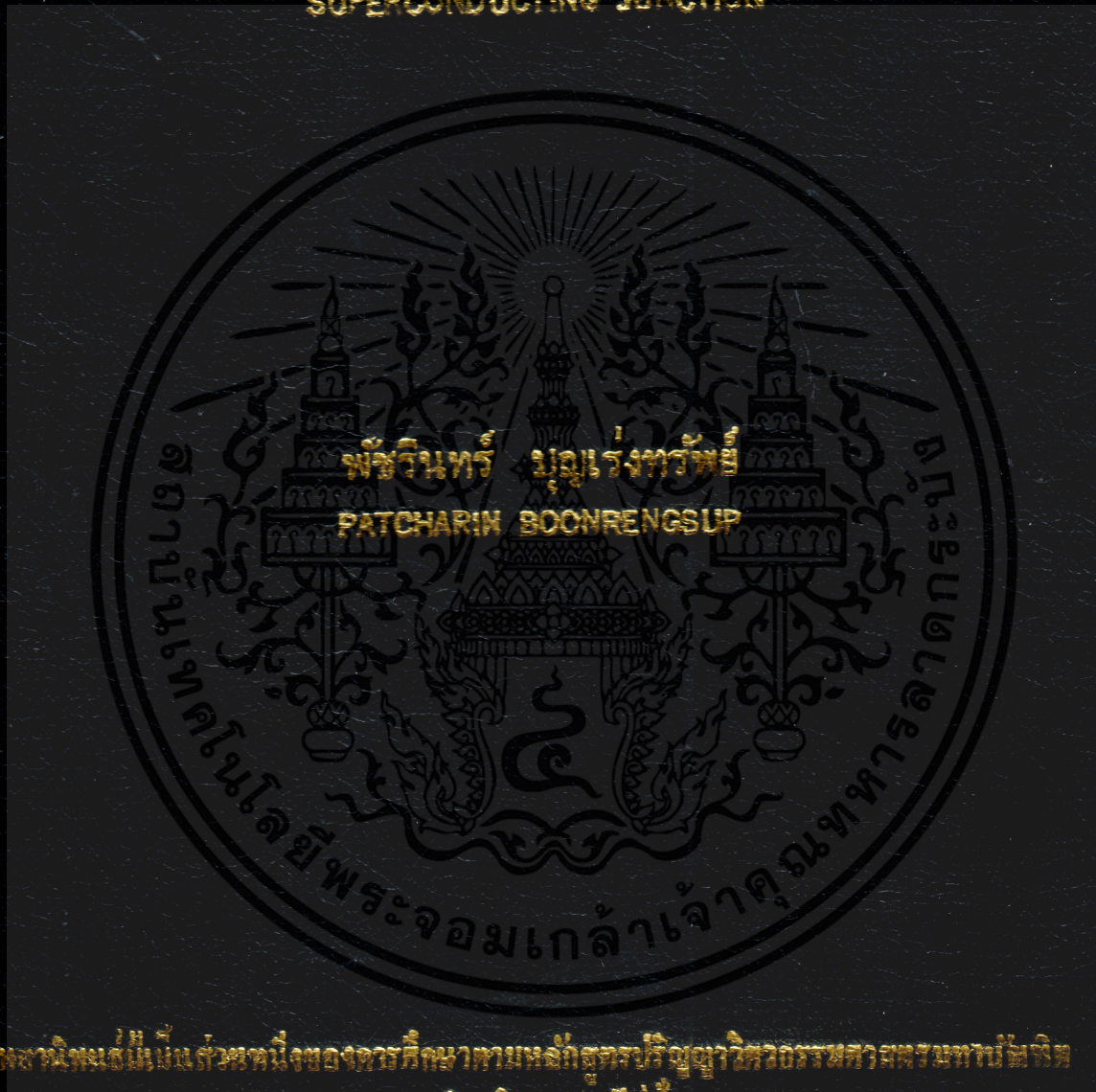


การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF YBCO/GBCO  
SUPERCONDUCTING JUNCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974.648.062.6

การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF YBCO/GBCO  
SUPERCONDUCTING JUNCTION



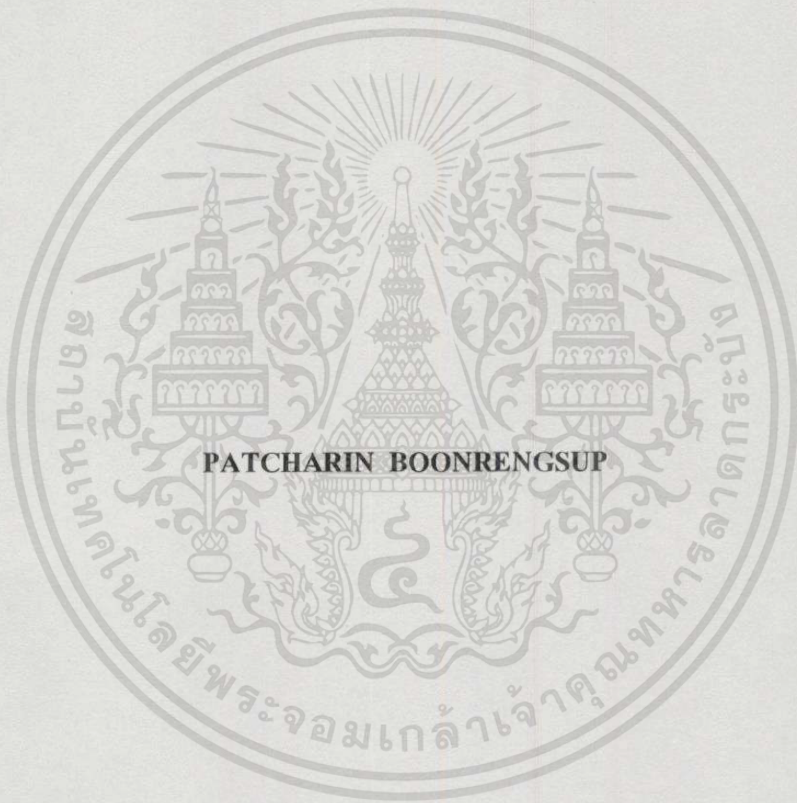
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-062-6

39330

**A STUDY ON CHARACTERISTICS OF YBCO/GBCO  
SUPERCONDUCTING JUNCTION**



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

**2001**

**ISBN 974-648-062-6**



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO  
A STUDY ON CHARACTERISTICS OF YBCO/GBCO  
SUPERCONDUCTING JUNCTION

ชื่อนักศึกษา นางสาวพัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์

รหัสประจำตัว 40061057

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ	
ผศ. ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ	
อาจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	
รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 6 ธันวาคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



วันที่.....6.....เดือน.....ธันวาคม.....พ.ศ.....2544.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ

YBCO/GBCO

นักศึกษา

นส. พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์

รหัสประจำตัว

40061057

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2544

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ เช่น ไคโอด และทรานซิสเตอร์มีบทบาทอย่างกว้างขวางในการใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แต่อุปกรณ์เหล่านี้มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากการสูญเสียพลังงานขณะใช้งาน ดังนั้นหากสร้างอุปกรณ์จากสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดพิเศษที่ไม่มีค่าความต้านทานขณะนำกระแส ข้อจำกัดในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะหมดไป วิทยานิพนธ์นี้เสนอกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบใหม่ คือ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  โดยใช้กระบวนการสร้างเช่นเดียวกับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  และใช้อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส แล้วนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองแบบมาสร้างเป็นรอยต่อและเรียกรอยต่อนี้ว่ารอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบนี้มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า คือ การเกิด Step ของกระแสจำนวน 1 และ 2 Step ซึ่งสามารถกำหนดจำนวนการเกิดทั้งสอง Step ได้จากการให้กระแสไหลผ่านรอยต่อ 1 รอยต่อและ 2 รอยต่อตามลำดับ และสามารถทำการขยายความสูงของ Step ได้จากการเพิ่มพื้นที่ของรอยต่อส่วนสนามแม่เหล็กทำให้ตำแหน่งของการเกิด Step เปลี่ยนแปลง โดยแรงดันของ Step มีค่าเพิ่มมากขึ้นและกระแสของ Step ลดต่ำลง

