูปที่ 3.20 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผสมด้วยผงสาร Gd-Ba-Cu (1:2:4) ปริมาณ 2%, 5%, 10%, 15%, 20%

ใช้สารในการขึ้นรูป 1 กรัม ดังนั้น ถ้าผสม 2% จำนวน 1:2:4 = 20 มิลลิกรัม จำนวน 1:2:3 = 980 มิลลิกรัม
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
 ไม่รับผิดชอบต่อผู้ให้ข้อมูล
 ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกระบวนการสร้างในรูปที่ 3.20 ในขั้นตอนแรกจะเป็นการนำเอาสาร BaCO_3 , CuO และ Gd_2O_3 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:2:3 และ 1:2:4 แยกบดสารแต่ละกลุ่มให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 930°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง นำสารที่ผ่านการเผามาบดให้ละเอียดเป็นผง จากนั้นขั้นตอนต่อไปนำสารที่อัตราส่วน 1:2:4 เข้าไปผสมกับสารที่อัตราส่วน 1:2:3 ที่ปริมาณ 2%, 5%, 10%, 15% และ 20% โดยสาร 1 เม็ดมีปริมาณ 1 กรัม จากนั้นนำผงสารมาอัดขึ้นรูปให้เป็นเม็ดที่แรงอัด 1 ตัน จากนั้นนำเม็ดสารทั้งหมดมาเผาที่อุณหภูมิ 930°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิลงเหลือ 400°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาทำการปิดเตาเผา

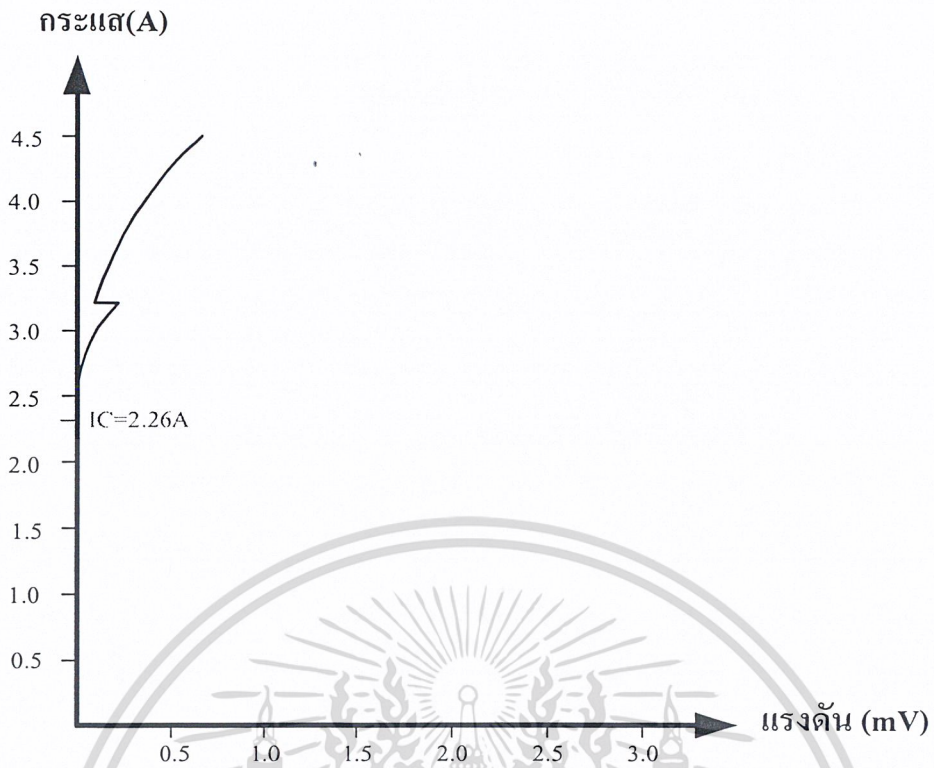
3.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของการผสมสาร Gd-Ba-Cu (1:2:4) เข้าไปในสาร Gd-Ba-Cu (1:2:3) ที่ปริมาณ 2%, 5%, 10%, 15% และ 20% ต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าว่ามีผลอย่างไร สำหรับการทดลองเรานำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาตัดแต่งรูปทรงดังรูปที่ 3.3 จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.4 สำหรับจุดที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารอยู่ที่ขั้ว 2-3 ส่วนขั้ว 1-4 ใช้สำหรับป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าและออกชิ้นสารตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.21 ก) - จ)

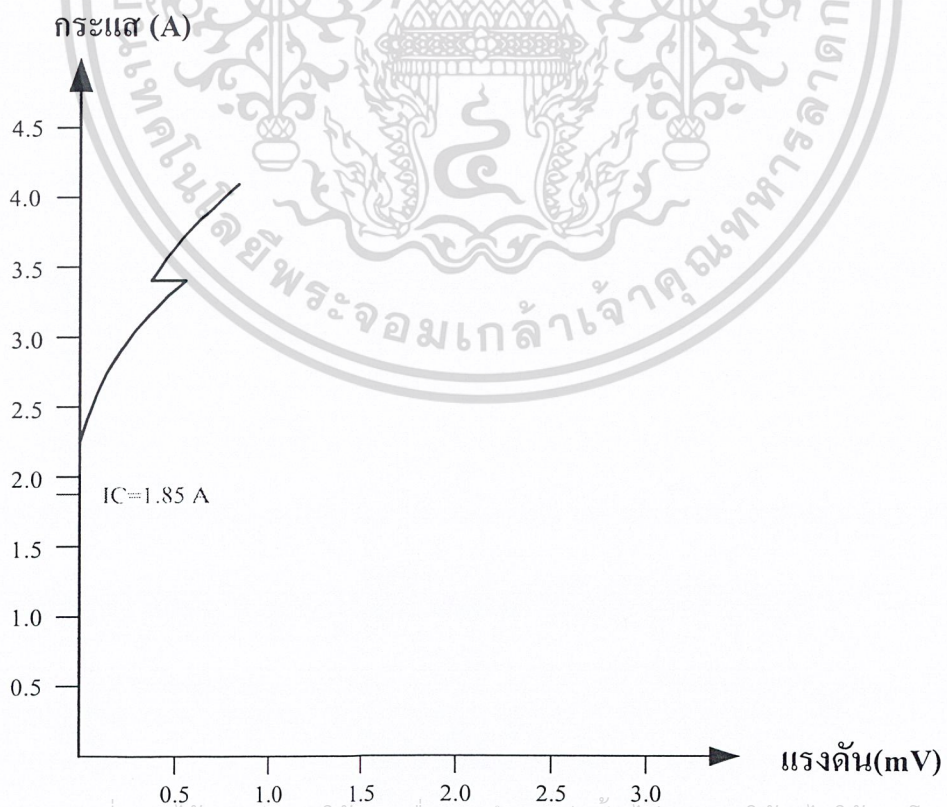


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามคัดลอกเผยแพร่และใช้อย่างอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) ปริมาณ สาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) 0%

