

แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก  
Macrostructure Model of Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 61768  
วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก  
Macrostructure Model of Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

ผู้จัดทำ

นางสาว วาสนา สงวนวงษ์ รหัส 45015291

นาย วิโรจน์ โอสถานนท์ รหัส 45015293

นาย อูรธา ตันวิบูลย์ รหัส 45015306



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อเรื่อง	แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	
	แบบเซรามิก	
นักศึกษา	นางสาว วาสนา สงวนวงษ์	รหัส 45015291
	นาย วิโรจน์ โอสถานนท์	รหัส 45015293
	นาย อรุชา ตันวิบูลย์	รหัส 45015306
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	
ปีการศึกษา	พ.ศ. 2547	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง	

### บทคัดย่อ

ในการศึกษาถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก พบว่า ภายในชั้นสารในขณะที่อยู่ในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะประกอบด้วย ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ต่อเชื่อมกันตลอดชั้นสารรวมถึงส่วนนำไฟฟ้า และมีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งสังเกตได้จากมีปรากฏการณ์คู่แม่เหล็กขึ้น

ในการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างมหภาคโดยการตะไบรูปทรงชั้นสารจะทำให้ปริมาณกระแสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีการเปลี่ยนแปลง และจากการทดสอบโดยศึกษาสภาพการจำแม่เหล็กของชั้นสารที่ถูกตะไบเป็นรูปทรงต่างๆจะพบว่าการตะไบเนื้อสารมีผลต่อค่าสภาพการจำแม่เหล็ก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคได้อย่างสอดคล้อง

<b>Topic Title</b>	<b>Macrostructure Model of Gd-Ba-Cu-Osuperconducting Ceramic Materials</b>	
<b>Students</b>	Miss Wassana Sanguanvong	Student ID 45015291
	Mr. Wiroj Osathanon	Student ID 45015293
	Mr. Uracha Tanwibool	Student ID 45015306
<b>Programme</b>	Electronics Engineering	
<b>Year</b>	2004	
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang	

### ABSTRACT

In study of Macrostructure Model of Gd-Ba-Cu-O superconducting Ceramic Material. It was found the material in superconductor position has superconductor part, conductor part and magnetic substance compound to superconductor. To consider by absorb magnetic.

In experiment of Macrostructure Model it was also found that the factors that influenced the critical current and the voltage during the negative resistance phenomena and memory state were to file shape of material. Results of experiment are according to the hypothesis.

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จสมบูรณ์ของโครงการวิจัยชิ้นนี้ เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำให้แนวคิดตลอดจนวิธีแก้ไขปัญหาที่เป็น ประโยชน์ต่อโครงการนี้และคอยให้การสนับสนุนตลอดเวลา ขอขอบคุณ พี่วิสิฐ วงศ์สุทธิธรรม ที่คอยให้ความช่วยเหลือแนะนำลำดับขั้นตอนของการทำโครงการนี้ ทั้งคอยดูแลเอาใจใส่ตลอดมา ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้พวกข้าพเจ้ามีความรู้ในด้านต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกคน ที่คอยให้ความสนุกสนานกับพวกข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้ให้กำเนิดพวกข้าพเจ้า ที่คอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุน ด้านศึกษา ให้ความรัก และกำลังใจ แก่พวกข้าพเจ้าตลอดมา และตลอดไป



นางสาว วาสนา สงวนวงศ์  
(นางสาว วาสนา สงวนวงศ์)

นาย วิโรจน์ ไอสถานนท์  
(นาย วิโรจน์ ไอสถานนท์)

นาย อรุชา ตันวิบูลย์  
(นาย อรุชา ตันวิบูลย์)

คณะผู้จัดทำ

## คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสารที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงกันอย่างแพร่หลาย อย่างเช่นที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีการศึกษาถึงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นๆ ที่มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน ซึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้ทำการวิจัยก็คือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งมีเนื้อสารเป็นเซรามิก จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ ทำให้เราค้นพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจนั่นคือ ความต้านทานเชิงลบ ซึ่งตามปกติแล้วจะไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่น ในโครงการชิ้นนี้ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันและสภาพการจำแม่เหล็ก ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O เมื่อรูปร่างของแบบจำลองได้เปลี่ยนแปลงไป ในรูปแบบต่างๆ



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
คำนำ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
ศัพท์เทคนิค	XI
สัญลักษณ์	XII
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 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)	4
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)	6
1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee Effect)	7
1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	8
1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก	8
1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2	8
1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)	10
1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ	11
1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)	11
1.7 ขอบเขตงานวิจัย	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	13
2.1 บทนำ	13
2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก	13
2.2.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)	13
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน	15
2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	16
2.3.1 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมารับความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสกับแรงดันไฟฟ้า	18
บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง	20
3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O	20
3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	20
3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา	21
3.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า	23
3.2 รูปทรงของชิ้นสารที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd- Ba-Cu-O	24
3.2.1 การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	24
3.3 ผลรูปทรงของชิ้นสารที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd- Ba-Cu-O	25
3.3.1 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า	25
3.4 รูปทรงของชิ้นสารที่มีผลต่อการจำสภาพแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd- Ba-Cu-O	27
3.4.1 ผลของรูปทรงที่มีผลต่อการจำสภาพแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd- Ba-Cu-O	29

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.2 แบบจำลอง โครงสร้างมหาคติที่ใช้อธิบายสภาวะการจำสภาพแม่เหล็ก	29
บทที่ 4 สรุปและวิจารณ์	36
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	39



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารที่ผ่านการตะไบเป็นรูปทรงต่างๆ

26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
viii  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes	1
รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส	4
รูปที่ 1.3 ปრაกฏการณ์ไมสเนอร์	6
รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	7
รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	7
รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2	9
รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ	10
รูปที่ 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)	11
รูปที่ 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)	12
รูปที่ 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก	14
รูปที่ 2.2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	15
รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	16
รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	17
รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	17
รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้า	18
รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	22
รูปที่ 3.2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	23
รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	23
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชั้นสารที่ผ่านการตัดแต่ง	24
รูปที่ 3.5 รูปทรงของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	25

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชั้นสารที่ตะไบ เป็นรูปทรง ก)-ง)	26
รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	27
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชั้นสารกับสนามแม่เหล็ก	28
รูปที่ 3.9 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	29
รูปที่ 3.10 รูปทรงของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยังไม่ผ่านการตัดแต่ง	30
รูปที่ 3.11 รูปทรงของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งเป็นร่อง	32
รูปที่ 3.12 รูปทรงของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งเป็นตัววี	33
รูปที่ 3.13 รูปทรงของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งเป็นตัวยู	34
รูปที่ 4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	36

## ศัพท์เทคนิค

กระแส	Current
แกด โดลิเนียมออกไซด์	Gadolinium Oxide
เกาส์	Gauss
ความเข้มซั้บได้ทางแม่เหล็ก	Magnetization
ความเข้มซั้บได้ในทางสูญญากาศ	Permeability of free space
ความเข้มซั้บได้สัมพัทธ์	Relative Permeability
ความต้านทาน	Resistance
ความต้านทานเชิงลบ	Negative Resistance
ความหนาแน่นกระแสลั้กฤด	Critical Current Density
ค่าลั้กฤด	Critical Values
คอปเปอร์ออกไซด์	Copper Oxide
เครื่องบันทึกลองแกน	X-Y Recorder
จุดคอด	Weak Point
เซรามิก	Ceramic
เซลเซียส	Celcius
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
ปรากฏการณ์ซิลสบี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	Meissner Effect
ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	Zero Resistance
แม่เหล็กเฟอร์โร	Ferromagnetic
แม่เหล็กไดอา	Diamagnetic
แรงดันไฟฟ้า	Voltage
สนามแม่เหล็กลั้กฤด	Critical Magnetic Field
สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	Magnetic Susceptibility
สารแม่เหล็ก	Magnetic Substance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตัว XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	wbm <sup>-2</sup>
B <sub>a</sub>	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้าที่ยาว	wbm <sup>-2</sup>
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก	Am <sup>-1</sup>
H <sub>c</sub>	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Am <sup>-1</sup>
H <sub>c1</sub>	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง	Am <sup>-1</sup>
H <sub>c2</sub>	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน	Am <sup>-1</sup>
I	กระแส	A
I <sub>c</sub>	กระแสวิกฤต	A
J <sub>c</sub>	ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต	Acm <sup>-1</sup>
M	สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก	Am <sup>-1</sup>
R	ความต้านทาน	Ω
T <sub>c</sub>	อุณหภูมิวิกฤต	K
χ	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	-
μ <sub>0</sub>	ความซึมซับได้ในสุญญากาศ	Hm <sup>-1</sup>
μ <sub>r</sub>	ความซึมซับได้สัมพัทธ์	-
ΔV	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า	V

# บทที่ 1

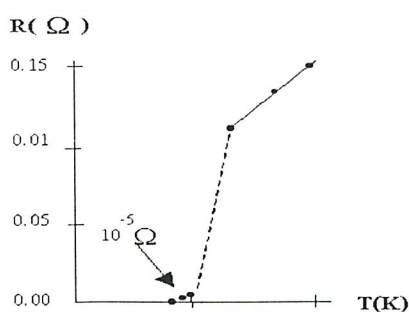
## บทนำ

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

### 1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปกติในโลหะตัวนำโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานเกิดขึ้น ซึ่งนักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป นาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลวโดยใช้ปรอทเป็นวัสดุในการทดลอง