Thesis Title	A Study on Characteristics of YBCO/GBCO Superconducting Junction
Student	Miss Patcharin Boonrengsup
Student ID.	40061057
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

## ABSTRACT

Semiconductor junction devices, for example, diodes and transistors have presently played an important role in many electronic applications. However, the limitation such as energy loss still exists. Superconductor, a new material without resistance, is outstanding solution to solve this disadvantage. This thesis presents the fabrication of the newest high- $T_c$  superconductor  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  same as that of  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  by sintering at the temperature of  $930^\circ C$ . The characteristics of YBCO/GBCO superconducting junction were studied. This junction generated 1 and 2 current steps by applying current to 1 and 2 junctions, respectively. In addition, the larger area of the junction expanded the higher current step. Furthermore, the magnetic field affected the position of current step, i.e., increasing the voltage and decreasing the current of step.

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ในการให้ความรู้ แนวความคิด การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนงานวิจัยนี้มาด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ คุณจรรยา นามเสนาะเป็นอย่างสูงที่ทำให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์มาตลอด ขอขอบคุณ คุณสมศักดิ์ ชงยิ่งศักดิ์ถาวร คุณศัญญา คุณขาว และคุณชบา สุริยาอัมรานนท์ ที่ให้คำแนะนำ ปรีกษา ตลอดจนการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ขอขอบคุณ คุณวิสันต์ ตั้งกิจเจริญ คุณภควัต สรวขสุวรรณ คุณกอบศักดิ์ ศรีประภา คุณภาณุพันธ์ โอพารกิจไพบูลย์ คุณนิรุช ปิ่นเกตุ คุณเดชา ขศศักดิ์ศรี คุณคณรัชต์ วรรณมา คุณสันติ ชาตรุประชีวิน และน้อง ๆ ห้องปฏิบัติการสารตัว นำไฟฟ้ายังยวดทุกท่านที่ทำให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบคุณ คุณถัดดาวัลย์ สุภาดี และคุณทรงเกียรติ จิตรประทีภย์สำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดมา ขอขอบคุณ ทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาระดับ บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้มาด้วยดี และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อแก้ว คุณแม่รัตนม และคุณพี่สมพร บุญเร่่งทรัพย์ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีใน ทางด้านการศึกษามาโดยตลอด

พัชรินทร์ บุญเร่่งทรัพย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
ศัพท์เทคนิค.....	XV
สัญลักษณ์.....	XIX
คำนำ.....	XXI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ประวัติการค้นพบสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	1
1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	3
1.2.1 สภาพการนำไฟฟ้า.....	3
1.2.2 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature).....	6
1.2.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect).....	6
1.3 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	7
1.3.1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กทั่วไป.....	7
1.3.2 ความเป็นแม่เหล็ก.....	8
1.3.3 ชนิดของความเป็นแม่เหล็กของสาร.....	8
1.3.3.1 อำนาจแม่เหล็กพารา.....	8
1.3.3.2 อำนาจแม่เหล็กไดอา.....	9
1.3.3.3 อำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร.....	9
1.3.3.4 อำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและอำนาจแม่เหล็กเฟอร์รี.....	11
1.3.4 คุณสมบัติของสารแม่เหล็กของสารตัวนำทั่วไป.....	11
1.3.5 แม่เหล็กเซรามิก (Ceramic Magnetics).....	12
1.3.6 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	12
1.3.6.1 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field : $H_c$ ).....	12

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

1.3.6.2	ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect).....	13
1.4	ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และ 2.....	15
1.5	การประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	17
1.5.1	การประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ขนาดใหญ่ (Large Scale Application).....	17
1.5.2	การประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ขนาดเล็ก (Small Scale Application).....	18
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการ.....	19
2.1	บทนำ.....	19
2.2	ปรากฏการณ์โจเซฟสัน (Josephson Effect).....	20
2.3	สมการพื้นฐานของปรากฏการณ์โจเซฟสัน.....	22
2.4	ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสตรง (DC Josephson Effect).....	24
2.5	ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับ (AC Josephson Effect).....	25
2.6	คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรงกับความต่างศักย์ (DC Current Voltage Characteristics).....	32
2.7	ขอบเขตของเกรนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง (High T <sub>c</sub> Superconducting Grain Boundaries).....	35
บทที่ 3	การทดลอง.....	38
3.1	อุปกรณ์และวัสดุในการทดลอง.....	38
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.1.2	การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub> .....	38
3.1.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการซินเทออร์ (Sintering).....	39
3.1.3.1	เตาเผา (Furnance).....	39
3.1.3.2	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller).....	39
3.1.4	อุปกรณ์ในการเตรียมสาร.....	40
3.1.5	อุปกรณ์ในการขึ้นรูปสาร.....	40
3.1.6	ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	41
3.1.7	ชุดวัดปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	41

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.8 ชุดวัดอุณหภูมิวิกฤต.....	42
3.1.9 ชุดบันทึกอัตราไอซนิก.....	42
3.2.1 การคำนวณหาหน้าหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลอง.....	43
3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา.....	44
3.2.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	45
3.2.3.1 ปฏิกิริยาการเกิดไมสเนอร์.....	45
3.2.3.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	46
3.2.3.3 การวัดอุณหภูมิวิกฤต.....	48
3.3 การทดลองหาอุณหภูมิในการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ .....	49
3.3.1 การเตรียมสารเคมี.....	49
3.3.2 วิธีการทดลอง.....	50
3.4 การทดลองหาอุณหภูมิในการเผาของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	51
3.4.1 การเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO.....	52
3.4.2 การขึ้นรูปรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	53
3.5 การทดลองทางกายภาพ.....	54
3.6 การทดลองหาลักษณะความเป็นรอยต่อของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	54
3.7 การทดลองหาผลของรูปแบบรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO และผลการวัดค่าแรงดันต่างขั้ว.....	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
4.1 ผลการหาอุณหภูมิในการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ .....	57
4.2 ผลการหาอุณหภูมิการเผารอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	60
4.2.1 ผลการเกิดไมสเนอร์.....	60
4.3 ผลทางกายภาพของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO.....	60
4.3.1 ผงสาร.....	60
4.3.2 เม็ดสาร.....	61

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลของลักษณะความเป็นรอยต่อของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	61
4.4.1 ชินสารแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1.....	61
4.4.1.1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6.....	61
4.4.1.2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3.....	62
4.4.2 ชินสารแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 2.....	63
4.4.2.1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6.....	64
4.4.2.2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3.....	65
4.5 ผลของรูปแบบรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในการวัดแต่ละขั้ว..	69
4.5.1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3.....	69
4.5.2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-4.....	70
4.5.3 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-5.....	72
4.5.4 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6.....	73
4.6 ผลของการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วในแต่ละรูปแบบ.....	75
4.6.1 รูปแบบ 1.....	75
4.6.2 รูปแบบ 2.....	76
4.6.3 รูปแบบ 3.....	77
4.6.4 รูปแบบ 4.....	78
บทที่ 5 แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO....	83
5.1 แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.84	
5.1.1 การทดลองผลของพื้นที่รอยต่อที่มีต่อลักษณะ Step ของชินสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	84
5.1.2 ผลของพื้นที่รอยต่อที่มีต่อลักษณะ Step ของชินสาร YBCO/GBCO.....	85
5.1.3 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะการเกิดของ Step.....	87
5.1.4 ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะการเกิดของ Step.....	88
5.2 สรุปและวิเคราะห์แนวทางการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งาน..	91