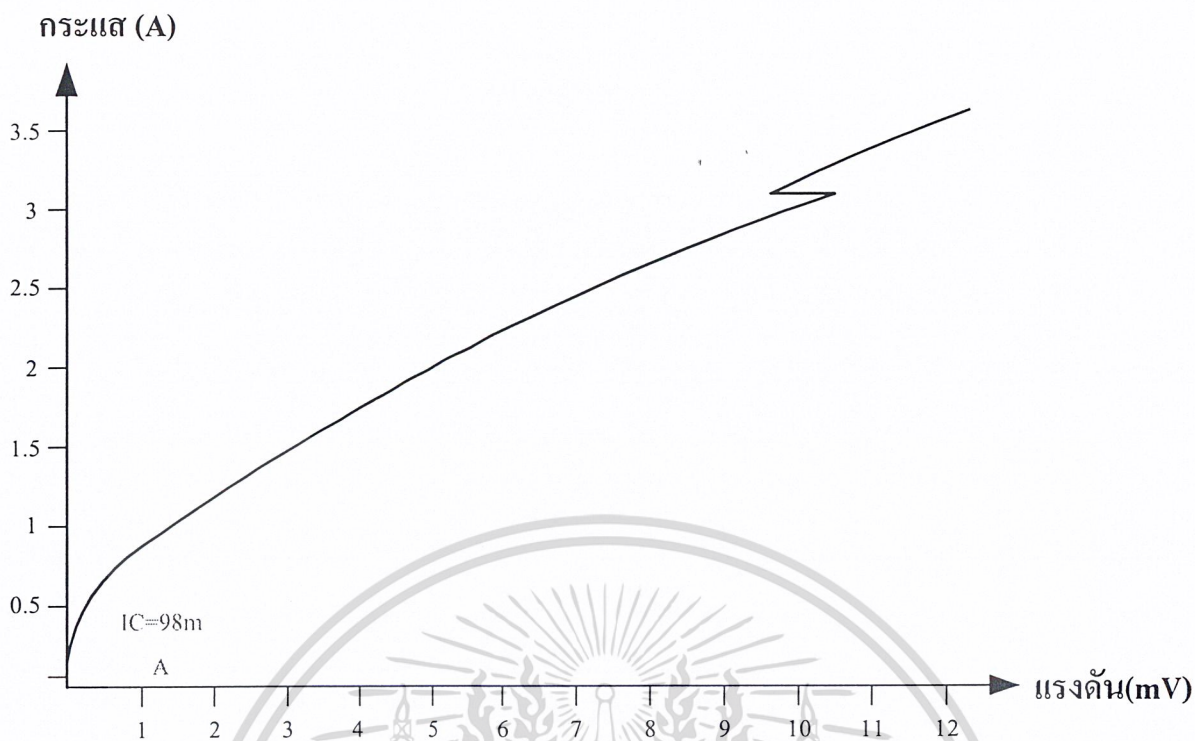


ข) ปริมาณสาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) 2%

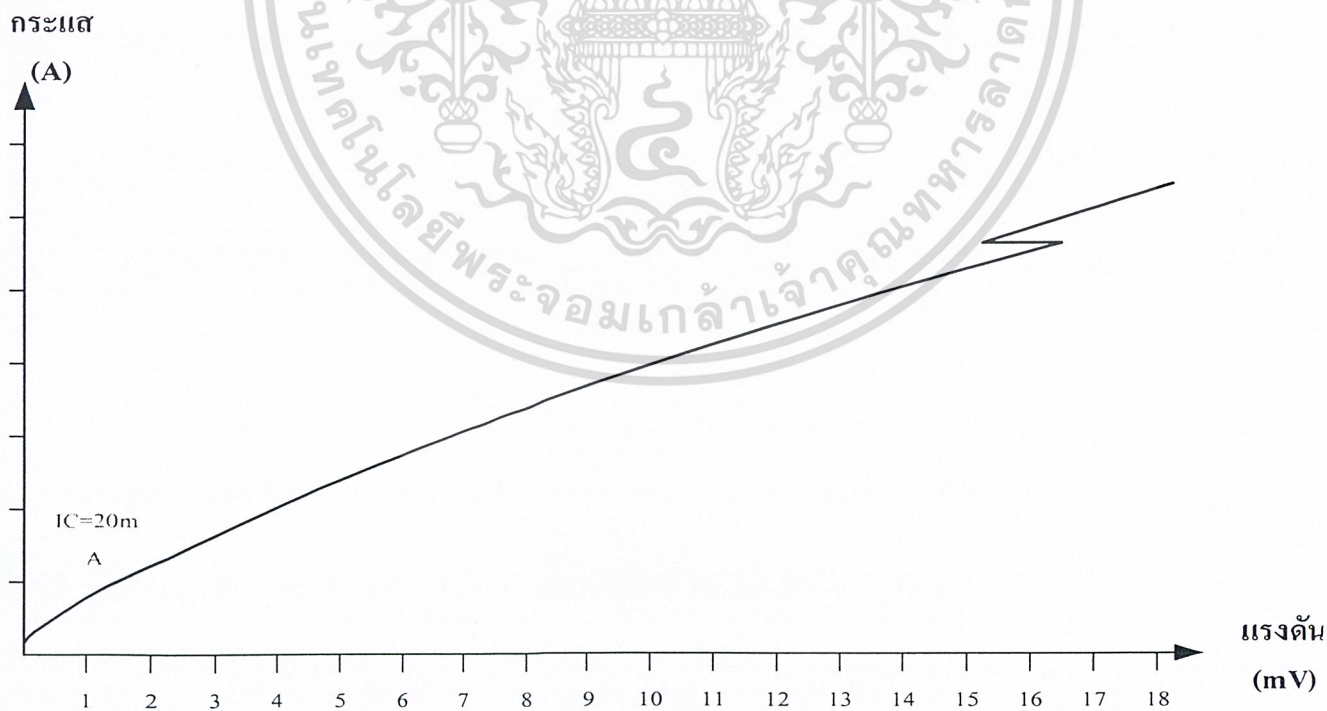


ค) ปริมาณสาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

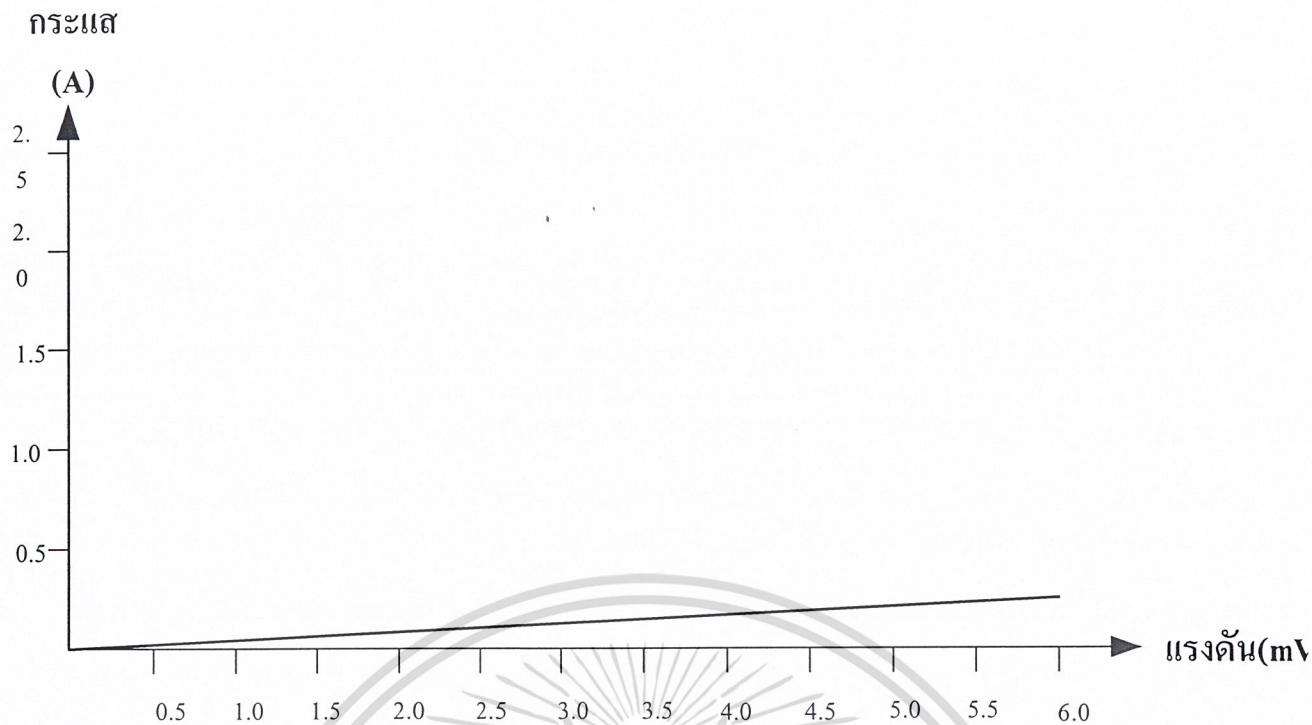


ง) ปริมาณ สาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) 10%



จ) ปริมาณ สาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ด) ปริมาณ สาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) 20%

รูปที่ 3.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อัตราส่วนการผสมสาร Gd-Ba-Cu-O (1:2:4) ปริมาณ 0%,2%,5%,10%,15%,20%

จากผลการทดลอง ในรูปที่ 3.21 ก)-จ) แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วน 0% นั้นกระแสวิกฤตจะมีค่าสูงสุดและปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ จะน้อยคือเม็ดสารมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยิ่งยวดสูงสุด และเมื่อปริมาณ Gd-Ba-Cu (1:2:4) เพิ่มเป็น 5%,10%,15% กระแสวิกฤตจะลดลง ส่วน ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบนั้นจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ที่ 20 % นั้นจะทำให้เม็ดสารไม่เกิดความต้านทานเชิงลบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

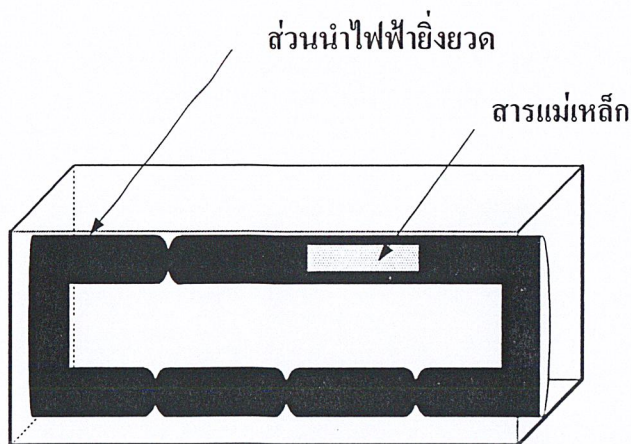
เนื้อสารภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd-Ba-Cu-O จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดปะปนอยู่กับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และการที่เนื้อสารจะสามารถรักษาสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น เนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งลักษณะการเชื่อมต่อจะมีทั้งลักษณะการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรง และเชื่อมต่ออย่างหลวม เรียกว่าจุดคอด ซึ่งในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสารแม่เหล็กเนื่องจากสารแกดโดลิเนียมเป็นสารประเภทเฟอร์โรแมกเนติก

เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจึงใช้แบบจำลองโครงสร้างมาอธิบาย โดยส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกแทนด้วยท่อ สองท่อ ด้านบน และด้านล่าง โดยด้านบนจะมีจุดคอดน้อยกว่าด้านล่าง และมีส่วนของสารแม่เหล็กอยู่ และการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเสียบภาพได้นั้น ทั้งท่อบนและท่อล่างจะต้องขาดออกจากกัน โดยส่วนที่ขาดได้ง่ายที่สุดคือจุดคอด และบริเวณรอบส่วนที่มีสารแม่เหล็กอยู่ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

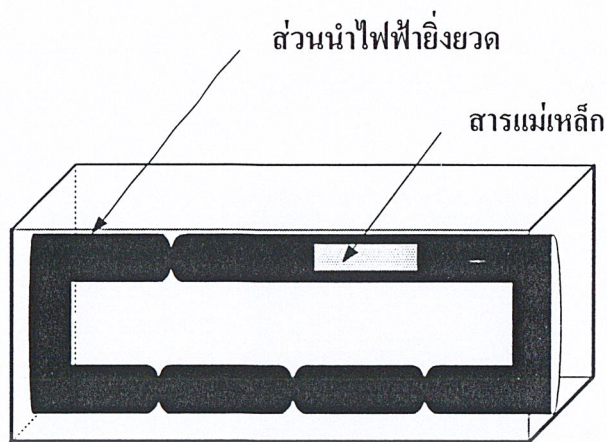
4.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ดังนั้น แบบจำลองโครงสร้างจึงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผา ซึ่งแสดงดังรูป 4.3 ก-ง)

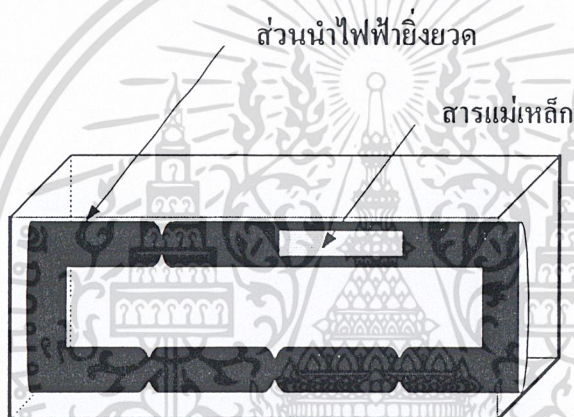


ก) อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส

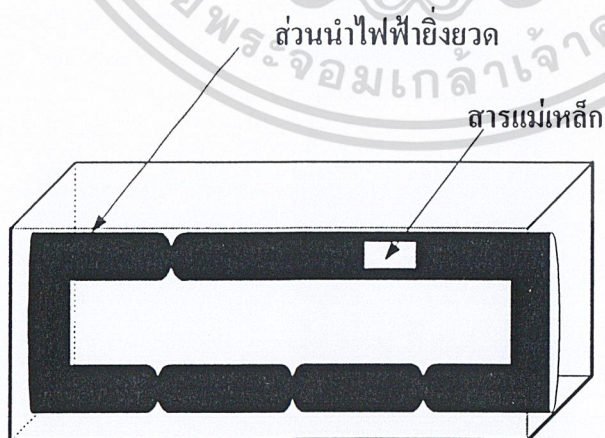
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส



ค) อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส



ง) อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 930°C จะมีการผลึกแม่เหล็กสูงสุด ทำให้อิทธิพลของสารแม่เหล็กมีน้อย จากรูป 4.3 ก) ทำให้ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กมีขนาดค่อนข้างเล็ก และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 950°C พบว่าส่วนที่ดูแม่เหล็กมีบริเวณเพิ่มขึ้นแสดงว่า อิทธิพลของสารแม่เหล็กสูงขึ้น ดังรูป 4.3 ข) ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กใหญ่ขึ้น ที่อุณหภูมิ 970°C พบว่ามีการดูแม่เหล็กสูงสุด แสดงว่าอิทธิพลของสารแม่เหล็กมีสูง แสดงโดยรูป 4.3 ค) และที่อุณหภูมิ 990°C เมื่อดสารแทบจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว การดูและการผลึกแม่เหล็กจึงน้อยมาก ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กจึงมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเผาอื่น ๆ แสดงดังรูป 4.3 ง)

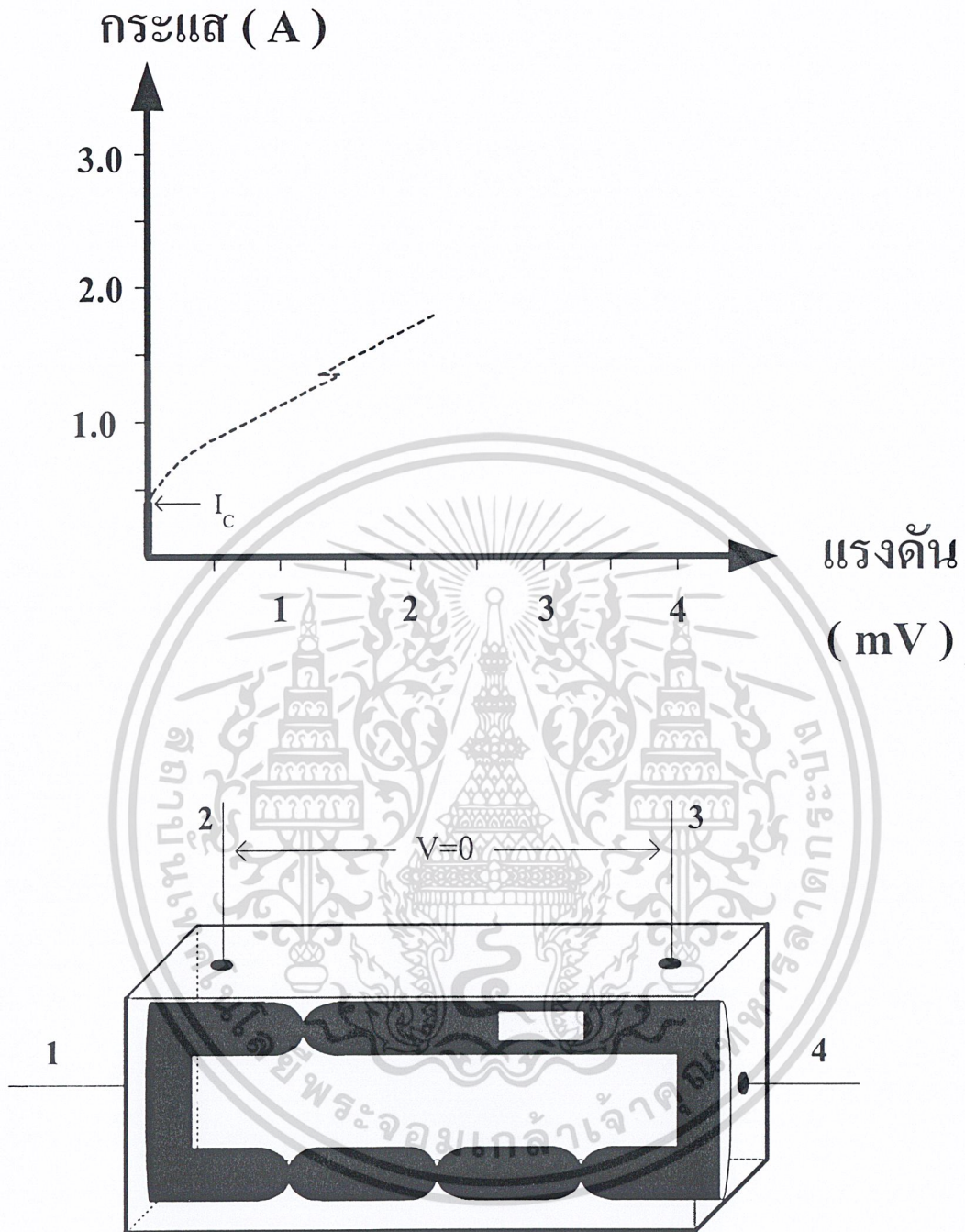
4.3 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