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



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ Heike Kamerlingh Onnes การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ นาย Onnes ยังพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะชนิดอื่นๆ รวมทั้งโลหะผสมอีกหลายชนิด ทำให้ นาย Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1913 หลังจากนั้นก็มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาสนใจและทำการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 เคลวิน จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) และในปี ค.ศ. 1969 สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นไปเป็น 20 เคลวิน และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลว (จุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) ทำเป็นตัวหล่อเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้สำเร็จเป็นครั้งแรก

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองสารสตรอนเชียม (Sr) ปรากฏว่า อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงถึง 54 เคลวิน จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. ได้ทำการทดลองกับธาตุอิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นไปเป็น 95 เคลวิน ซึ่งสร้างความตื่นเต้นแก่วงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถที่จะใช้ในไฮโดรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นาย C.W. Chu ทดลอง) เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งในไฮโดรเจนเหลวนี้มีราคาถูกมากและสามารถจัดเตรียมได้ง่ายกว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มอิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) เรามักเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นไปเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าหมายไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้

## 1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

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

### 1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: $T_c$ )

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไป ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤต หรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ  $\frac{1}{4} T_c$  นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งหนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น [1] ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า  $T_c$  เข้าใกล้ 100 K อย่างเช่น ชิ้นสารที่ใช้มีค่า  $T_c \approx 95$  K ก็สามารถนำมาใช้งานได้

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

### 1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: $H_c$ )

เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field:  $H_c$ )

### 1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: $J_c$ )

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

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

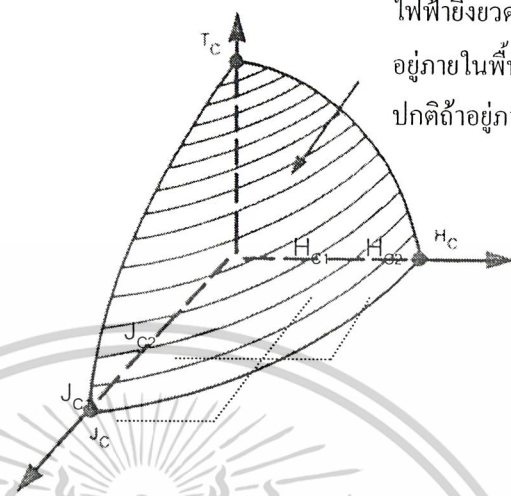
$T_C$  = อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ  
(อุณหภูมิวิกฤต)

$H_C$  = สนามแม่เหล็กวิกฤต

$J_C$  = ความหนาแน่นกระแสวิกฤต

อุณหภูมิ,  $T$

พื้นผิววิกฤต(วัสดุจะมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสำหรับค่า  $T$ ,  $H$  และ  $J$  ที่อยู่ในพื้นผิวและจะมีสภาพนำไฟฟ้าปกติถ้าอยู่ภายนอกพื้นผิว



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.2 ถ้าเราพิจารณาอะป้อนกระแสไบอัสให้กับชิ้นสาร โดยมีปริมาณความหนาแน่นกระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต  $J_C$  เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเป็น  $H_1$  ค่า  $J_C$  จะมีขนาดลดลงเป็น  $J_{C1}$  และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น  $H_2$  ค่า  $J_C$  ก็จะลดลงเหลือ  $J_{C2}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายมากขึ้น เป็นผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

### 1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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

#### 1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามามีค่าเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง นั่นคือ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอา (diamagnetic) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77 K

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

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

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

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

โดยที่ B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

M คือ สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)

$\chi_m$  คือ สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

$\mu_0$  คือ ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)

$\mu_r$  คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้  $B = 0$

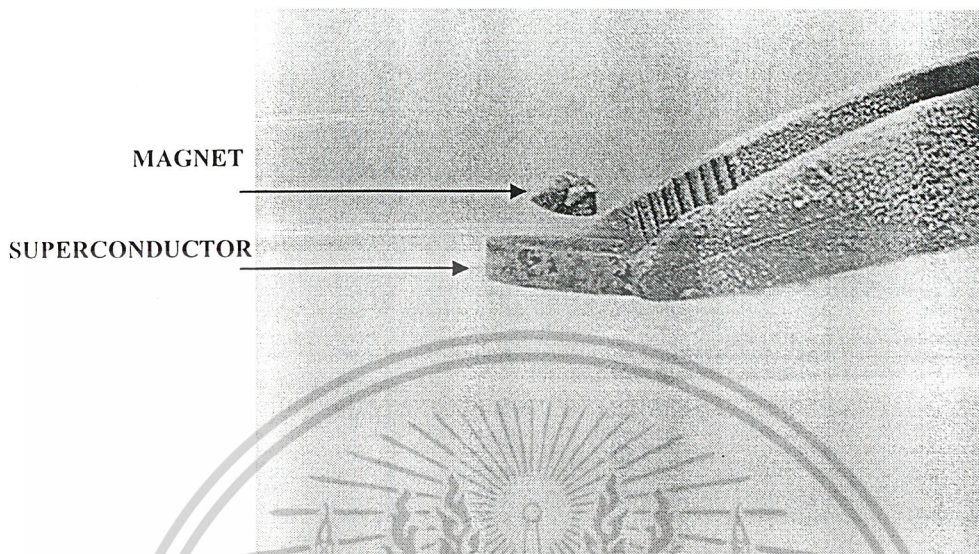
ทำให้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

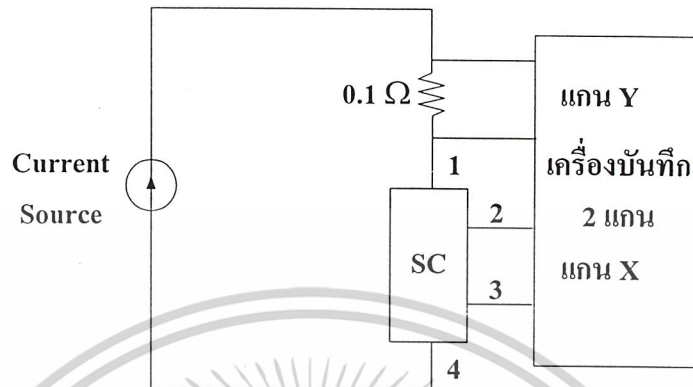


รูปที่ 1.3 ปรัชการณไมสเนอร์

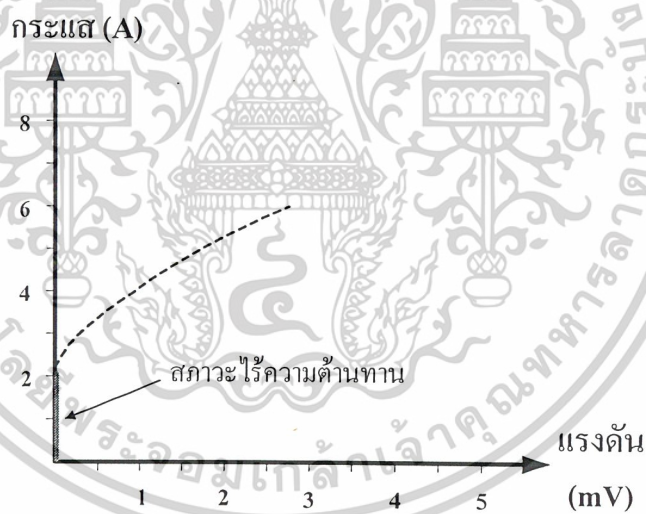
### 1.3.2 ปรัชการณไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

### 1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ( $I_c = 2 \text{ A.}$ ) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมขั้วสารหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านชั้นสารเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน  $y$  นั้นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

## 1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก [2]

การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีหนึ่ง คือการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ( $T_c$ ) และอีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชั้นสารจนกระทั่งมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต  $H_c(T)$  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

## 1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 [3]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) กาโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอัลลอย เช่น  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ,  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ,  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$  เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กับประเภทที่ 2 อยู่ที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมส์เนอร์นั่นเอง



ข) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

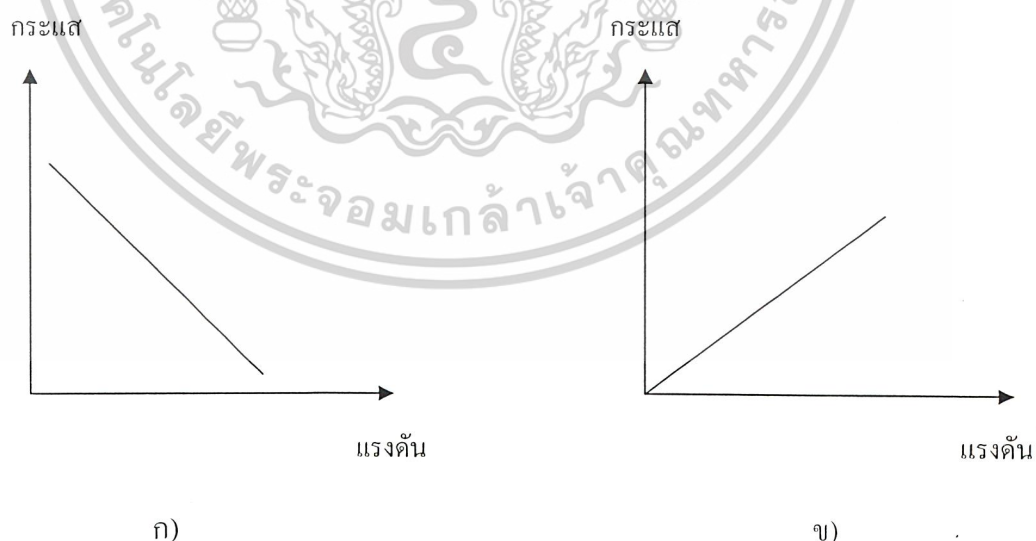
พิจารณารูปที่ 1.6 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H_0$ ) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว ค่า Magnetization ( $M$ ) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ( $H_c$ ) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสภาวะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้ จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก  $H_{C1}$  หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า  $H_{C2}$  สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