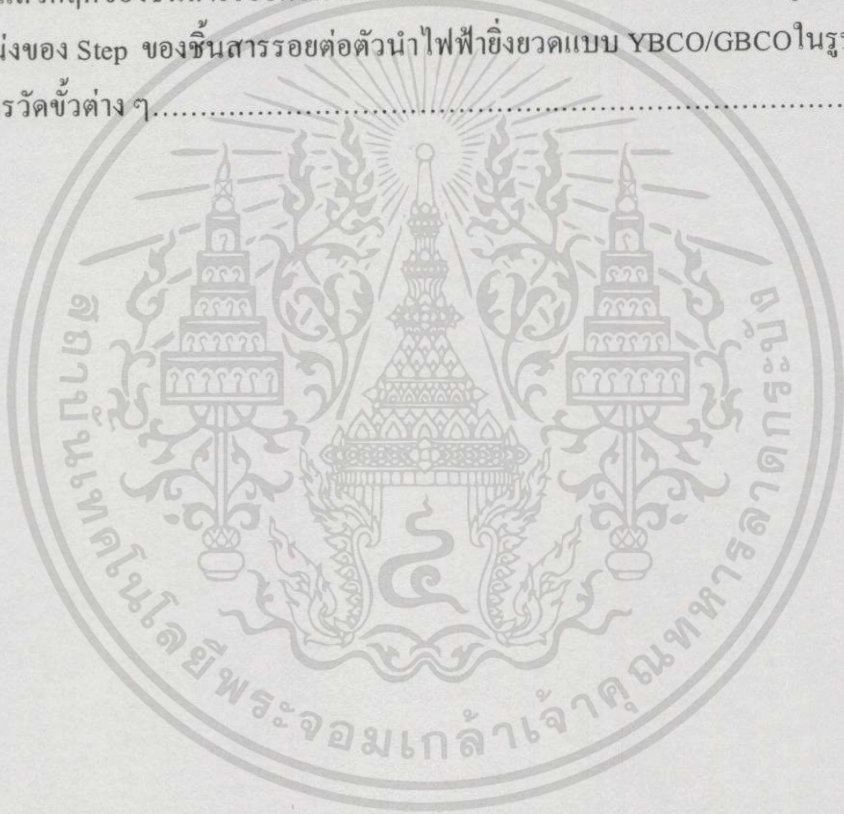
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	100



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สารแม่เหล็กเฟอร์โร.....	10
4.1 ความสูงของปรากฏการณ์ไมส์เนอร์.....	57
4.2 ความสูงของปรากฏการณ์ไมส์เนอร์.....	60
4.3 ค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารในรูปแบบต่าง ๆ .....	66
4.4 ตำแหน่ง Step ของชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบต่างๆ....	67
4.5 ค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCOในรูปแบบต่างๆ...80	
4.6 ตำแหน่งของ Step ของชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCOในรูปแบบ และการวัดซ้ำต่าง ๆ.....	80



# สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลอง ของนาย Heike Kamerlingh Onnes.....	1
1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	3
1.3 การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนำไฟฟ้าปกติ (Normal State).....	4
1.4 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะ.....	4
1.5 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	5
1.6 การเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconducting State).....	5
1.7 (a) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก.....	7
1.7 (b) อิเล็กตรอนสปินเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็ก ได้อีกทางหนึ่ง.....	7
1.8 ลักษณะอิเล็กตรอนสปินของอิเล็กตรอนหลายตัว.....	8
1.9 อำนาจแม่เหล็กพารา.....	9
1.10 ลักษณะโดเมนในสารแม่เหล็กเฟอร์โร.....	10
1.11 (a) การเรียงตัวของสารแอนติเฟอร์โร.....	11
1.11 (b) การเรียงตัวของสารเฟอร์รี.....	11
1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ.....	13
1.13 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	14
1.14 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	15
1.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	16
2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวีคลิงค์ (Weak Link Superconductor).....	21
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวีคลิงค์.....	25
2.3 วงจรที่มีการให้ไบอัสด้วยแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับกับรอยต่อโจเซฟสัน.....	26
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่มีการขับแรงดันด้วยกระแสตรงจากวงจรภายนอก.....	29
2.5 การเกิด Step ของแรงดันเมื่อมีการให้คลื่นไมโครเวฟกับรอยต่อโจเซฟสัน โดย Step มีค่าคงที่.....	30
2.6 ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับของรอยต่อโจเซฟสันในรูปแบบ Microbridge เมื่อให้คลื่นไมโครเวฟกระทำกับรอยต่อ.....	31

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.7 วงจรเสมือนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปแบบวีคลิงค์แต่ละชนิด.....	33
2.8 ลักษณะการออกสวิตช์ของฟังก์ชันคลื่นในรอยต่อวีคลิงค์ชนิดบริดจ์ (Bridge).....	34
2.9 ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดเกรนในโครงสร้างจุลภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก ออกไซด์อุณหภูมิสูง.....	35
2.10 ขอบเขตของเกรนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง.....	36
2.11 แผนภาพโครงสร้างขอบเขตของเกรน.....	37
3.1 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงถึง 1050 องศาเซลเซียส.....	39
3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผาความร้อนสูง 1050 องศาเซลเซียส.....	40
3.3 อุปกรณ์ต่างๆ ในการเตรียมสาร.....	40
3.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปสาร.....	41
3.5 Probe วัดชั้นสารและอุปกรณ์การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	41
3.6 ชุดวัดปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	42
3.7 ชุดวัดอุณหภูมิวิกฤติ.....	42
3.8 ชุดบัคกรีอุตราโซนิกและตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำผสมอินเดียม.....	43
3.9 ขั้นตอนมาตรฐานการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO.....	45
3.10 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	46
3.11 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	47
3.12 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก นอกระยะทำ.....	47
3.13 วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤติของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	48
3.14 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO.....	51
3.15 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO.....	52
3.16 ขนาดของเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	53
3.17 ขั้นตอนการทดลองหาอุณหภูมิการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	54
3.18 รูปร่างและการบัดกรีชั้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1 และ 2...55	55
3.19 รูปร่างและการบัดกรีชั้นสาร YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1, 2, 3 และ 4.....	56
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่เผาอุณหภูมิต่าง ๆ.....	57
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสกับอุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟค่ากระแสวิกฤตเมื่อมีและไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำ.....	59
4.4 กราฟค่าอุณหภูมิวิกฤตที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	59
4.5 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารในรูปแบบ 1 ของชิ้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/ GBCO เมื่อวัดแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้ว 2-6.....	61
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารรูปแบบ 1 เมื่อวัดแรงดัน ขั้ว 2-6.....	62
4.7 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารในรูปแบบ 1 ของชิ้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/ GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3.....	62
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารรูปแบบ 1 เมื่อวัดแรงดัน ระหว่างขั้ว 2-3.....	63
4.9 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารในรูปแบบ 1 ของชิ้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/ GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3.....	64
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสาร ในรูปแบบ 2 เมื่อวัดแรงดัน ระหว่างขั้ว 2-6.....	64
4.11 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารในรูปแบบ 2 ของชิ้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/ GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3.....	65
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบ 2 เมื่อวัดแรงดัน ระหว่างขั้ว 2-3.....	66
4.13 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ.....	69
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ในชิ้นสาร YBCO/ GBCO 4 รูปแบบ.....	70
4.15 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ.....	71
4.16 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ.....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 รูปร่างและการบัดกรีขึ้นสารเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
4 รูปแบบ.....	72
4.18 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
4 รูปแบบ.....	72
4.19 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 (ต่อ) ในชิ้นสาร YBCO/ GBCO รูปแบบ 3 และ 4.....	73
4.20 รูปร่างและการบัดกรีขึ้นสารเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
4 รูปแบบ.....	74
4.21 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
4 รูปแบบ.....	74
4.22 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 (ต่อ) ในชิ้นสาร YBCO/ GBCO รูปแบบ 3 และ 4.....	75
4.23 รูปร่างและการบัดกรีขึ้นสารในรูปแบบ 1 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดัน ระหว่างขั้วต่าง ๆ.....	75
4.24 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
รูปแบบ 1.....	76
4.25 รูปร่างและการบัดกรีขึ้นสารในรูปแบบ 2 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดัน ระหว่างขั้วต่าง ๆ.....	76
4.26 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
รูปแบบ 2.....	77
4.27 รูปร่างและการบัดกรีขึ้นสารในรูปแบบ 3 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดัน ระหว่างขั้วต่าง ๆ.....	78
4.28 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
รูปแบบ 3.....	78
4.29 รูปร่างและการบัดกรีขึ้นสารในรูปแบบ 4 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดัน ระหว่างขั้วต่าง ๆ.....	79
4.30 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ ในชิ้นสาร YBCO/GBCO	
รูปแบบ 4.....	79