4.3.1 อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

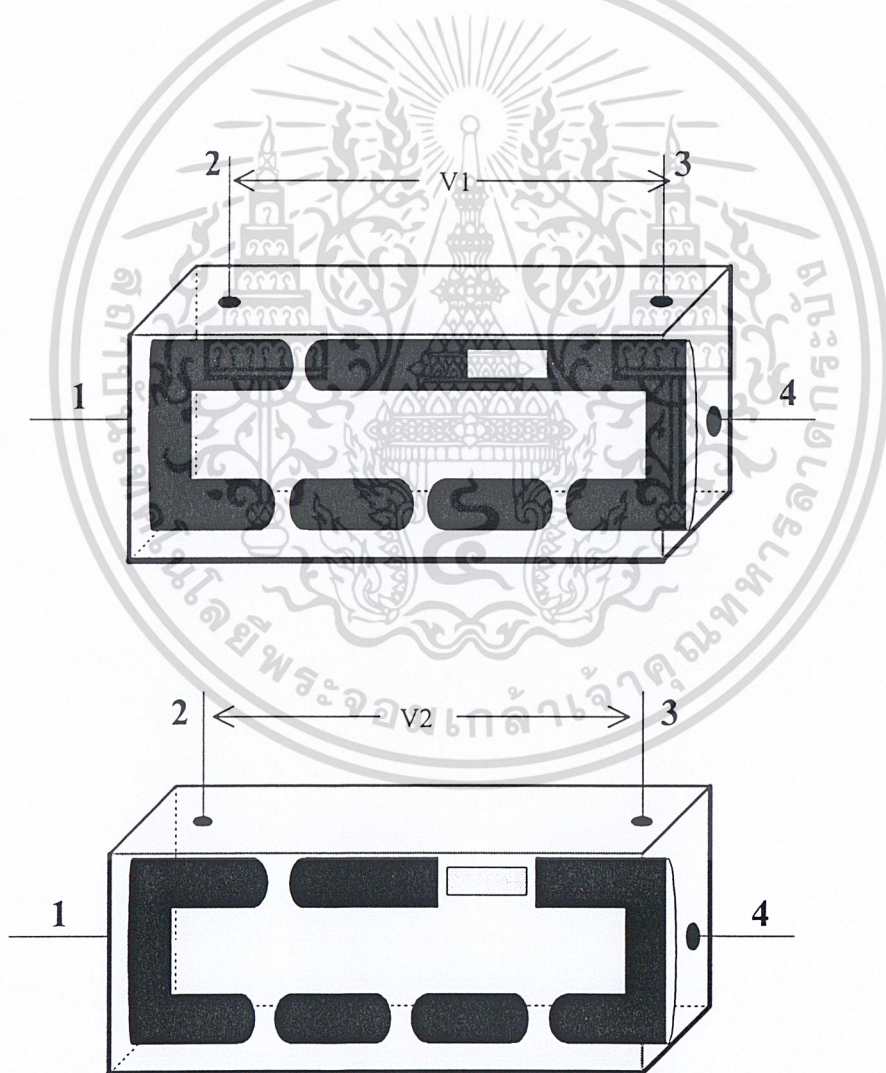
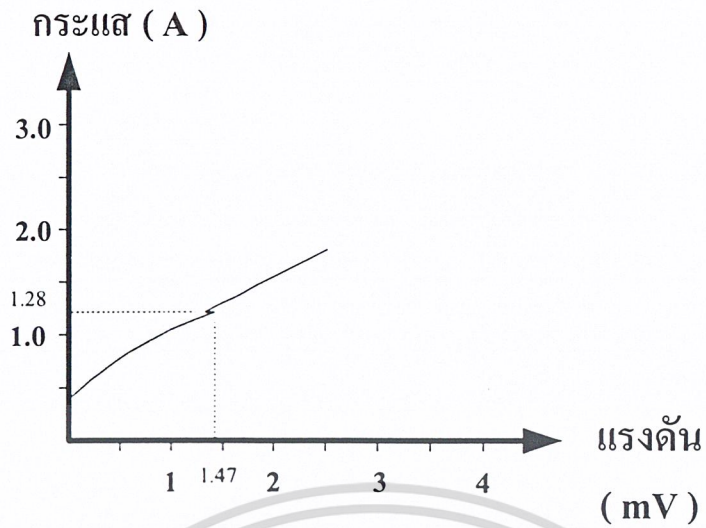
จากผลการทดลองผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd-Ba-Cu-O พบว่าที่แรงอัด 0.4 ตัน ให้ปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบมีค่าน้อยสุด และจะมีค่ามากที่สุดที่แรงอัด 1.2 ตัน ดังนั้น เพื่อให้เห็นความแตกต่างจึงอธิบายที่แรงอัด 0.4 กับ 1.2 ตัน ดังรูป 4.4 และรูป 4.5 (ก-ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

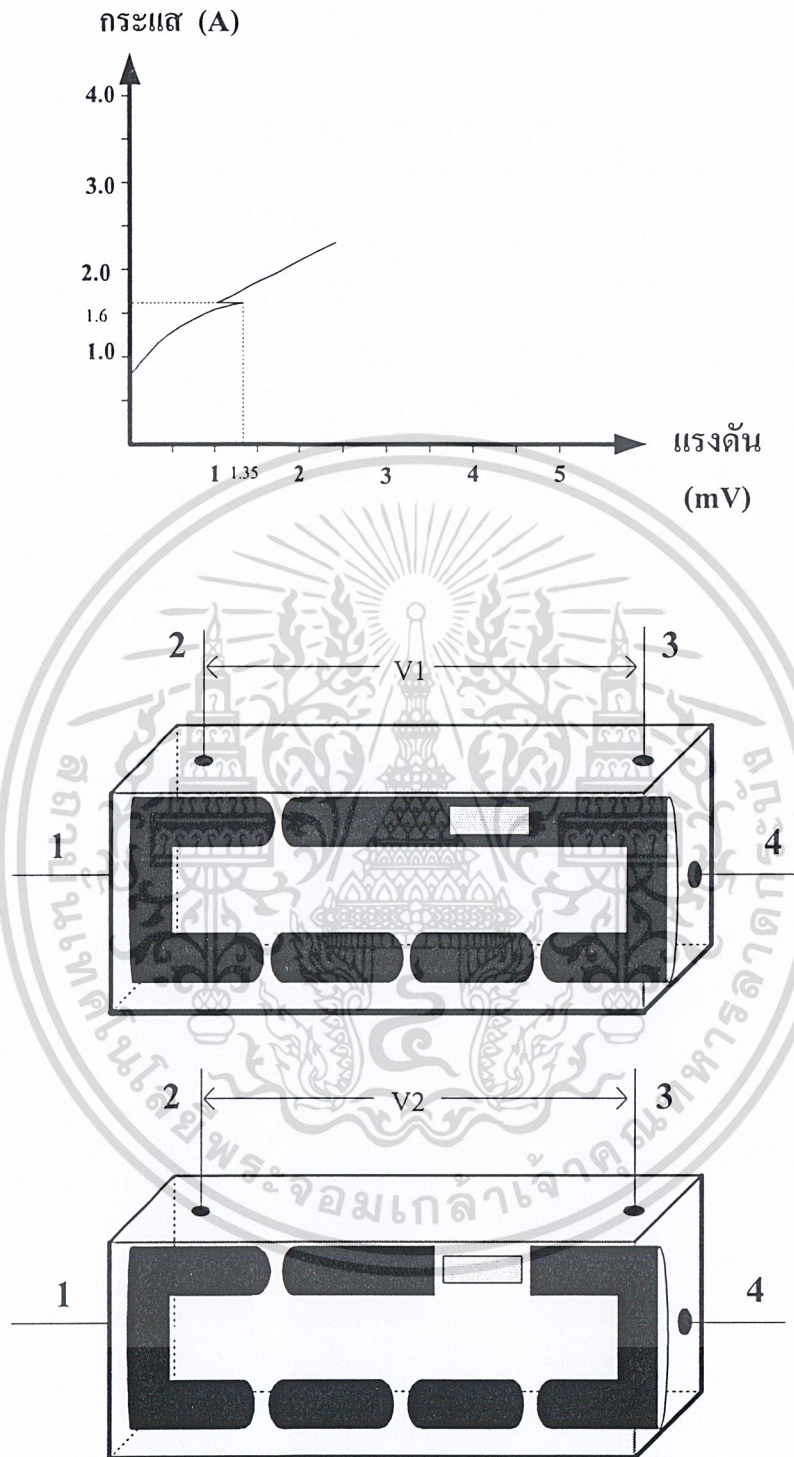


รูปที่ 4.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของ
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 ตัน (930 องศาเซลเซียส) เมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ
กระแสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แรงอัด 1.2 ตัน

รูปที่ 4.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารของตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาด 0.4 และ 1.2 ตัน (930 องศาเซลเซียส) เมื่อกระแสนี้ค่ามากกว่า การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใด กระแสที่ถูกต้องห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.4 เมื่อมีกระแสเหนี่ยวนำหรือเท่ากับกระแสวิกฤต พบว่าบริเวณจุดยอดจะยื่นออกเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเริ่มเข้าไปทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่ยังคงรักษาสภาพอยู่ได้ โดยกระแสที่ไหลนั้นจะไหลทั้งที่ด้านบนและด้านล่าง