## 1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

เป็นความต้านทานที่กระแสไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ  
ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

ความต้านทานเชิงลบแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)

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

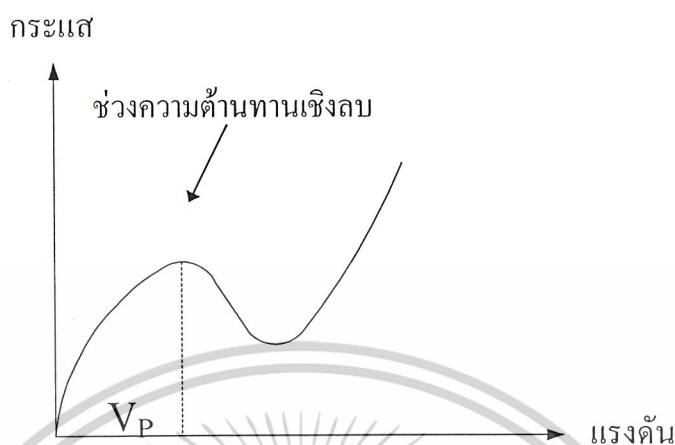


รูปที่ 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

#### 1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)

ลักษณะของความต้านทานเชิงลบชนิดนี้ จะคล้ายกับตัวอักษรตัว N ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมด้วยแรงดัน โดยต้องมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง (Peak Voltage) จึงเรียกความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ว่า Voltage controlled negative resistance (VCNR) ซึ่งจะพบใน Tunnel diode เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

### 1.7 ขอบเขตงานวิจัย

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก เนื้อหาของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 4 บท แก่โครงของแต่ละบทกล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า รวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ที่เกิดขึ้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

บทที่ 3 เป็นการทดลองและผลการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและศึกษาสภาพการจำแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O เมื่อรูปร่างของแบบจำลองได้เปลี่ยนแปลงไป ในรูปแบบต่างๆ

บทที่ 4 เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 2.1 บทนำ

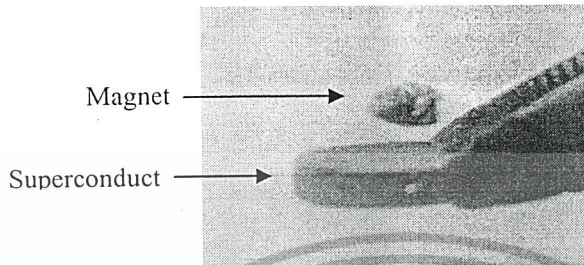
ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductor : LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor : HTSC) กันอย่างต่อเนื่อง ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง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

### 2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

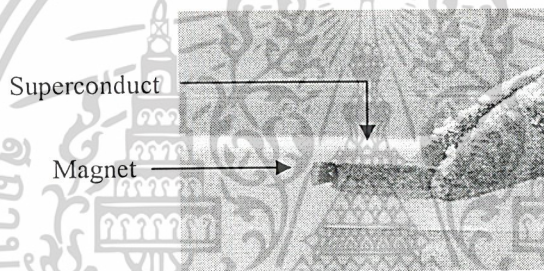
เป็นการวัดคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีดังนี้

#### 2.2.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)

เป็นวิธีการทดสอบเม็ดสารว่าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว(77 เคลวิน) ถ้าเม็ดสารมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ขึ้น โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสารจากการทดสอบพบว่า



ก) การผลักแม่เหล็ก



ข) การดูดแม่เหล็ก

รูปที่ 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

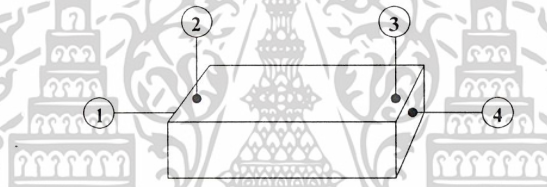
เมื่อดำเนินการผลักแม่เหล็กให้ลอยขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้าน เพื่อมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เรียกว่า กระแสคงสภาพ (Persistent Current) ดังรูปที่ 2.1 ก) และที่น่าสนใจก็คือบริเวณขอบของเมื่อดำเนินการบางส่วนมีการดูดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.1 ข) การที่บางส่วนของเมื่อดำเนินการมีการดูดแม่เหล็ก น่าจะมีสาเหตุมาจากสารแกลดโดลิเนียมที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

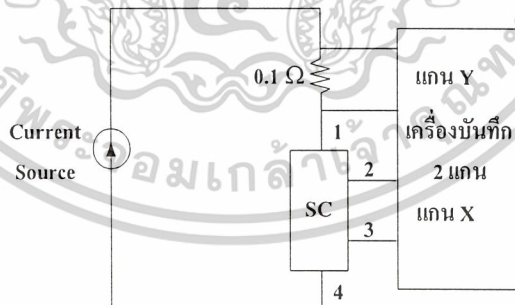
### 2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน  $0.1 \Omega$  ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $0.1 \Omega$  จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูป 2.2



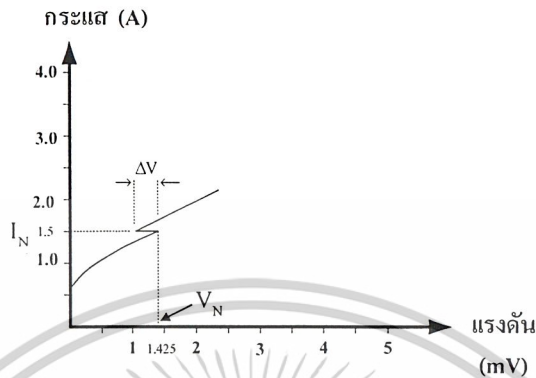
รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

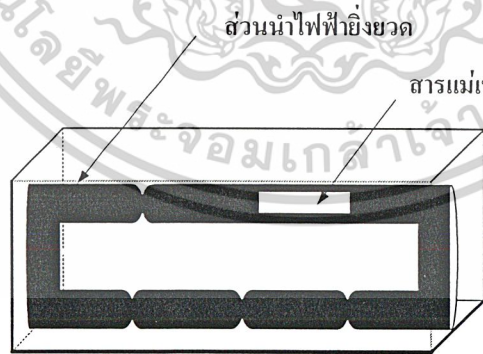
ในรูปที่ 2.4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นซึ่งมีความแตกต่างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ ความต้านทานเชิงลบที่วัดได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกระแส ( $I_N$ ) เท่ากับ 1.5 A และที่แรงดัน ( $V_N$ ) เท่ากับ 1.425 mV ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ( $\Delta V$ ) เท่ากับ 0.25 mV และจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ S

### 2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค [5]

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้น มีลักษณะเนื้อสารเป็นเซรามิก และจากการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ทำให้เราได้ทราบว่า มีส่วนที่ปั่นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในเนื้อสาร ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแกลโคไลเนียม จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O พิจารณาได้ว่า ในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นนั้น ประกอบด้วยส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การที่เม็ดสารสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น หมายความว่า จะต้องมึเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง แต่ลักษณะการเชื่อมต่อจะไม่สม่ำเสมอ คือมีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและการเชื่อมต่ออย่างหลวม หรือที่เรียกว่า จุดคอด ซึ่งเกิดจากการอัดผงสารเข้าด้วยกัน จึงทำให้สารเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ยังมีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ภายในอีกด้วย ดังรูปที่ 2.5

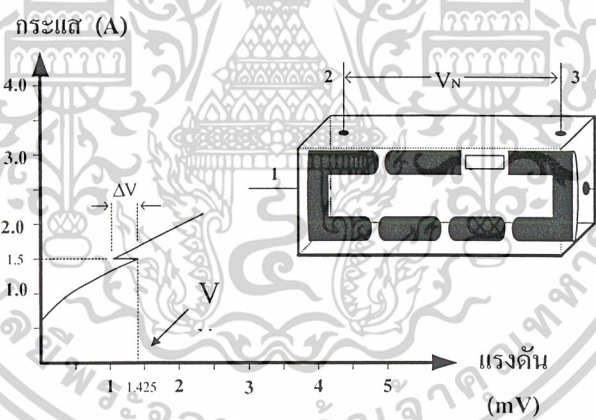
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ จะถูกแทนด้วยท่อนำกระแสไฟฟ้า ยิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งในส่วนของท่อด้านล่าง จะมีบริเวณจุดคอด 3 จุด ส่วนท่อบนมีบริเวณจุดคอด 1 จุด และมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปนอยู่ภายในท่อทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.6 ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า การที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเสียดสภาพได้นั้น เกิดจากส่วนที่เป็นท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขาดออก และบริเวณที่ขาดง่ายที่สุดคือ บริเวณส่วนของจุดคอด ในส่วนของท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นปริมาณมากพอ ในส่วนนี้ก็จะมีขาดออกและขาดเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากสารแม่เหล็กที่อยู่ภายในท่อมีขนาดใหญ่