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารในรูปแบบ 4 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดผลของพื้นที่รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีต่อการเกิด Step.....	84
5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อพื้นที่ของรอยต่อเปลี่ยนแปลง.....	85
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของ Step กับพื้นที่รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	85
5.4 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	87
5.5 วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO .....	88
5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของการเกิด 1 Step จากชิ้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เมื่อมีและไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ.....	89
5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของการเกิด 2 Step จากชิ้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เมื่อมีและไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ.....	90
5.8 วงจรเสมือนทางไฟฟ้าของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.....	91
6.1 แผนผังกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานของห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.....	94
6.2 แผนผังกระบวนการสร้างรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานของห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.....	95

# ศัพท์เทคนิค

กระแสคงสภาพ	Persistence Current
กระแสซูเปอร์	Supercurrent
กระแสตรง	Direct Current
กระแสตรงซูเปอร์	DC Supercurrent
กระแสทะลุผ่าน	Tunnel Current
กระแสไบอัส	Biasing Current
กระแสสลับ	Alternative Current
การเชื่อมต่อ	Coupling
การซินเทอร์	Sintering
การนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์	Electronic Conduction
แกดโกลินียมออกไซด์	Gadolinium Oxide
ขดลวดเหนี่ยวนำ	Inductance
ขอบเขตของเกรน	Grain Boundaries
ขอบเขตของเกรนมุมต่ำ	Low Angle Grain Boundaries
ขอบเขตของเกรนที่มีพลังงานน้อย	Low Energy Grain boundaries
ข้อบกพร่องทางระนาบ	Planar Defect
ข้อบกพร่องทางเส้น	Line Defect
เครื่องบันทึกสองแกน	X-Y Recorder
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	Temperature Controller
ความเข้มสนามแม่เหล็ก	Strength Field
ความเข้มข้นของแมกเนไทเซชัน	Magnetization
ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อ	Coupling Strength
ความซึมผ่านได้ของวัสดุ	Permeability
ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์	Relative Permeability
ความจุไฟฟ้า	Capacitance
ความจุไฟฟ้าของชั้นดี	Shunt Capacitance
ความต้านทาน	Resistance
ความต้านทานปกติของวัสดุ	Normal Resistance
ความถี่โจเซฟสัน	Josephson Frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ความยาวโคฮีเรนต์	Coherent Length
ความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็ก	Penetration Depth
ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต	Critical Current Density
ความหนาแน่นของแถบพลังงาน	Density of State
คอปเปอร์ออกไซด์	Copper Oxide
คู่อิเล็กตรอน	Electron Pair
ช่องว่างพลังงาน	Energy Gap
ชโรดิงเจอร์	Schrodinger
เซรามิก	Ceramic
ซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอน	Superconduction Electron
โดเมน	Domain
ตัวนำไฟฟ้า	Conductor
ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์	Perfect Conductor
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวีคลิงค์	Weakly - Linked Superconductor
เตาเผา	Furnace
ทฤษฎีบีซีเอส	BCS Theory
ทฤษฎีควอนตัมทางจุลภาค	Microscopic Quantum Theory
ทฤษฎีทางจุลภาค	Microscopic Theory
ทฤษฎีทางมหภาค	Macroscopic Theory
ทฤษฎียุคเก่า	Classical Theory
แม่เหล็กไดอา	Diamagnetic
แม่เหล็กไดอาอย่างสมบูรณ์	Perfect Diamagnetic
แม่เหล็กพารา	Paramagnetic
แม่เหล็กเฟอร์รี	Ferrimagnetic
แม่เหล็กเฟอร์โร	Ferromagnetic
แม่เหล็กแอนติเฟอร์โร	Antiferromagnetic
ไมโครบริดจ์	Microbridge
รอยต่อโจเซฟสัน	Josephson Junction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

รอยต่อโจเซฟสันระหว่างขอบเขตของเกรน	Intergrain Josephson Junction
ระยะเฉลี่ยปลอดการชน	Mean Free Path
แรงดันไฟฟ้า	Voltage
นอร์มอลคอนดักชันอิเล็กตรอน	Normal Conduction Electron
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
ปรากฏการณ์เชิงกลทางควอนตัม	Quantum Mechanical Phenomenon
ปรากฏการณ์ซิลสบี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์โจเซฟสัน	Josephson Effect
ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสตรง	DC Josephson Effect
ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับ	AC Josephson Effect
ปรากฏการณ์ทะลุผ่าน	Tunneling Effect
ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	Meissner Effect
แผนผังเฟส	Phase Diagram
โพลาริเซชันทางแม่เหล็ก	Magnetic Polarization
โฟนอน	Phonon
เฟสของเหลว	Liquid Phase
เฟสที่สอง	Second Phase
วีคลิงก์	Weak Link
สควิด	Superconducting Quantum Interference Device
สถานะนำไฟฟ้าปกติ	Normal State
สถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconducting State
สถานะผสม	Mixed State
สภาพการนำไฟฟ้า	Conductance
สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductivity
สภาพการเปลี่ยนแปลง	Transition
สภาพต้านทาน	Resistivity
สภาพไร้ความต้านทาน	Zero Resistance
สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	Magnetic Susceptibility

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	Magnetic Field
สนามแม่เหล็กวิกฤต	Critical Field
สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน	Upper Critical Field
สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง	Lower Critical Field
สิ่งบกพร่อง	Defect
เส้นทางการนำไฟฟ้า	Conduction Path
แหล่งกำเนิดกระแส	Current Source
แหล่งกำเนิดแรงดัน	Voltage Source
อนุกรมซัพฮาร์โมนิก	Subharmonic Series
อนุกรมฟูรีเยร์	Fourier Series
อิเล็กตรอนสปิน	Electron Spin
อิเล็กตรอนนำไฟฟ้า	Normal Electron
อิทเทรียมออกไซด์	Yttrium Oxide
อุณหภูมิคูรี	Curie Temperature
อุณหภูมิวิกฤต	Critical Temperature
ฮิสเทอรีซิส	Hysteresis

# สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	$\text{Wbm}^{-2}$
$B_u$	ความหนาแน่นของฟลักซ์ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	$\text{Wbm}^{-2}$
C	ความจุไฟฟ้า	F
H	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	Wb
$H_c$	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Wb
$H_{c1}$	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง	Wb
$H_{c2}$	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน	Wb
$H_0$	สนามแม่เหล็กที่ศูนย์เคลวิน	Wb
I	กระแส	A
$I_c$	กระแสวิกฤต	A
$J_c$	ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต	$\text{Acm}^{-2}$
K	ลักษณะของการเชื่อมต่อ	-
L	ขดลวดเหนี่ยวนำ	H
M	ความเข้มข้นของแมกเนโตเซชัน	$\text{Wbm}^{-2}$
R	ความต้านทาน	$\Omega$
$T_c$	อุณหภูมิวิกฤต	K
U	พลังงานของคู่อิเล็กตรอน	J
$V_0$	แรงดันไบอัสกระแสตรง	V
$V_1$	แรงดันไบอัสกระแสสลับ	V
$\chi$	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	-
$\delta$	ผลต่างระหว่างเฟสของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	-
$\delta_0$	ผลต่างระหว่างเฟสเริ่มต้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	-
$\Phi$	ฟลักซ์แม่เหล็ก	Wb
$\Phi_0$	ฟลักซ์ควอนตัม	$\text{T}\cdot\text{m}^2$
$\lambda$	ความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็ก	m
$\mu$	ความซึมซาบได้	-
$\mu_0$	ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ	-
$\mu_r$	ความซึมซาบได้สัมพัทธ์	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\theta$	เฟสของฟังก์ชันคลื่นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	-
$\rho$	สภาพต้านทานไฟฟ้า	$\Omega\text{-m}$
$\sigma$	สภาพนำไฟฟ้า	$\Omega^{-1}\text{-m}^{-1}$
$\omega_u$	ความถี่กระแสสลับ	Hz
$\omega_J$	ความถี่โจเซฟสัน	Hz
$\xi$	ความยาวโคฮีเรนต์	m
$\psi$	ฟังก์ชันคลื่นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	-



## คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางรอยต่อในสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาไปอย่างมากและมีบทบาทสำคัญในงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากมาย ซึ่งอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน คือ มีการสูญเสียพลังงานในขณะที่นำไปใช้งานและขอบเขตในการนำไปใช้งานที่แคบกว่า ดังนั้นจึงได้มีการศึกษานำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแทนสารกึ่งตัวนำมาพัฒนาเป็นรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งมีข้อดี คือ ไม่มีการสูญเสียพลังงานในขณะที่นำไปใช้งาน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิจัยกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ขึ้นด้วยกระบวนการสร้างของห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่มีความสะอาดและไม่ซับซ้อนมาก สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ที่สร้างขึ้นได้จะมีคุณภาพที่ดี จากนั้นจะศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เพื่อเป็นแนวทางในการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานต่อไป เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท เค้าโครงของแต่ละบทมีดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงประวัติการค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กของวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ประเภทของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ในด้านต่าง ๆ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของปรากฏการณ์โจเซฟสัน ได้แก่ สมการพื้นฐานของปรากฏการณ์โจเซฟสัน ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสตรงและกระแสสลับ ลักษณะสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดัน และขอบเขตเกรนของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ได้แก่ วัสดุและอุปกรณ์ในกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO การหาเงื่อนไขของอุณหภูมิการเผาเพื่อใช้เป็นกระบวนการสร้างและคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบใหม่ คือ GBCO เพื่อนำมาศึกษาร่วมกับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และการหาอุณหภูมิในการเผาของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เพื่อกำหนดเป็นกระบวนการสร้างรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO การหาคุณสมบัติทางกายภาพของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO การหาผลของความเป็นรอยต่อจากรอยต่อตัวนำ

ไฟฟ้าเชิงขั้วแบบ YBCO/GBCO การหาผลของรูปแบบและลักษณะการวัดของขั้วแรงดัน  
ที่มีต่อลักษณะการเกิดของ Step บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองต่าง ๆ

บทที่ 5 กล่าวถึงแนวทางการประยุกต์ใช้งานรอยต่อตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้วแบบ YBCO/GBCO โดยทำ  
การศึกษาถึงผลของพื้นที่รอยต่อตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้วแบบ YBCO/GBCO ที่มีต่อลักษณะการ  
เกิด Step และผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะการเกิด Step

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์



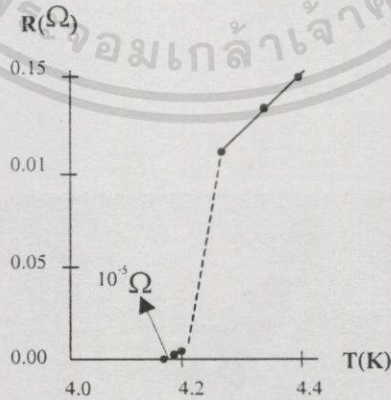
# บทที่ 1

## บทนำ

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทาน กระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านได้ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนดังที่เกิดขึ้นในโลหะ ปัจจุบันนี้ในบางประเทศมีความก้าวหน้าในการนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้งานได้เป็นอย่างดี เป็นต้นว่า มีการนำเคเบิลตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้แทนเคเบิลโลหะ การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระแสไฟฟ้าแล้วใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงแทนแม่เหล็กถาวรในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีขนาดเล็กลงแต่กำลังสูงขึ้น ใช้ทำชิ้นส่วนทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายสามารถลดขนาดลงได้โดยไม่มีอุปสรรคในเรื่องความร้อน ฯลฯ ในอนาคตจึงเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ อย่างแน่นอนที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะได้รับการพัฒนาจนเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของชาวโลกมากขึ้น

### 1.1 ประวัติการค้นพบสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบครั้งแรกในปรอท (Mercury, Hg) เมื่อปี ค.ศ. 1911 [1] จากกราฟความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆของปรอทในรูปที่ 1.1 พบว่าที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวิน ลงมาความต้านทานของปรอทลดลงเหลือต่ำกว่า  $10^{-5}$  โอห์ม อย่างรวดเร็วและสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้อย่างมาก แสดงว่าปรอทมีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่างไปจากเดิมเมื่อลดอุณหภูมิลงต่ำกว่า 4.2 เคลวิน เรียกสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity) และอุณหภูมิ 4.2 เคลวิน คือ อุณหภูมิวิกฤต หรือ อุณหภูมิทรานซิชัน (Critical or Transition Temperature,  $T_c$ ) ของปรอท



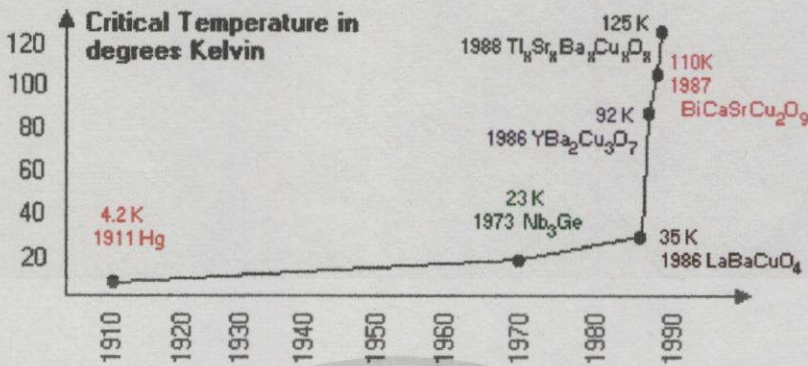
รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท จากการทดลองของนาย Heike Kamerlingh Onnes [1]