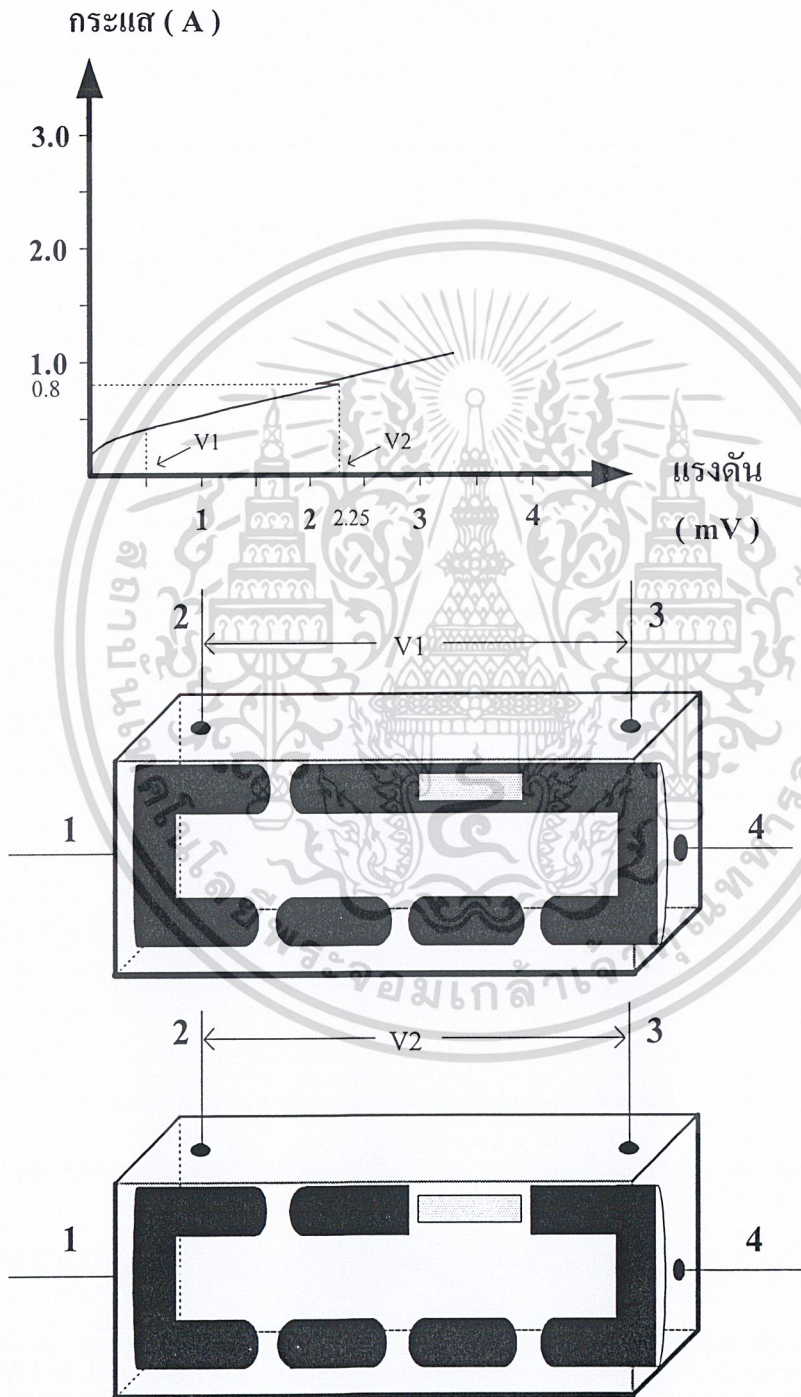
จากกราฟรูปที่ 4.5 ก) เป็นการให้กระแสเกินค่ากระแสวิกฤต ทำให้จุดยอดขาดออกจากกัน ทำให้มีความต้านทานเกิดขึ้นบริเวณจุดยอดและมีแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร แต่เนื่องจากจุดยอดด้านบนขาดเป็นปริมาณน้อยกว่าด้านล่างมาก ทำให้กระแสส่วนใหญ่ไหลผ่านเข้าด้านบนเป็นหลัก และเมื่อป้อนกระแสเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้จุดขาดด้านบนและด้านล่างขยายตัวมากขึ้น จนเมื่อป้อนกระแสถึงค่าๆ หนึ่ง ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดส่วนที่มีสารแม่เหล็กขาดออกอย่างทันทีทันใด และมีบริเวณกว้างเมื่อเทียบกับจุดยอด ทำให้ความต้านทานที่ด้านบนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสจึงไหลทางที่ด้านล่างซึ่งความต้านทานต่ำกว่าทำให้แรงดันตกคร่อมขึ้นสารลดลงอย่างรวดเร็ว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ” แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีขนาดเล็ก เนื่องจากความแตกต่างของแรงดัน ระหว่างที่ด้านบนและด้านล่างไม่มากนัก และเมื่อป้อนกระแสสูงขึ้น แรงดันตกคร่อมขึ้นสารก็จะสูงขึ้นอีก เนื่องจากการขยายตัวของจุดขาดนั่นเอง

จากกราฟรูป 4.5 ข) เมื่อกระแสที่แรงอัด 1.2 ตัน ซึ่งเมื่อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแข็งแรงกว่าที่ 0.4 ตัน มาก ทำให้เมื่อป้อนกระแสเกินค่ากระแสวิกฤต การขยายของส่วนขาดจะขยายได้ช้ากว่าที่ 0.4 ตัน แสดงว่าความต้านทานบริเวณจุดยอดมีน้อย เมื่อป้อนกระแสถึงค่าหนึ่งท่อดำนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออก ทำให้ความต้านทาน ที่ด้านบนสูงกว่าที่ด้านล่างมาก ทำให้กระแสกลับมากไหลทางที่ด้านล่าง เนื่องจากความต้านทานต่ำกว่ามาก ทำให้แรงดันตกคร่อมขึ้นสารลดลงอย่างรวดเร็วและมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ามีค่ามาก นั่นคือขนาดปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบสูงนั่นเอง

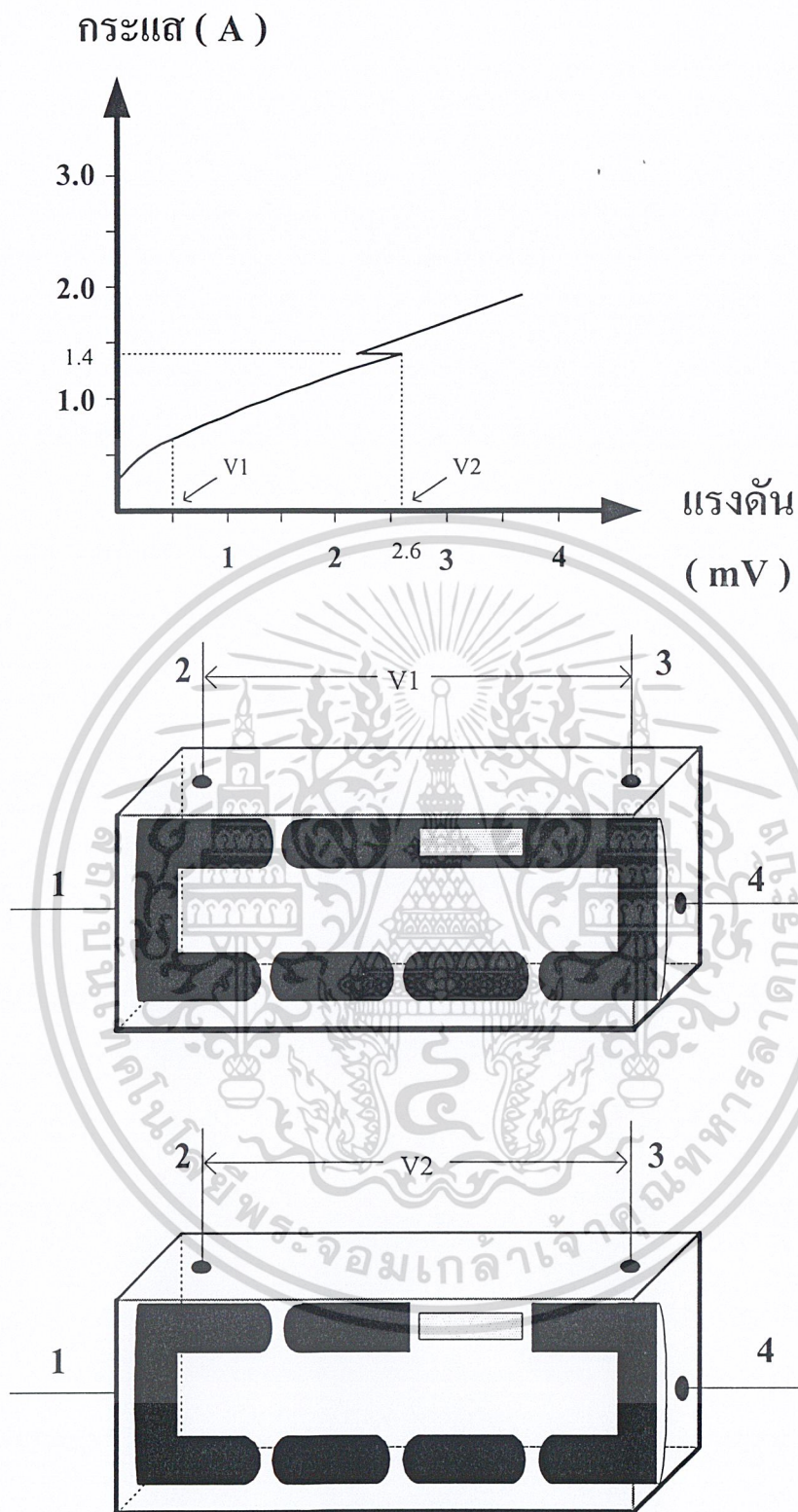
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