2.3.1 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

จากกราฟในรูปที่ 2.7 พบว่ากระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.45 A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขณะที่กระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ปริมาณน้อยกว่า 0.45 A บริเวณจุดคอดทั้งหมดยังเชื่อมต่อกันอยู่ จึงไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร แต่เมื่อกระแสไหลผ่านเกินกว่า 0.45 A จะทำให้จุดคอดขาดออกจากกันทั้งหมด สาเหตุที่ทำให้จุดคอดขาดออกจากกัน เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความต้านทานขึ้นบริเวณจุดขาดและมีแรงดันตกคร่อมขึ้นสารขึ้นแต่เนื่องจากส่วนของจุดคอดด้านบนขาดเป็นปริมาณน้อยกว่าส่วนขาดของจุดคอดด้านล่างมาก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดในขณะนี้ไหลผ่านท่อด้านล่าง ในสภาวะนี้เราจะพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารเฉพาะที่เกิดจากท่อด้านล่างเป็นหลักและเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ มีผลทำให้จุดขาดทั้งด้านบนและล่างขยายตัวมากขึ้นแรงดันจึงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อเราป้อนกระแสถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่มีสารแม่เหล็กขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้าง



รูปที่ 2.7 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เมื่อเทียบกับจุดคอด ทำให้ความต้านทานที่ท่อด้านล่างมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามายังขึ้นสารจึงเปลี่ยนทิศทางมาไหลที่ท่อตัวนำด้านล่างซึ่งมีความต้านทานต่ำกว่า ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารลดลงอย่างรวดเร็วถึงค่าหนึ่งจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ” แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันของความต้านทานเชิงลบที่ได้นั้นมีขนาดเล็ก เนื่องจากความ

แตกต่างของแรงดันระหว่างท่อบนและล่างมีไม่มาก เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอีก แรงดันที่ตกคร่อมขั้วสารก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากจุดขาดขยายตัวนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การทดลองและผลการทดลอง

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

##### 3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ แกลโดลิเนียม แบเรียม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ แกลโดลิเนียม ออกไซด์ ( $Gd_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.9% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม Gd : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งอัตราส่วนนี้ได้มีการวิจัยมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดี ซึ่งปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้งสาม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



จากสมการที่ 3.1 พบว่าอัตราส่วนโดยอะตอมของสารประกอบจะได้ 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

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

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

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

การคำนวณจากสมการเคมี

1)  $Gd_2O_3$  1 โมล ต้องเตรียมสาร = 362.49 กรัม

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

2)  $BaCO_3$  1 โมล ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม

ถ้า 2 โมล ต้องเตรียมสาร = 394.696 กรัม

3)  $CuO$  1 โมล ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม

ถ้า 3 โมล ต้องเตรียมสาร = 238.635 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} = 814.576$  กรัม

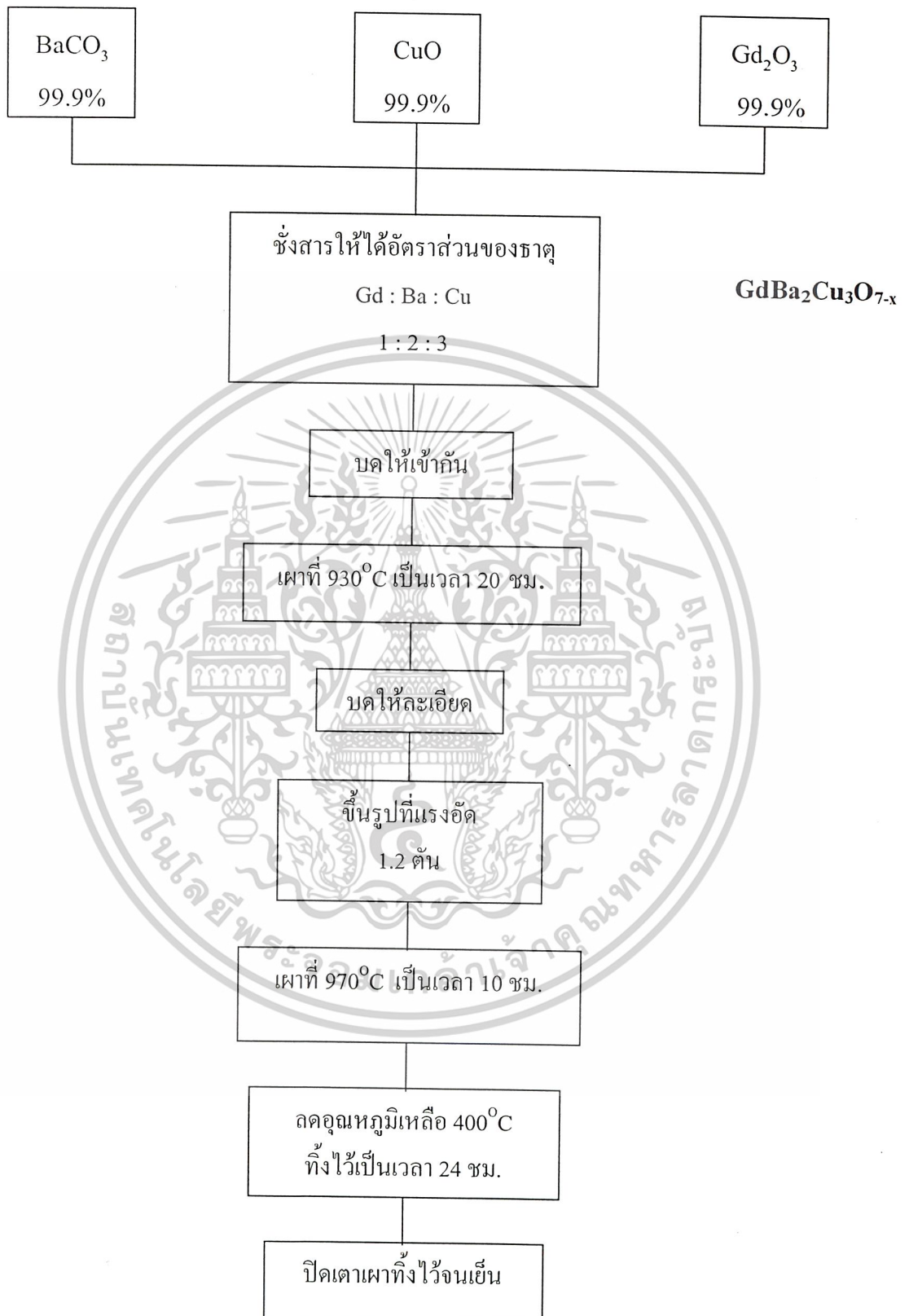
จากสารตั้งต้นทั้งหมด 814.576 กรัม ถ้าต้องการ  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้แคลโคลิเนียมออกไซด์ 2.225 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 4.845 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 2.929 กรัม

### 3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

ในขั้นตอนกระบวนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการเผามาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

1. ชั่งสารประกอบ  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  และ  $\text{CuO}$  โดยใช้อัตราส่วน  $\text{Gd} : \text{Ba} : \text{Cu}$  เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้บดใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ  $930^\circ\text{C}$  ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1.2 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ  $970^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ  $400^\circ\text{C}$  อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



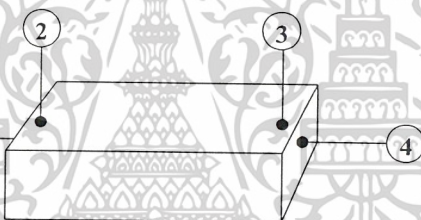
รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซอร์รามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

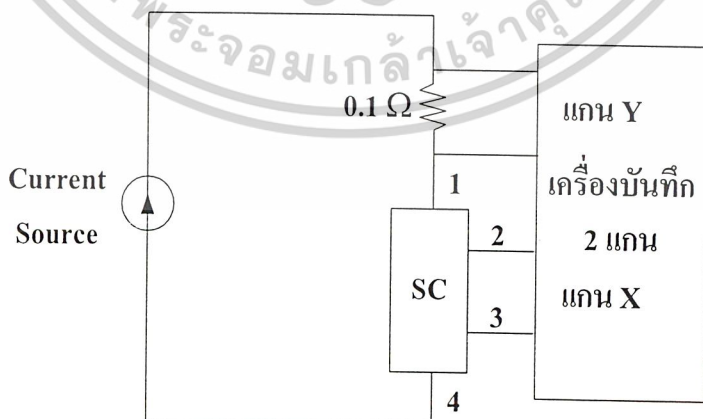
### 3.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยาว โดยใช้วงจรดังรูป 3.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน  $0.1 \Omega$  ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยาว จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสารโดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $0.1 \Omega$  จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

ถ้ารับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยาวก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.2 จากการทดลองจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่ผ่านการตัดแต่ง แสดงดังรูป 3.4