เป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมาอธิบายเปรียบเทียบระหว่างแรงอัด 0.4 กับ 1.2 ตัน ดังรูปที่ 4.6 ก)-ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ก) แรงอัด 0.4 ตัน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แรงอัด 1.2 ตัน

รูปที่ 4.6 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของ

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (950 องศาเซลเซียส)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

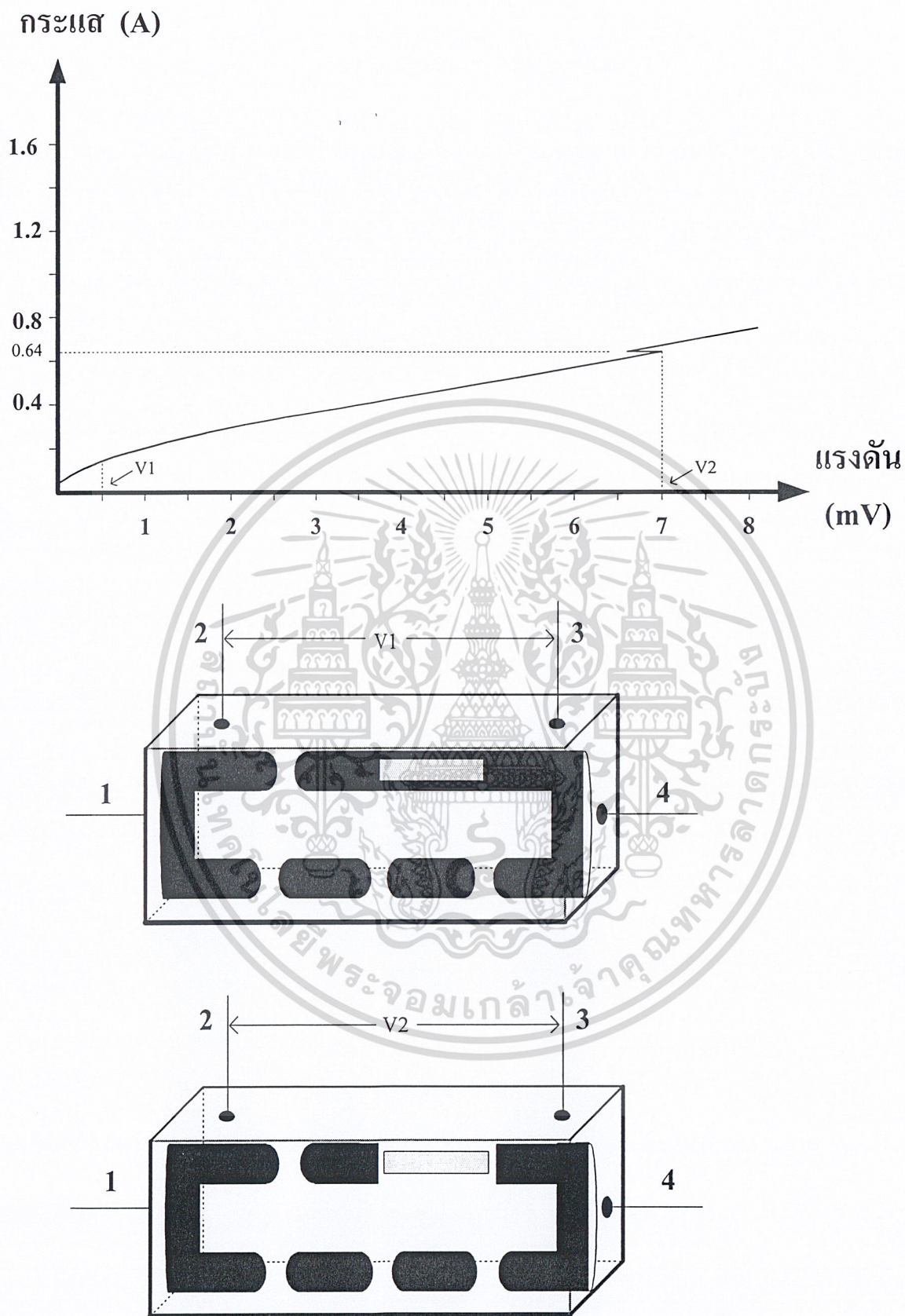
จากกราฟในรูปที่ 4.6ก) ซึ่งเป็นชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส พบว่ากระแสวิกฤตมีค่าต่ำลง แสดงว่า ความแข็งแรงของชิ้นสารมีน้อย เมื่อป้อนกระแสเกินค่ากระแสวิกฤตทำให้บริเวณจุดคอดขาดออก ทำให้ชิ้นสารเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาว และเมื่อป้อนกระแสสูงขึ้นจุดขาดจะขยายตัวได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความแข็งแรงของชิ้นสารน้อยกว่า และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง ท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาวในส่วนที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออกจากกันทำให้ความต้านทานของท่อด้านบนสูงขึ้นทันที กระแสส่วนใหญ่จึงกลับไปไหลทางท่อด้านล่าง ทำให้แรงดันลดลง เกิดความต้านทานเชิงลบขึ้น และเมื่อกระแสสูงขึ้นอีกจุดขาดจะขยายตัวขึ้นอีก ทำให้แรงดันสูงขึ้น สังเกตว่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบนั้นจะมีมากกว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากบริเวณที่เป็นสารแม่เหล็กมีขนาดใหญ่กว่านั่นเอง

จากกราฟในรูปที่ 4.6ข) ซึ่งเป็นชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 1.2 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าปริมาณกระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.26 A. ซึ่งมีค่ามากกว่าชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน นั้นแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของชิ้นสารมีมากกว่า แสดงโดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ในขณะที่ชิ้นสารเสียสภาพการนำไฟฟ้าที่ยาว จุดคอดจะขาดออกและขยายตัวได้น้อยกว่าชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน จึงทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีมากกว่าเนื่องมาจากผลต่างของแรงดันระหว่างท่อตัวนำด้านบนและล่างมีมากนั่นเอง