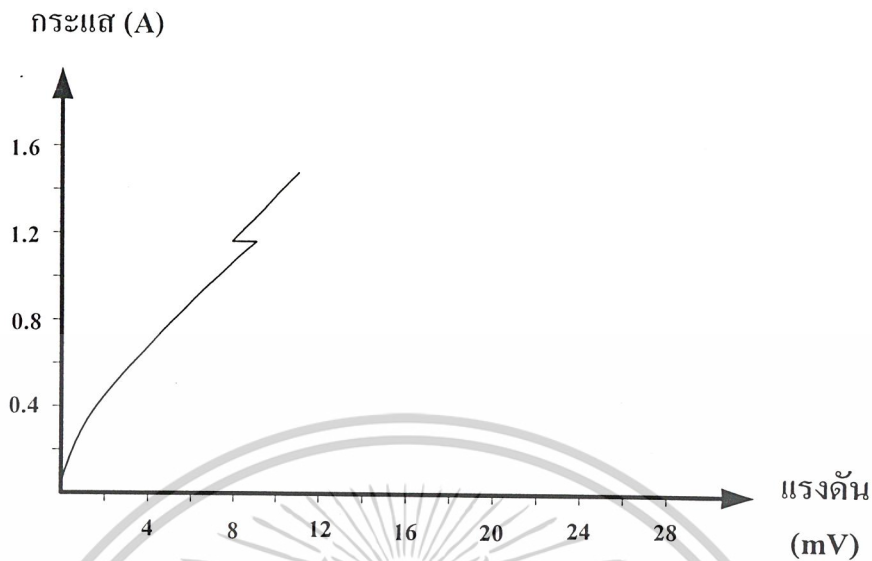


รูปที่ 3.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยาวที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



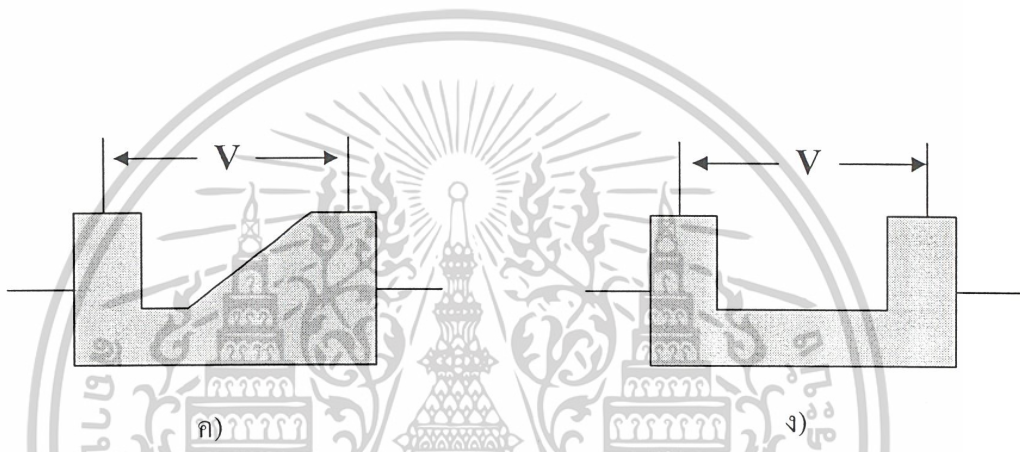
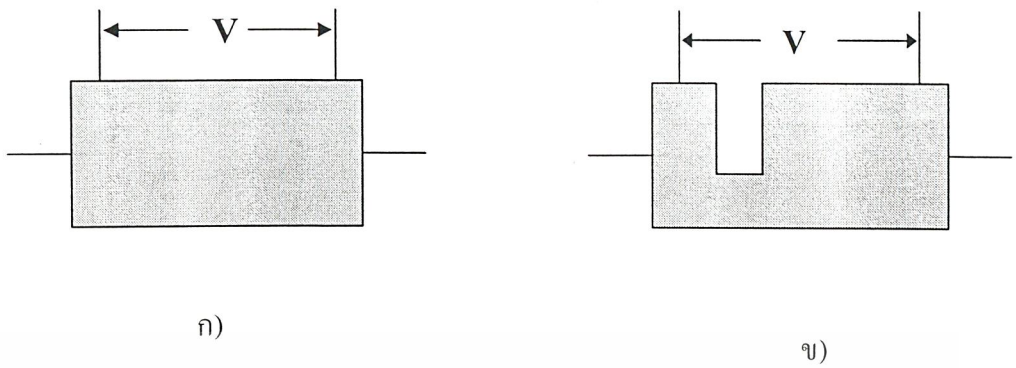
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่ผ่านการตัดแต่ง

### 3.2 รูปทรงของชิ้นสารที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd- Ba-Cu-O

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงรูปทรงของชิ้นสารที่มีผลต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

#### 3.2.1 การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในการเตรียมชิ้นสารเราจะนำชิ้นสารที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส ที่ได้จากกระบวนการสร้างในรูปที่ 3.1 มาทำการตัดแต่งรูปทรงดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากชิ้นสารที่เผาด้วยอุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส จะมีขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบมากกว่าอุณหภูมิการเผาอื่น จากนั้นนำเม็ดสารที่ได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วงจรในรูปที่ 3.3 บันทึกผลการทดลอง

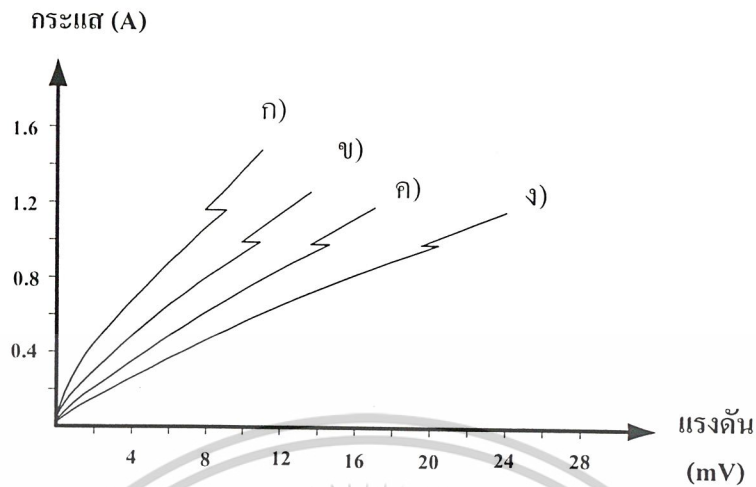


รูปที่ 3.5 รูปทรงของฉนวนนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 3.3 ผลรูปทรงของฉนวนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd- Ba-Cu-O

#### 3.3.1 ผลการวัดความล้มพันระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.6 เป็นผลการวัดความล้มพันระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของฉนวนที่ถูกตะไบเป็นรูปทรงต่างๆ แสดงให้เห็นว่าฉนวนที่ยังไม่ผ่านการตะไบ จะมีกระแสวิกฤตที่สูงกว่าฉนวนที่ผ่านการตะไบและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจะมีค่ามากกว่าฉนวนที่ผ่านการตะไบ ซึ่งพิจารณาค่าต่างๆที่วัดได้ จากตาราง 3.1



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่ตะไบเป็นรูปทรง ก)-ง)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารที่ผ่านการตะไบเป็นรูปทรงต่างๆ

รูปทรงของชิ้นสาร	กระแสวิกฤต (A)	ตำแหน่งการเกิดความต้านทานเชิงลบ (A)	ขนาดความต้านทานเชิงลบ (mV)
ก)	0.1	1.16	1.05
ข)	0.08	1.08	0.95
ค)	0.07	1.07	0.93
ง)	0.06	1.06	0.89

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าชิ้นสารที่ผ่านการตะไบเป็นรูปทรง ข) กระแสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ จะน้อยกว่ารูปทรงก)ซึ่งไม่ได้ผ่านการตะไบเนื่องจากในการตะไบชิ้นสารจะทำให้ส่วนของท่อนำไฟฟ้าที่ยึดขาดออกไปบางส่วนจะทำให้การทำลายการนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำได้ง่ายขึ้นกระแสวิกฤตจึงลดลง และในการตะไบจะส่งผลทำให้ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กขาดหายไปบางส่วนขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจึงเปลี่ยนแปลงน้อยลง และเมื่อพิจารณาชิ้นสารที่ผ่านการตะไบในรูป ค)และง) ซึ่งมีพื้นที่ส่วนที่ตะไบออกไปมากขึ้น จะทำให้ส่วนของท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีส่วนที่ขาดไปมากขึ้น

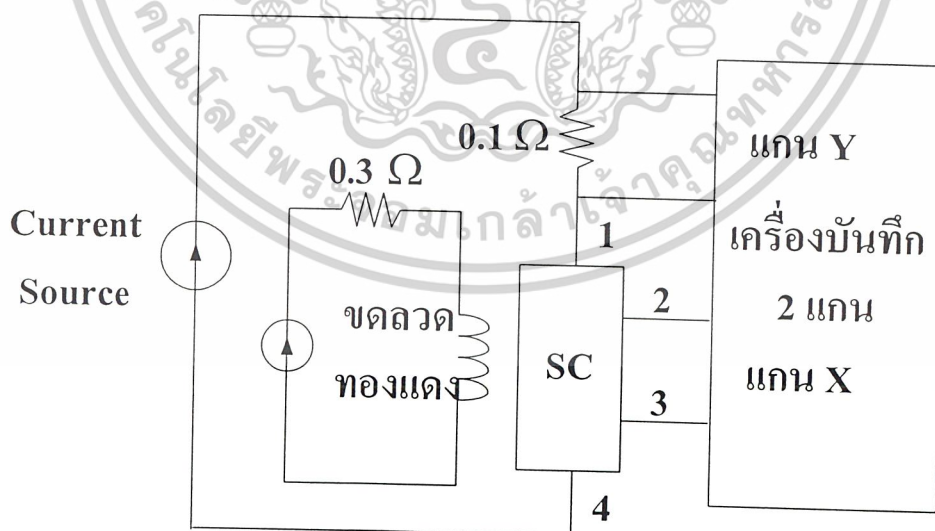
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กขาดหายไปมากขึ้น กระแสวิกฤตจึงลดต่ำลงและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบก็น้อยลงไปด้วย

### 3.4 รูปทรงของชั้นสารที่มีผลต่อการจำสภาพแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd-Ba-Cu-O

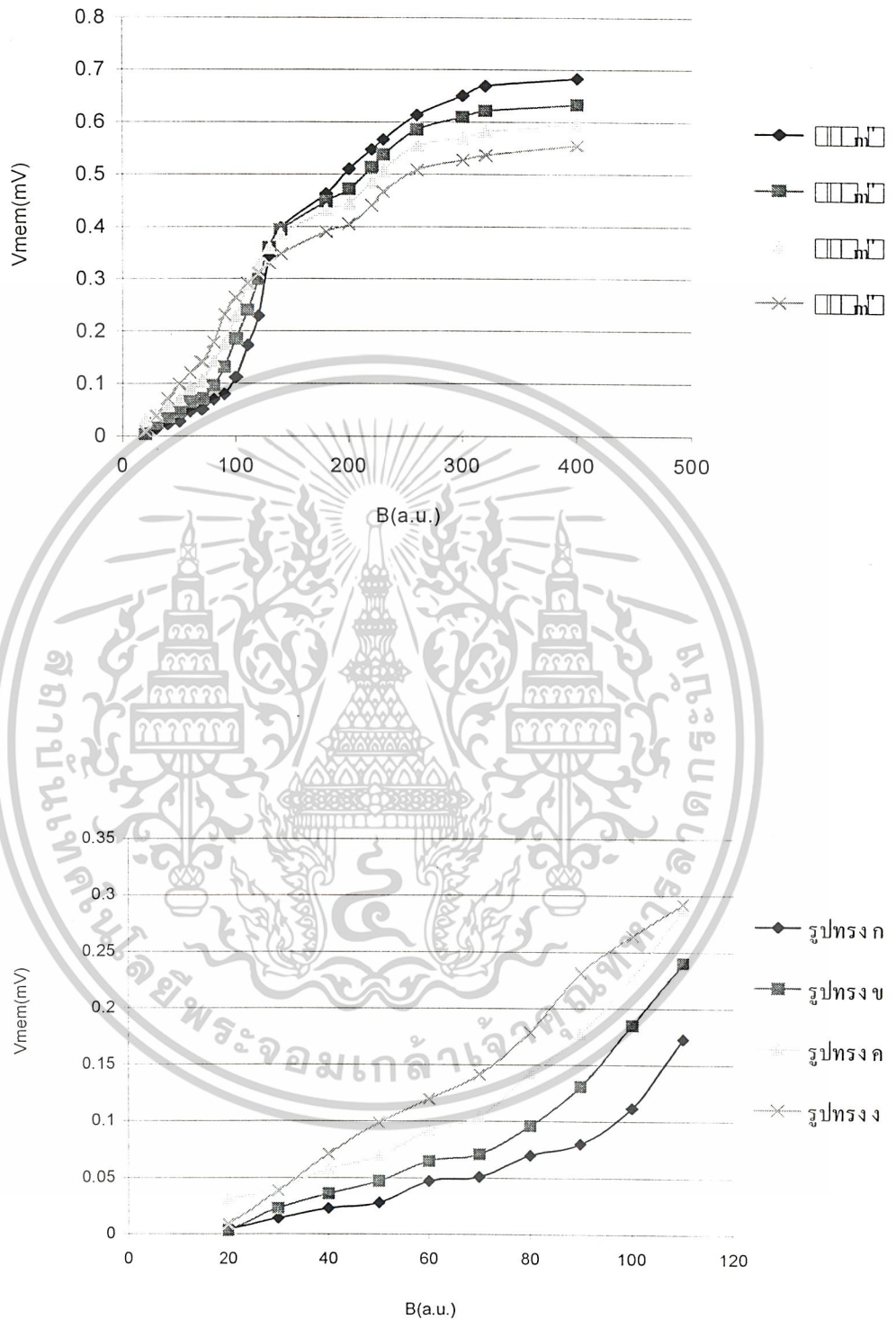
สภาวะการจำแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อเราให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงๆแก่ชั้นสาร เมื่อเกิดการจำแม่เหล็กขึ้นจะทำให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างอยู่ในชั้นสารซึ่งเราสามารถวัดค่าได้ในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร การทดลองจะใช้วงจรในรูปที่ 3.7 ในการทดลองชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะอยู่ในในโตรเจนเหลวอุณหภูมิ 77 เคลวิน มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทำการป้อนสนามแม่เหล็กในขณะที่ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าให้กับชั้นสาร โดยเริ่มจากค่าสนามแม่เหล็ก  $B = 10$  a.u. จากนั้นลดค่าสนามแม่เหล็กลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสารเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับกระแสวิกฤต จากนั้นลดกระแสลงเป็นศูนย์
2. ทำการป้อนสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นทีละ  $10$  a.u. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1 ไปเรื่อยๆจนกระทั่งแรงดันที่วัดได้ที่กระแสวิกฤตหลังจากลดสนามแม่เหล็กลงเริ่มคงที่



รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสารกับสนามแม่เหล็ก

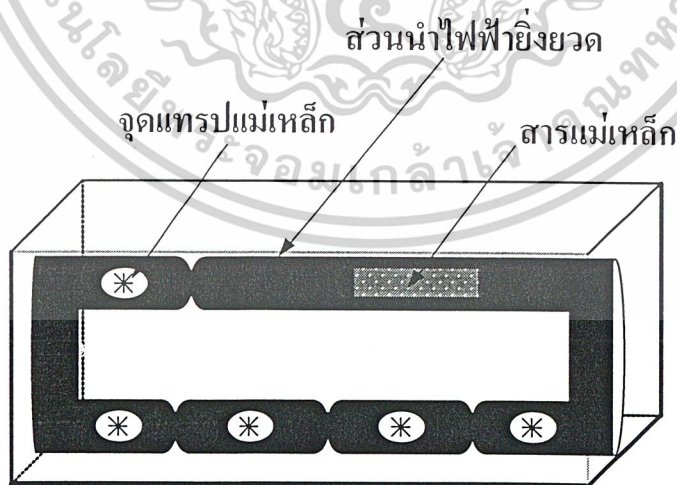
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ผลของรูปทรงที่มีผลต่อการจำสภาพแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd-Ba-Cu-O

ผลการทดลองในรูปที่ 3.8 แสดงการจำสภาพแม่เหล็กในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร (V<sub>mem</sub>) ซึ่งพบว่าชั้นสารรูปทรง ก) ซึ่งเป็นชั้นสารที่ยังไม่ผ่านการตะไบจะเริ่มมีการจำสภาพแม่เหล็กที่ค่าสนามแม่เหล็ก  $B = 30$  a.u. และเมื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้น ชั้นสารจะมีการจำแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งดูได้จากแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสารและเมื่อให้สนามแม่เหล็กประมาณ 320 a.u. แรงดันตกคร่อมชั้นสารจะเริ่มคงที่ที่  $0.69$  mV ส่วนชั้นสารรูปทรง ข) ซึ่งผ่านการตะไบเป็นร่องจะเริ่มจำสภาพแม่เหล็กที่ค่าสนามแม่เหล็ก  $B = 30$  และแรงดันจะเริ่มคงที่ที่  $0.63$  mV ชั้นสารรูปทรง ค) การจำแม่เหล็กจะเริ่มตั้งที่ค่าสนามแม่เหล็ก  $B = 20$  a.u. และแรงดันจะเริ่มคงที่ที่  $0.59$  mV และชั้นสารรูปทรง ง) การจำแม่เหล็กจะเริ่มตั้งที่ค่าสนามแม่เหล็ก  $B = 20$  a.u. และแรงดันจะเริ่มคงที่ที่  $0.55$  mV

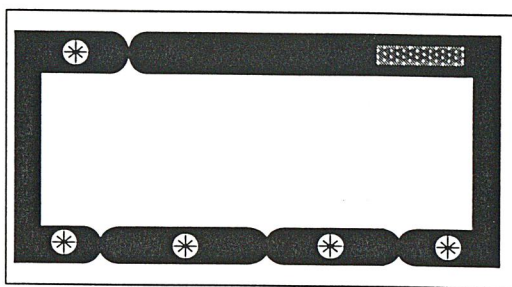
### 3.4.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ใช้อธิบายสภาวะการจำสภาพแม่เหล็ก

เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกค่ามากพอ ที่สามารถทะลุผ่านส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปถึงจุดแทรก (จุด  $*$ ) ได้ จะเกิดการแทรกแม่เหล็กขึ้น และทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำหรือ persistent current ซึ่งกระแสดังกล่าวจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กคงที่ค่าหนึ่ง ( $B_{\text{trap}}$ ) เรียกสภาวะนี้ว่าการจำสภาพแม่เหล็ก ส่งผลให้ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเสียสภาพได้ง่ายขึ้น