4.3.3 อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

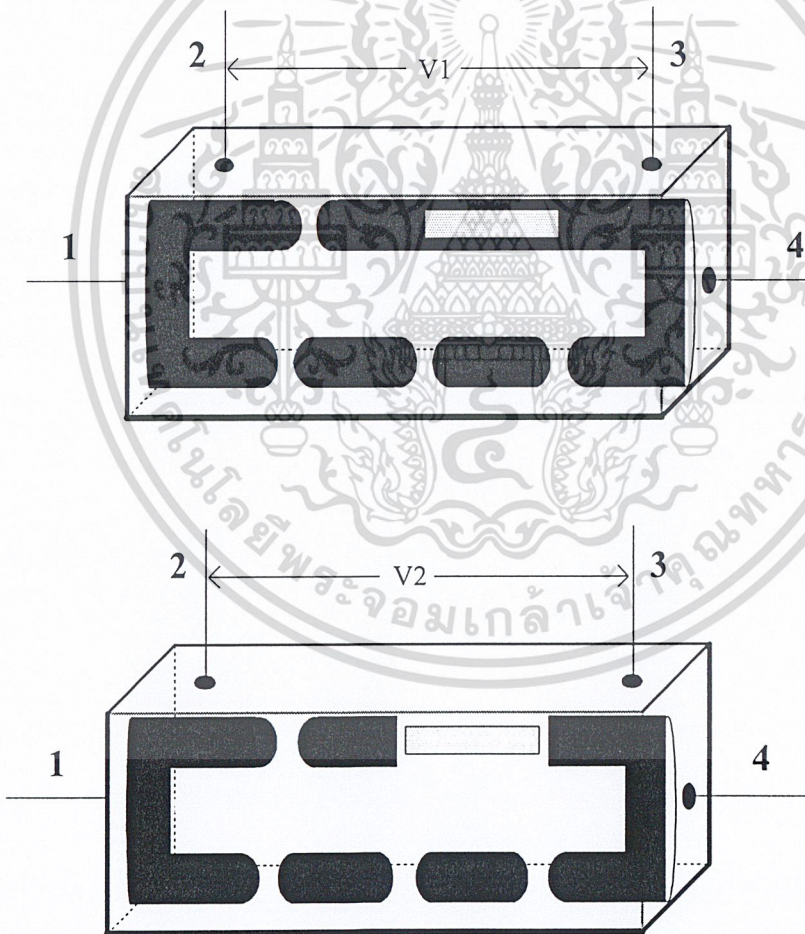
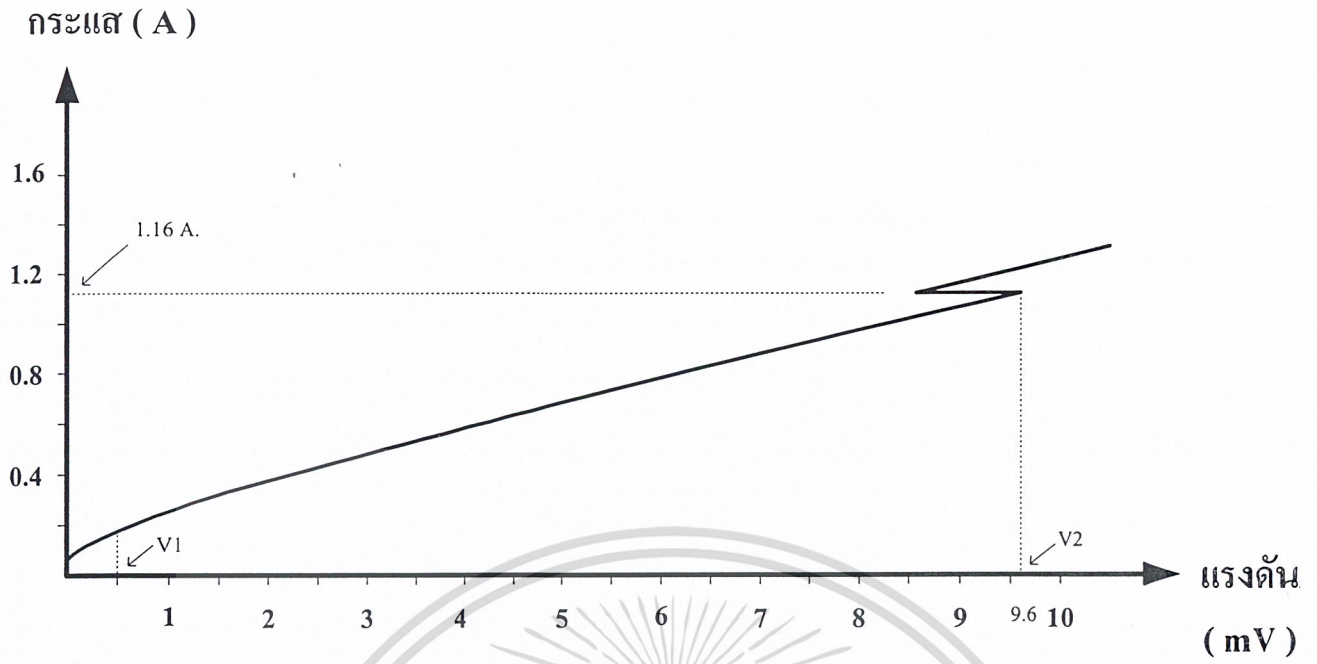
เป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมาอธิบายเปรียบเทียบระหว่างชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน กับ 1.2 ตัน ดังรูปที่ 4.7ก)-ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงอัด 0.4 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แรงอัด 1.2 ตัน

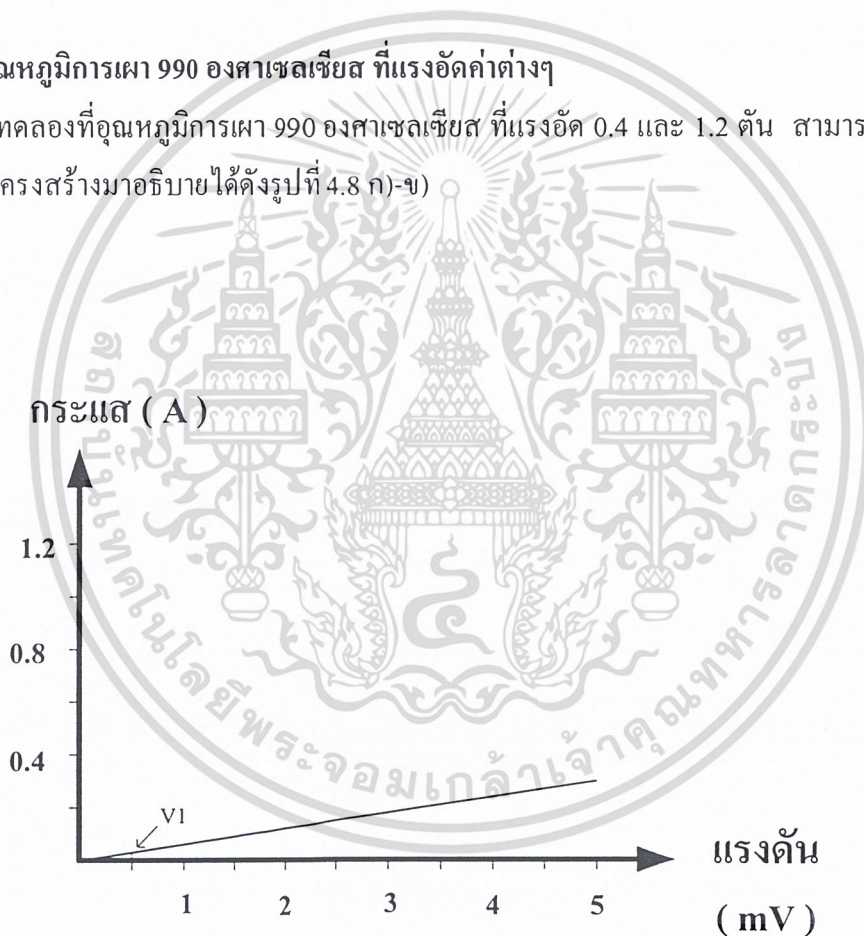
รูปที่ 4.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (970 องศาเซลเซียส)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 ก) ซึ่งเป็นเม็ดสารที่ผ่านแรงอัดในการขึ้นรูป 0.4 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่สารแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ที่สุด เมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเผาอื่น ทำให้ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบพบว่ามีมีขนาดใหญ่ที่สุด

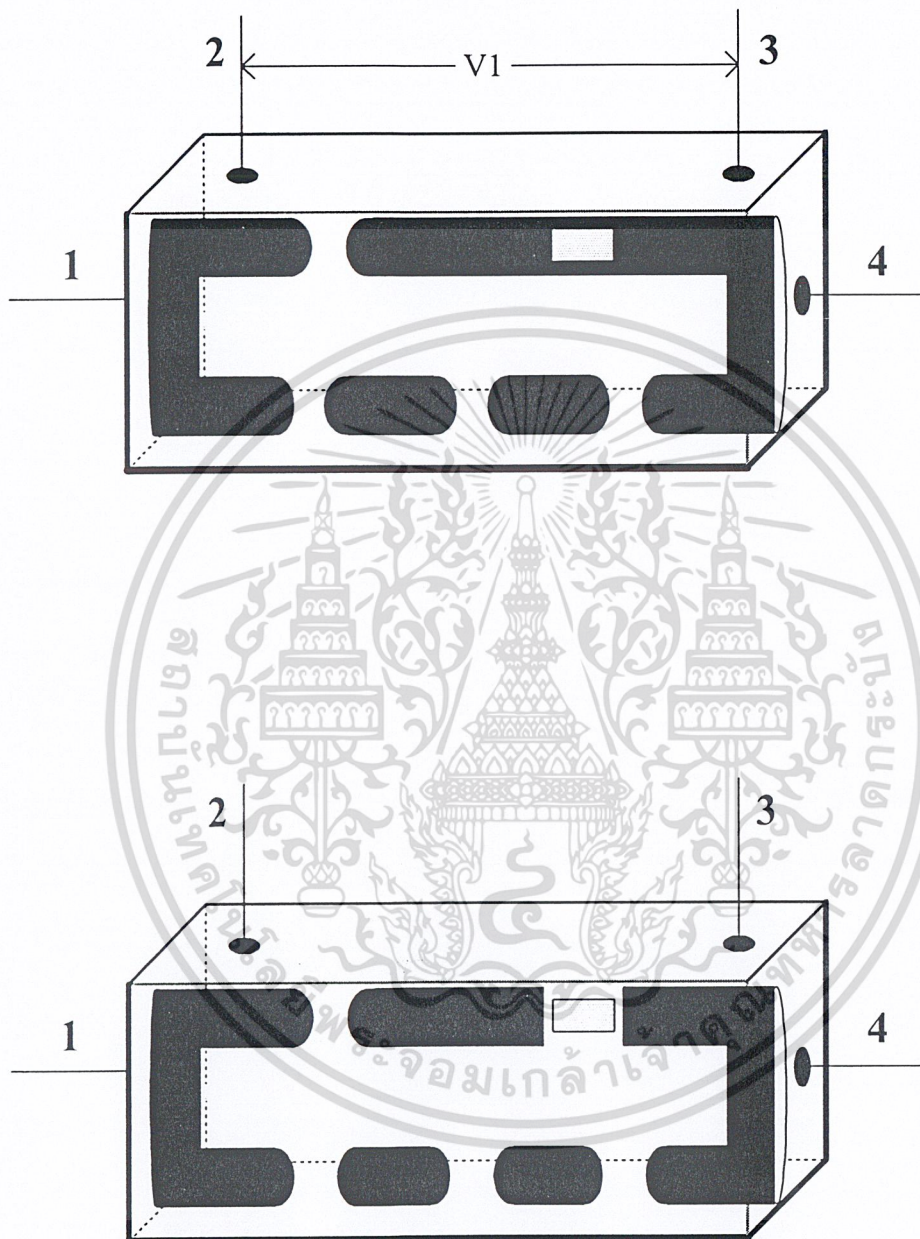
จากรูปที่ 4.7 ข) ขณะที่เม็ดสารเสียดสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จุดขาดจะขาดออก และจะขยายตัวมากขึ้นเมื่อป้อนกระแสสูงขึ้น แต่การขยายตัวของจุดขาดจะน้อยกว่าเม็ดสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน เนื่องจากที่แรงอัด 1.2 ตันนี้ เนื้อสารจะมีความแข็งแรงมากกว่าทำให้ผลต่างแรงดันของท่อตัวนำด้านบนและด้านล่างมีมาก ฉะนั้นปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ มีค่ามากกว่าที่ 0.4 ตัน