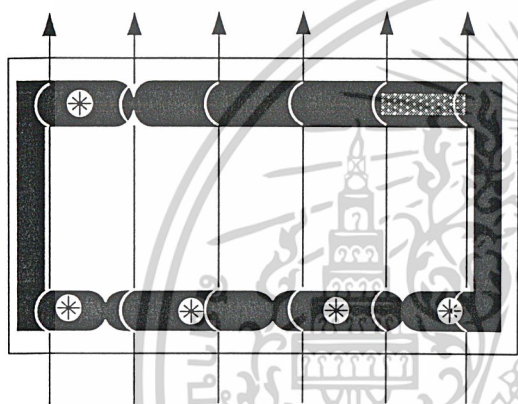


รูปที่ 3.9 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

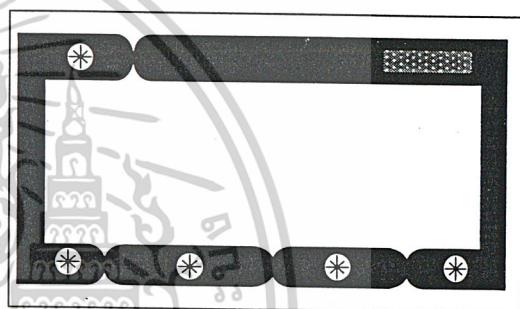
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



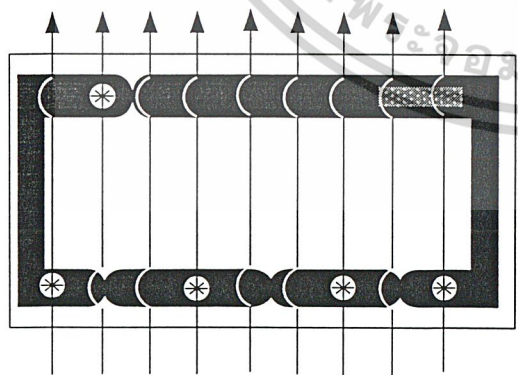
รูปทรง ก)



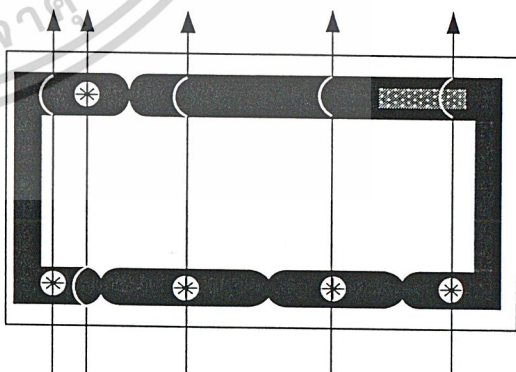
รูปทรง ก.1)



รูปทรง ก.2)



รูปทรง ก.3)



รูปทรง ก.4)

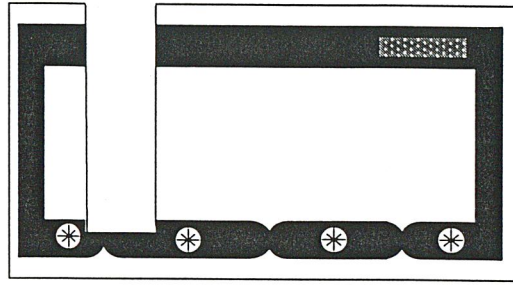
**รูปที่ 3.10 รูปทรงของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยังไม่ผ่านการตัดแต่ง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

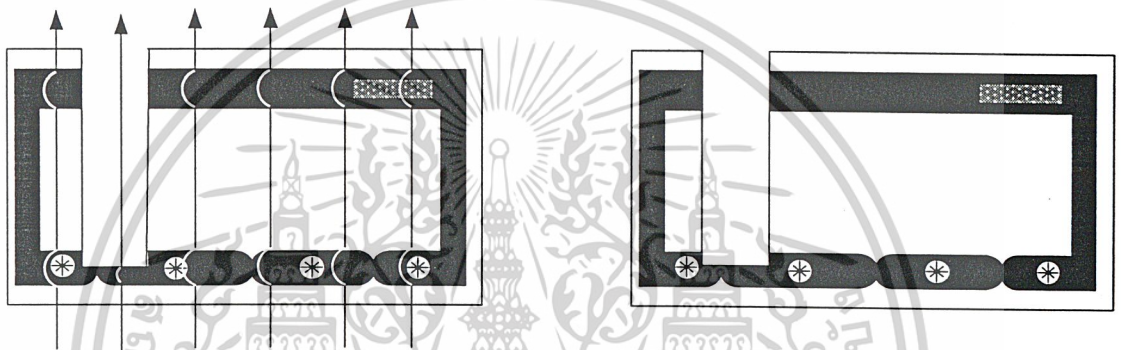
จากรูป ก.1) เป็นการป้อนสนามแม่เหล็กที่มีค่าน้อยให้แก่ตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดย โดยไม่ได้ป้อนกระแสให้แก่ขั้วสาร สังเกตได้ว่าสนามแม่เหล็กไม่สามารถทะลุผ่านส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยได้ (ทอส์ค่า) และเมื่อนำสนามแม่เหล็กออกดังรูป ก.2) ขั้วสารยังคงสภาพเช่นเดิม (ยังไม่เกิดการจำสนามแม่เหล็ก) แต่เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากให้แก่ขั้วสาร ดังรูป ก.3) จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กบางส่วนสามารถทะลุผ่านส่วนนำไฟฟ้าที่ยังยวดยไปได้ตรงจุดแทรก ซึ่งในรูป ก.4) จะแสดงให้เห็นว่าขั้วสารมีการจำแม่เหล็กเกิดขึ้น โดยจะดูจากมีแรงดันตกคร่อมขั้วสาร ( $V_{mem}$ ) อยู่ขณะที่นำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การจำสภาพแม่เหล็ก

ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดจากการ ที่มีสนามแม่เหล็กทะลุผ่านจุดแทรกของขั้วสาร จากนั้นตรงบริเวณจุดแทรกจะเกิดกระแสเหนี่ยวนำ (persistent current) รอบจุดแทรก และเมื่อนำสนามแม่เหล็กออกกระแสนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กคงที่ขึ้นมาค่าหนึ่งคือ  $B_{trap}$  ซึ่งทำให้มีแรงดันตกคร่อมขั้วสารเกิดขึ้นและค่าของแรงดันนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้ขั้วสารเพราะจะมีผลต่อกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น

นอกจากค่าของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อค่าแรงดันตกคร่อม ( $V_{mem}$ ) แล้ว จำนวนของจุดแทรกที่มีอยู่บนทอส์ตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยก็มีผลด้วยเช่นกัน คือ ถ้ามีจำนวนจุดแทรกมากก็จะมีปริมาณกระแสเหนี่ยวนำมากด้วยแล้วจะทำให้มีแรงดัน ( $V_{mem}$ ) มากด้วย ซึ่งจะแสดงด้วยการทดลองใช้ขั้วสารที่ถูกตัดแต่งเป็นรูปทรงต่างๆ

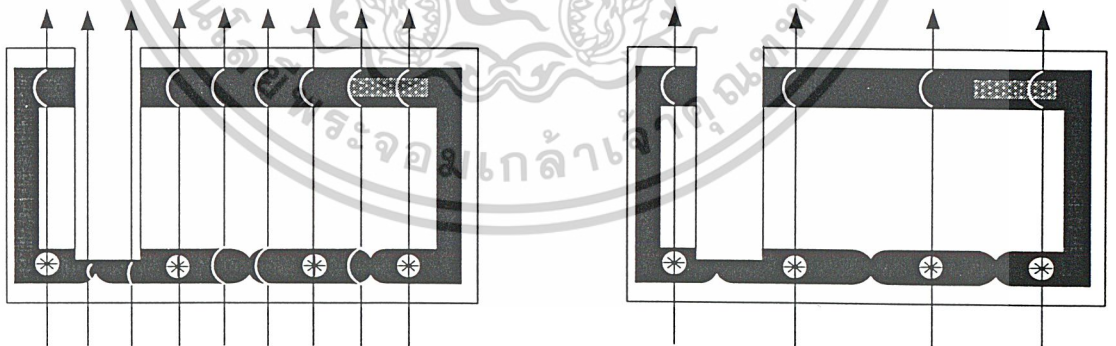


รูปทรง ข)



รูปทรง ข.1)

รูปทรง ข.2)

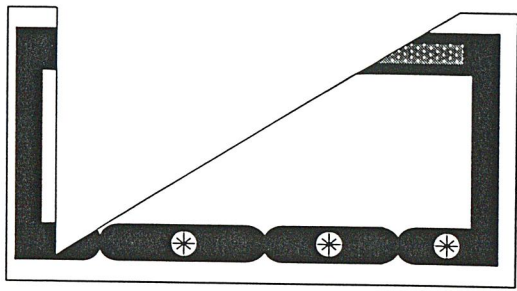


รูปทรง ข.3)

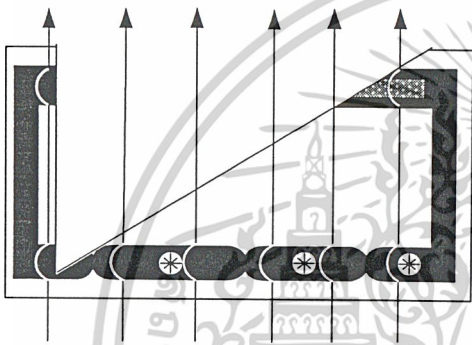
รูปทรง ข.4)