4.3.4 อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

จากการทดลองที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ที่แรงอัด 0.4 และ 1.2 ตัน สามารถนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมาอธิบายได้ดังรูปที่ 4.8 ก)-ข)

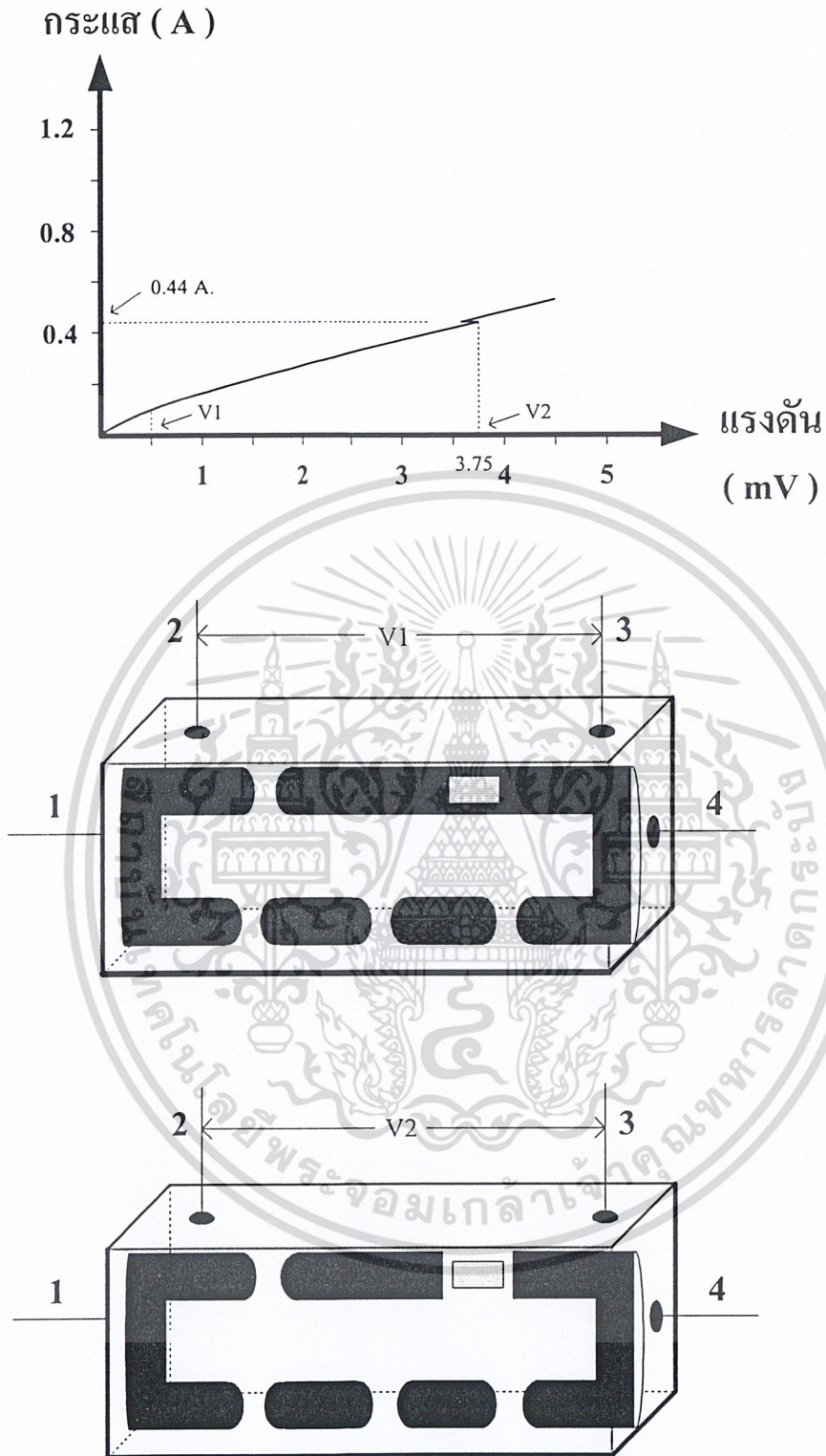


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงอัด 0.4 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แรงอัด 1.2 ตัน

รูปที่ 4.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของ

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (990 องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 ก) พบว่าปริมาณกระแสวิกฤตน้อยมาก ทำให้ชิ้นสารเสียหายได้ง่าย เมื่อป้อนกระแสเกินค่ากระแสวิกฤตจะขาดออกและขยายตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อป้อนกระแสถึงค่าหนึ่ง ท่อตัวนำบริเวณที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออก แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณส่วนขาดระหว่างท่อตัวนำด้านบนและด้านล่างจะใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างท่อตัวนำด้านบนและล่างจึงไม่แตกต่างกัน ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบจึงไม่เกิดขึ้น

จากในรูปที่ 4.8 ข) จะพบว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น เนื่องจากที่แรงอัด 1.2 ดัน ความแข็งแรงของชิ้นสารมีมากกว่า ทำให้การขยายตัวของจุดขาดน้อยกว่า เมื่อท่อตัวนำบริเวณที่มีสารแม่เหล็กอยู่ขาดออก ปริมาณการขาดของท่อด้านบนและด้านล่างจึงไม่เท่ากัน ทำให้เกิดผลต่างของแรงดันระหว่างท่อด้านบนและท่อด้านล่างเกิดขึ้น ทำให้ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์

ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ เบื้องต้นนั้นกล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และการนำแบบจำลองโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ส่วนของการทดลองสรุปได้ดังนี้

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ทำการศึกษาคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งจากการทดลองพบว่าเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ และยังได้ทำการศึกษาถึงผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่แรงอัดค่าสูงขึ้น โดยจะสูงสุดที่ 1.2 ตัน ส่วนอุณหภูมิในการเผามีการทดลองทั้งหมด 4 ค่า คือ 930 ,950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกระแสวิกฤตจะลดลง และที่ 970 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ขณะเกิดความต้านทานเชิงลบสูงและมีค่าต่ำสุดที่ อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส และเมื่อนำผงสาร Gd-Ba-Cu-O อัตราส่วน 1:2:4 เข้าไปผสมกับ ผงสารที่อัตราส่วน 1:2:3 ในปริมาณ 2%,5%,10%,15% และ20% พบว่า ถ้าปริมาณของสาร (1:2:4) เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตลดลง และขนาดของความต้านทานเชิงลบมีค่าสูงขึ้น จนเมื่อ ผสมที่ 20% จะทำให้เม็ดสารไม่เกิดความต้านทานเชิงลบ

จากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของความต้านทานเชิงลบ คือ แรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป , อุณหภูมิการเผา โดยสามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมาอธิบายได้อย่างสอดคล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิสิษฐ วังศ์สุทธิธรรม นพดล สิทธิพล ชบา สุริยาอมรานนท์ และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง. “แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24. 2544. หน้า 992-997.
- [2] คุณยวัจน์ จอมแสง. “การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้