### รูปที่ 3.11 รูปทรงของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่ผ่านการตัดแต่งเป็นร่อง

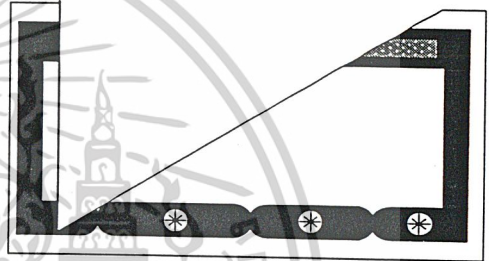
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



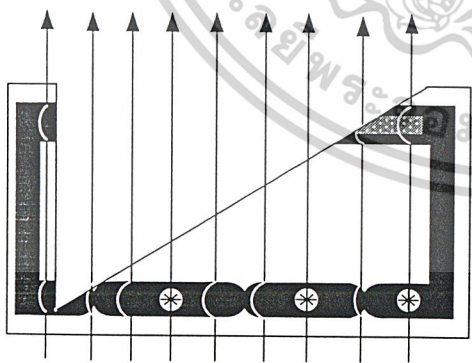
รูปทรง ค)



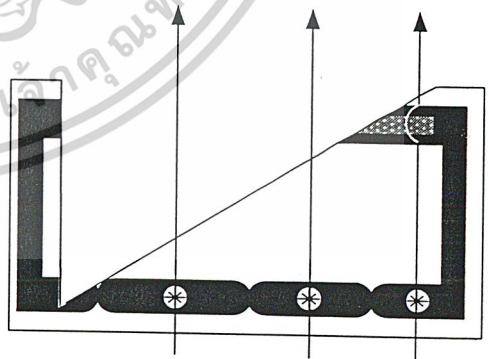
รูปทรง ค.1)



รูปทรง ค.2)



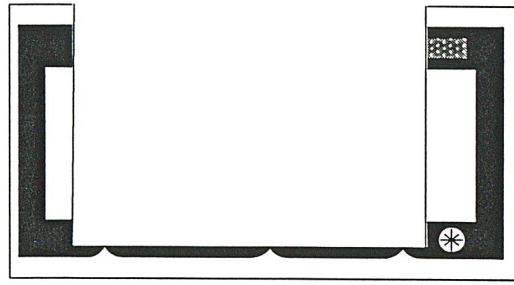
รูปทรง ค.3)



รูปทรง ค.4)

รูปที่ 3.12 รูปทรงของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวอดที่ผ่านการตัดแต่งเป็นตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

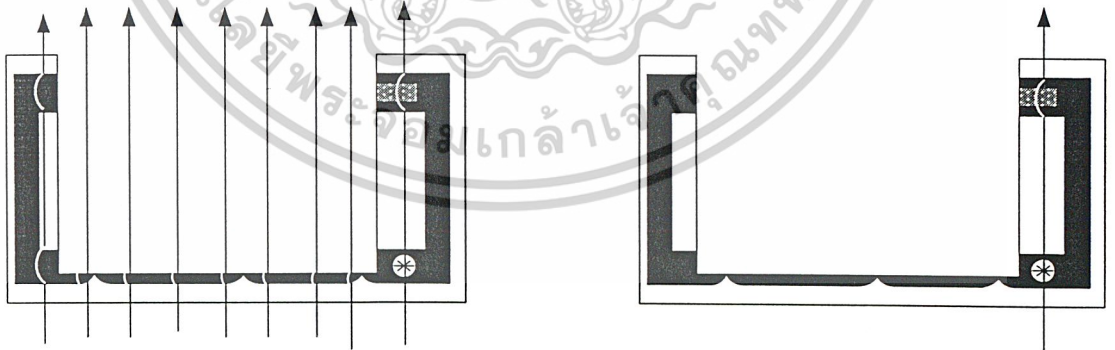


รูปทรง ง)



รูปทรง ง.1)

รูปทรง ง.2)



รูปทรง ง.3)

รูปทรง ง.1)

รูปที่ 3.13 รูปทรงของชั้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่ผ่านการตัดแต่งเป็นตัวยู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองกับชิ้นสารที่ถูกตัดแต่งแล้วทั้งสามรูปทรงพบว่า ในรูปที่ ข.1),ค.1) และ ง.1) เป็นการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ที่มีค่าน้อยให้กับชิ้นสารซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะไม่สามารถทะลุผ่านส่วนนำไฟฟ้าที่ยาวด (ท่อสีดำ) ไปได้ พอนำเอาสนามแม่เหล็กออกชิ้นสารแต่ละแบบจะกลับสภาพเดิม (ยังไม่เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก) ดังในรูปที่ ข.2), ค.2) และ ง.2) แต่เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากให้กับชิ้นสารแล้วดังรูปที่ ข.3),ค.3) และ ง.3) จะพบว่า มีสนามแม่เหล็กบางส่วนสามารถทะลุผ่านส่วนนำไฟฟ้าที่ยาวดไปได้ตรงบริเวณจุดแทรกแต่ละจุด และตรงจุดแทรกนั้นจะมีกระแสเหนี่ยวนำ (persistent current) เกิดขึ้นเมื่อนำสนามแม่เหล็กออกดังรูปที่ ข.4),ค.4) และ ง.4) แล้วกระแสเหนี่ยวนำนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กคงที่ขึ้นมาค่าหนึ่ง ทำให้มีแรงดัน ( $V_{\text{mem}}$ ) ตกคร่อมชิ้นสารเกิดขึ้น ซึ่งจะเรียกชิ้นสารว่า มีการจำสภาพแม่เหล็กเกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### สรุปและวิจารณ์

ในงานวิจัยชิ้นนี้ เบื้องต้นได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก และการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า รวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นได้อย่างสอดคล้อง

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งสร้างโดยกระบวนการของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นนั่นคือ ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบซึ่งตามปกติแล้วจะไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้มีผลต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ โดยอาศัยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในแบบจำลองนั้นจะประกอบไปด้วย ส่วนนำไฟฟ้า ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวด และส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากการนำสารไปทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ พบว่าบางส่วนของเม็ดสารมีการดูดเม็ดสารแม่เหล็ก เนื่องจากสารแกดโกลิเนียม (Gd) เป็นสารในตระกูลเฟอร์โรแมกเนติก และส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กนี้เองที่มีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ



รูปที่ 4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ใช้แรงอัดในการขึ้นรูป 1.2 ตัน ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบนั้นจะมีปริมาณมากที่สุด และปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่ามากที่สุดด้วย แต่เมื่อทำการปรับแต่งรูปทรงของชิ้นสารจะทำให้ขนาดความต้านทานเชิงลบและกระแสวิกฤตมีปริมาณที่ลดลง อันเนื่องมาจากส่วนของท่อนำไฟฟ้าที่ยังยวดขาดออกไปบางส่วน จะทำให้การทำลายการนำไฟฟ้าที่ยังยวดทำได้ง่ายขึ้นกระแสวิกฤตจึงลดลง และในการปรับแต่งรูปทรงของชิ้นสารจะส่งผลทำให้ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กขาดหายไปบางส่วนขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจึงเปลี่ยนแปลงน้อยลง

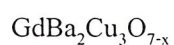
และจากผลการทดลองยังพบอีกว่าในส่วนนำไฟฟ้าที่ยังยวดจะมีจุดแทรกแม่เหล็ก (จุด \*) กระจายอยู่ เมื่อเราทำการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่มีค่ามากให้แก่ตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด ชิ้นสารนั้นจะมีการจำสภาพแม่เหล็ก ในการปรับแต่งรูปทรงของชิ้นสาร ยังส่งผลต่อการจำสภาพแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด ซึ่งในการตะไบตัดแต่งชิ้นสารให้เป็นรูปทรงต่าง ๆ นั้นจะทำให้ส่วนที่เป็นจุดแทรกแม่เหล็ก (จุด \*) ที่กระจายอยู่ในส่วนนำไฟฟ้าที่ยังยวดมีจำนวนลดน้อยลง เมื่อเราทำการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกให้แก่ตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด จำนวนจุดแทรกแม่เหล็ก (จุด \*) ที่ลดลงนั้น จะส่งผลต่อการจำสภาพแม่เหล็กที่แสดงอยู่ในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสาร ( $V_{mem}$ ) นั้นจะมีค่าลดลง

## เอกสารอ้างอิง

1. Daniel Hunt V.1989.Superconductiveity Sourcebook New York : John Wiley&Son.
2. ดำรงค์ศักดิ์ มณีพงษ์สวัสดิ์ 2533 พิธีกรรมของแข็ง 2 พิมพ์ครั้งที่ 2 : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
3. Jha A.R. 1998 Superconductor Technology.New York : John Wiley&Son.
4. คุณชัยวัฒน์ จอมแสง. ” การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ  $Yb_{a_2}Cu_3O_{7-x}$  ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2535
5. Matsuda M., Kikuchi A., Maeda T., Ishii M., Iwai Y., Takata M. and Yamashith T.1988 “ Observation of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  ceramic microstructure. ” Jpn.J.Appl.Phys.27.L529-530
6. Matsuda M., Kikuchi A., Ishii M., Takata M., Yamashith T. and Okamoto S.1988 “ Processing and Superconducting Properties of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  ceramic. ” Jpn.J.Appl.Phys.27.L1439-1441.
7. Kasap S.O. 2000. Principles of Electrical Engineering Materials and Devices. : McGraw-Hill Companies.
8. วิถีภูษั วังศ์สุทธิธรรม นภคต สิริพิลล ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ จิตธิรุ่งเรือง “ แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24.2544.หน้า 992-997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้