ดังนั้นปรอทจึงเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) ในการทดลองต่อมายังพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในธาตุหลายตัว โลหะผสมจำนวนมากที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้นาย Heike Kamerlingh Onnes ได้รับรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1913

หลังจากการทดลองของนาย Heike Kamerlingh Onnes ก็มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากได้หันมาทดลองค้นคว้าเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดและค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 เคลวิน จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) [2] ในปี ค.ศ. 1969 ก็สามารเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตเป็น 20 เคลวิน และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลว (ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) นับเป็นครั้งแรกที่ใช้ตัวทำความเย็นตัวอื่นที่ไม่ใช่ฮีเลียมเหลว จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1986 นาย Karal Alex Muller และ นาย Johannes George Bednorz นักวิจัยของ IBM Research Laboratory ทำการทดลองโดยใช้ส่วนผสมจากอัลลอยด์ของโลหะมาเป็นโลหะออกไซด์ (Metallic Oxide) ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะหลายชนิดกับออกซิเจนหรือวัสดุเซรามิก [2] และในเวลา 3 ปีต่อมาก็ได้ค้นพบสารประกอบที่สามารถเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้จากธาตุแบเรียม-แลนทานัม-ทองแดง-ออกซิเจน คือ  $Ba_xLa_{1-x}Cu_3O_{(3-x)}$  โดยทำการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อ  $x = 1$  และ  $x = 0.75$  ได้อุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 35 เคลวิน [3]

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมนักวิจัยของมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทดลองเปลี่ยนธาตุแบเรียมเป็นสตรอนเชียม (Sr) ที่มีขนาดของอะตอมที่เล็กกว่าแบเรียม (Ba) ปรากฏว่าทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นเป็น 54 เคลวิน [4-5] จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. Chu ได้ทดลองเปลี่ยนธาตุแลนทานัม (La) เป็นธาตุอิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95 เคลวิน [4-5] จากอุณหภูมิวิกฤตนี้ได้สร้างความตื่นตัวให้กับวงการฟิสิกส์ทั่วโลกเพราะว่าสามารถที่จะใช้ในไฮโดรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของนาย C.W. Chu) เป็นตัวทำความเย็น ในไฮโดรเจนเหลวนี้นับว่ามีราคาถูกมาก และเตรียมง่ายกว่าตัวทำความเย็นชนิดอื่นที่เคยใช้มา สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้ เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มของอิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้คล้ายคลึงกับโครงสร้างทางเซรามิกประเภท  $K_2NiF_4$  ที่เรียกว่า Perovskites แต่เซรามิกประเภทนี้เป็นชนิดที่มีจำนวนออกซิเจนไม่ครบ หรือเรียกว่า Oxygen Defect Perovskites อุณหภูมิวิกฤตของธาตุในกลุ่มนี้นับว่าสูงมากเมื่อเทียบกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เคยสร้างมา จะเห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่พบนี้เป็นการทดลองที่อาศัยข้อมูลที่พอมีอยู่แล้ว มิใช่การพบโดยบังเอิญ นักวิทยาศาสตร์ยังคงตั้งเป้าหมายที่จะสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้ และปัญหาอีกจำนวนมากยังคงต้องถูกแก้ไขใหม่ เช่น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสจำนวนมาก ความยากลำบากในการทำให้เป็นเส้น วง

และรูปร่างอื่น ๆ แต่นักวิจัยส่วนใหญ่เชื่อว่าปัญหานี้จะผ่านพ้นไปได้ ความก้าวหน้าของการพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวคนั้นสรุปได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [1]

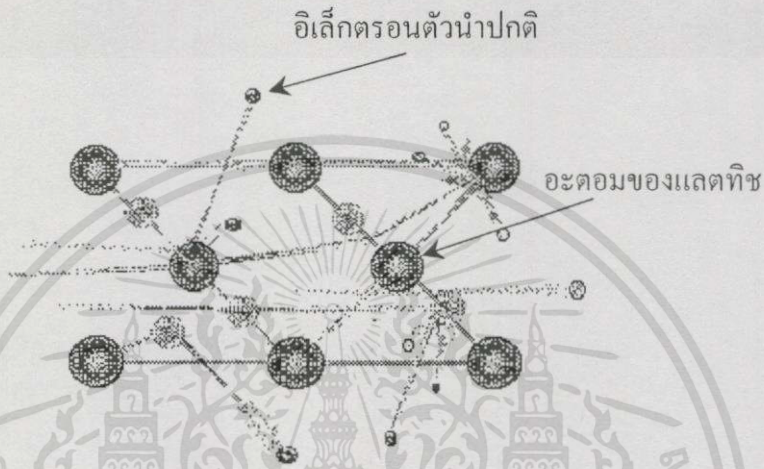
## 1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 1.2.1 สภาพการนำไฟฟ้า

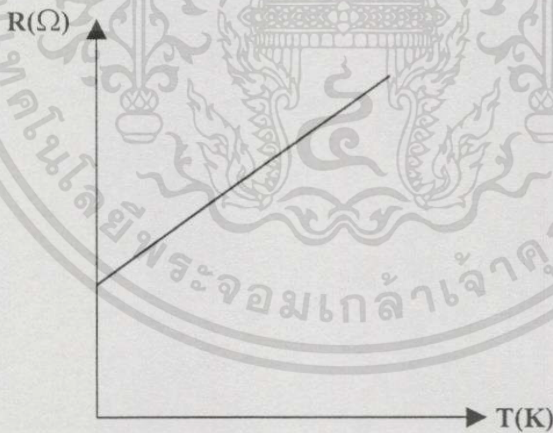
สภาพการนำไฟฟ้า (Conductance) ของวัสดุใด ก็คือส่วนกลับของสภาพต้านทานหรืออาอริบายได้ในเทอมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน [6] เนื่องจากถือกันว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้า วัสดุที่เป็นฉนวน เช่น ยาง แก้ว อิเล็กตรอนในอะตอมถูกยึดเหนี่ยวไม่ให้เคลื่อนที่ผ่านวัสดุ ฉนวนจึงมีความต้านทานสูง ส่วนอิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้าถูกยึดเหนี่ยวไว้อย่างหลวมๆ จึงเคลื่อนที่ในตัวนำไฟฟ้าได้แต่ไม่เป็นระเบียบนักเนื่องจากยังมีการชนกัน ความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เพราะความร้อนมีผลให้อิเล็กตรอนชนกันมากขึ้น สำหรับในตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีความต้านทานอยู่เลย เพราะอิเล็กตรอนเคลื่อนที่กันไปเป็นคู่ ๆ โดย ไม่มีการชนกันจึงไม่เกิดพลังงานความร้อนขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทฤษฎีที่อธิบายสภาพนำไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทฤษฎีซึ่งเป็นที่ยอมรับกันก็คือทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory) ยังคงมีการศึกษากันอยู่และพยายามนำมาอธิบายการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสารประกอบเซรามิก

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดการไหลของประจุไฟฟ้าเกิด “กระแสไฟฟ้า” และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอน (Electronic Conduction) วัสดุที่มีการนำไฟฟ้าในลักษณะนี้ที่ทุกอุณหภูมิเรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนั้นจะมีสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่ เช่น ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุหรือมีการตันของอะตอมทำให้ผลึกไม่สมบูรณ์ มีสิ่งเจือปน (Impurity) อยู่ด้วยเสมอ สำหรับความต้านทานไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้านั้นเกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนและการตันของโครงผลึกดังในรูปที่ 1.3 ซึ่งอยู่ในสถานะนำไฟฟ้า

ปกติ ดังนั้นโลหะทุกชนิดจะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเสมอ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นค่าวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่ได้รับจากอิเล็กตรอน ทำให้ความต้านทานของวัสดุนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการรบกวนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้ความต้านทานสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลง ความต้านทานก็จะลดลงด้วย แต่ไม่ว่าอุณหภูมิจะลดลงเพียงใดก็ตาม การสั่นของโครงผลึก และสารเจือปนที่ปนอยู่ในโครงสร้างจะทำให้ความต้านทานไม่มีทางเป็นศูนย์ได้ดังในรูปที่ 1.4



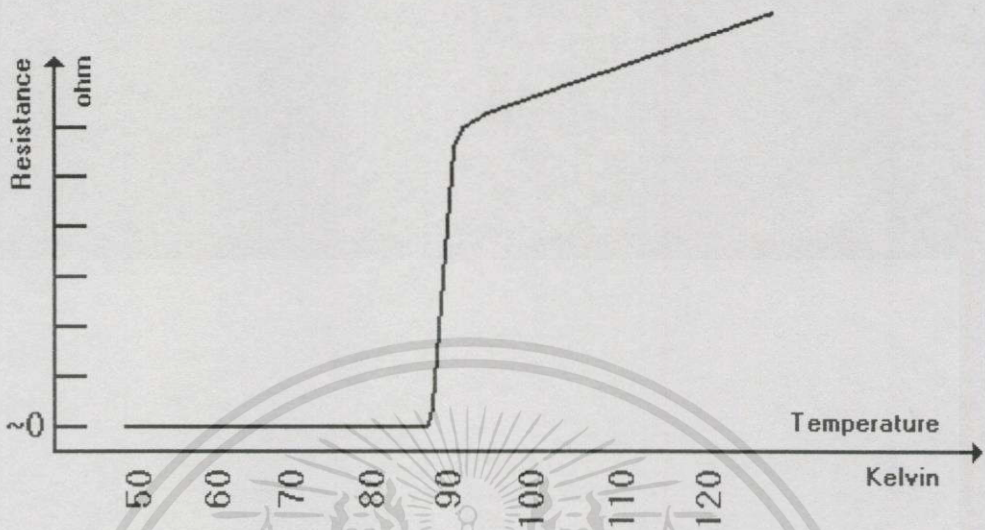
รูปที่ 1.3 การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนำไฟฟ้าปกติ (Normal State) [6]



รูปที่ 1.4 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะ [6]

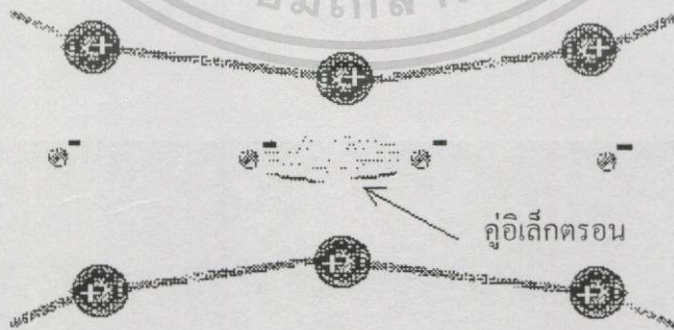
จากการที่ความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงการสั่นของโครงผลึกน้อยลงและอิเล็กตรอนมีการกระเจิงลดลงด้วย จำนวนการชนก็ลดน้อยลง ช่วงการชนจะยาวขึ้นจึงทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าลดน้อยลง และเมื่ออุณหภูมียิ่งลดต่ำลงมาก ช่วงปลอดการชนจะยาวขึ้นจนแทบไม่ชนกันเลย ทำให้ความต้านทานนี้มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ เมื่อ

วัตถุนั้นอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ความต้านทานทางไฟฟ้าจะหายไปอย่างรวดเร็วเกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) ดังในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [1]

ในสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวคนั้น (Superconducting State) เป็นสถานะที่อิเล็กตรอนตัวนำของโลหะอยู่ในลักษณะของคู่อิเล็กตรอนเป็นคู่ ๆ โดยอิเล็กตรอนจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตดังในรูปที่ 1.6 ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เกิดความต้านทานทางไฟฟ้า ในการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะ สารกึ่งตัวนำ และสารประกอบต่าง ๆ แต่ต้องอยู่ในอุณหภูมิต่ำ ๆ



รูปที่ 1.6 การเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconducting State) [1]

### 1.2.2 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

จากการที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ความต้านทานลดลงจนถึงอุณหภูมิต่ำที่ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ อุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิวิกฤตนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดและมีค่าคงที่ เช่น โลหะที่มีความบริสุทธิ์นั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำมากเมื่อเติมสารเจือทางแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยจะทำให้อุณหภูมิต่ำลงอย่างมาก อุณหภูมิวิกฤตนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ถ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูง ๆ จะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้นเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานและคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้สามารถยอมรับได้สามารถนำไปพิจารณาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้อีกมากมาย

### 1.2.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

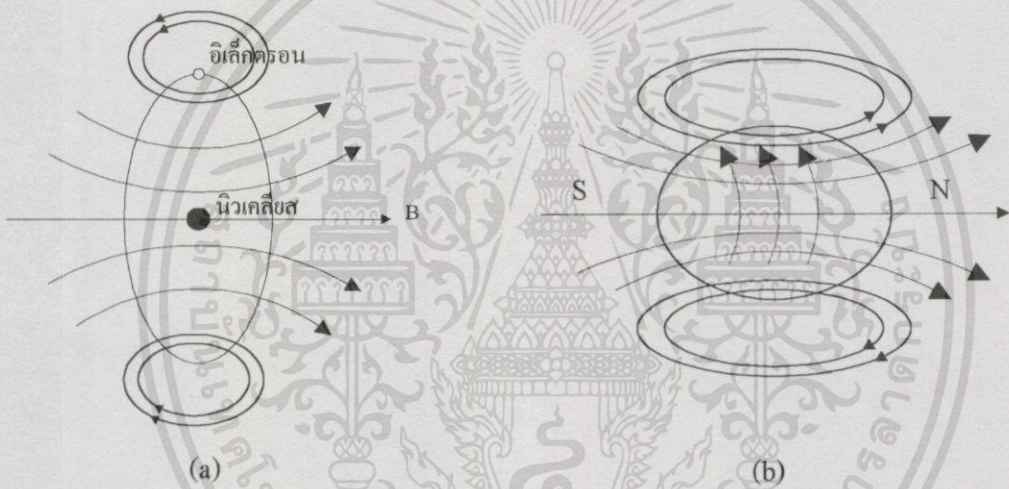
ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อให้กระแสไหลผ่านมากเพียงพอ จนทำให้เกิดค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารหรือเกิดมีความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นนั้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ค่ากระแสที่ไหลผ่านนี้เรียกว่า กระแสวิกฤต (Critical Current :  $I_c$ ) เมื่อให้กระแสไหลผ่านน้อยกว่ากระแสวิกฤตจะไม่เกิดแรงดันตกคร่อมหรือความต้านทาน แต่เมื่อให้กระแสไหลมากกว่ากระแสวิกฤตจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม

สำหรับการพิจารณาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งาน สามารถพิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density :  $J_c$ ) ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤตกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน พารามิเตอร์ตัวนี้มีความสำคัญอย่างมากเพราะในชิ้นสารเดียวกันจะมีค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตเท่ากันหมดทุกจุด ดังนั้นในส่วนที่เชื่อมต่อกันอย่างหลวมๆ จะยอมให้กระแสวิกฤตไหลได้น้อยที่สุด ถ้าให้กระแสไหลมากกว่าค่ากระแสวิกฤตนี้จะทำให้ชิ้นสารตรงจุดนั้นแตกหรือแยกจากกัน จะเกิดความต้านทานทางไฟฟ้าหรือแรงดันตกคร่อมขึ้นสารตรงจุดนั้นทันที ดังนั้นจึงนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ เช่น ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ถึงแม้ว่าค่าสนามแม่เหล็กจะต่ำอย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่สร้างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็สามารถตรวจจับได้ เรียกอุปกรณ์นี้ว่า ไมโครบริดจ์ (Microbridge) หลักการนี้มีความสำคัญต่อการนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ในการใช้งานต่าง ๆ ต่อไป

## 1.3 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 1.3.1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กทั่วไป [6-8]

สมบัติความเป็นแม่เหล็กของสารนั้นเกิดจากอิเล็กตรอน การเกิดสนามแม่เหล็กเป็นไปได้อีก 2 กรณี คือ กรณีแรกเกิดจากอิเล็กตรอนหมุนวนรอบนิวเคลียสในอะตอม การหมุนวนนั้นก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะคล้ายกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำที่ขดเป็นวงกลม ทิศทางของกระแสไฟฟ้านั้นตรงกันข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 1.7(a) กรณีที่สองเกิดจากสมบัติประจำตัวของอิเล็กตรอน กล่าวคือ อิเล็กตรอนประพุดิตัวคล้ายกับว่าเป็นแท่งแม่เหล็กแท่งเล็ก ๆ ส่งสนามแม่เหล็กออกโดยรอบ อาจถือเสมือนหนึ่งว่าอิเล็กตรอนมีลักษณะเป็นกลุ่มประจุไฟฟ้าลบที่หมุนรอบตัวเอง การหมุนของอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่า อิเล็กตรอนสปิน (Electron Spin) นี้ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดังกล่าว ดังในรูปที่ 1.7(b)

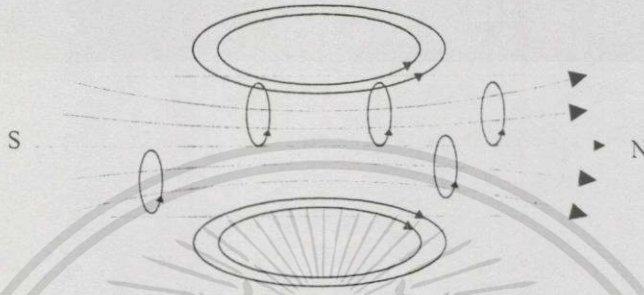


รูปที่ 1.7 (a) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก  
(b) อิเล็กตรอนสปินเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กได้อีกทางหนึ่ง [6]

การเกิดสนามแม่เหล็กจากทั้งสองกรณีนั้น ถ้าเป็นแท่งแม่เหล็กสนามแม่เหล็กจะเกิดจากอิเล็กตรอนสปินมากกว่าที่จะเกิดจากการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงกลมรอบนิวเคลียส แต่ถ้าไม่ใช่วัสดุที่จะมาทำแท่งแม่เหล็กได้แล้ว การเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงกลม จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากกว่า

สารต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วนั้นไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กออกมา การที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เมื่อมีการหมุนวนเป็นวงกลมรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนตัวหนึ่ง ก็จะมีอิเล็กตรอนอีกตัวหมุนวนในทิศตรงกันข้าม สนามแม่เหล็กก็หักล้างกันไปหมด ในทำนองเดียวกันเมื่อมีอิเล็กตรอนมีสปินในทิศหนึ่งก็จะมีอิเล็กตรอนอีกตัวมีสปินในทิศตรงกันข้ามหักล้างกันไปอีก การหักล้างกันเช่นนี้ทำให้สารนั้นไม่เป็นแม่เหล็ก สารที่เป็นโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล ซึ่งโลหะ

สามชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า สารแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic Materials) และสารอโลหะที่มีชื่อว่า แมกนีไตต์ (Magnetite) ซึ่งเรียกว่า สารแม่เหล็กเฟอร์รี (Ferrimagnetic Materials) สารดังกล่าวนี้มีการเรียงตัวของอิเล็กตรอนซึ่งมีสปินในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าในอีกทิศทางหนึ่ง ถ้าเราพิจารณาแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งแท่งใด แนวเหนื่อได้ของแท่ง ก็คือ แนวแกนการหมุนของอิเล็กตรอนในเนื้อสารแม่เหล็กนั้นดังในรูปที่ 1.8 ถ้ามีความเข้มข้นแม่เหล็กสูง ก็แสดงว่ามีจำนวนอิเล็กตรอนที่หมุนไปในทิศทางเดียวกันมาก



รูปที่ 1.8 ลักษณะอิเล็กตรอนสปินของอิเล็กตรอนหลายตัว [6]

### 1.3.2 ความเป็นแม่เหล็ก

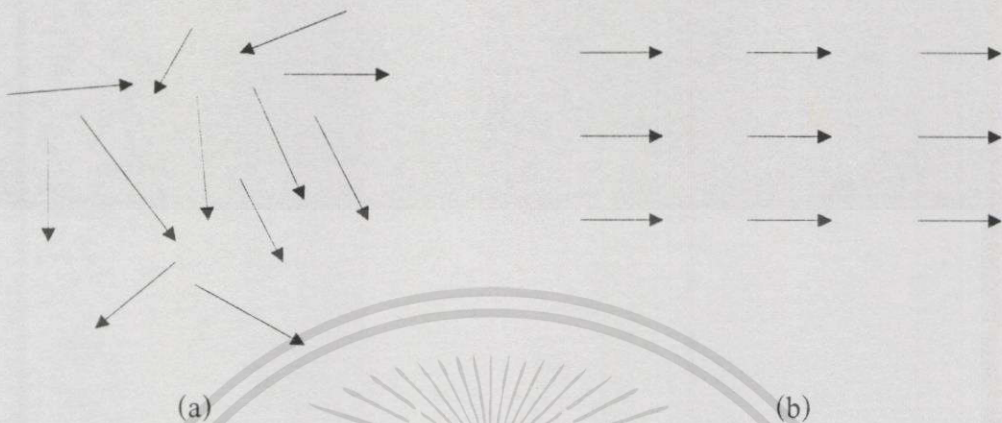
อะตอมจะแสดงสมบัติว่ามีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดอิเล็กตรอนในวงโคจรต่าง ๆ ของอะตอมนั้น ๆ โมเลกุลส่วนมากมักไม่อยู่ในลักษณะก่อนกลบ จึงมักจะมีโมเมนต์ขั้วคู่แสดงออก ตัวอย่างเช่น โมเลกุลประเภทที่สองอะตอมเกาะกัน เช่น พวกก๊าซต่าง ๆ จะมีโมเมนต์ขั้วคู่ของแม่เหล็กตามแนวแกนของโมเลกุลนั้น สารที่อยู่ในลักษณะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ยกเว้นสารแม่เหล็กเฟอร์โร จะไม่แสดงโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก เนื่องจากโมเลกุลของมันเรียงตัวมีทิศทางอย่างสุ่ม แต่ถ้าหากว่ามีสนามแม่เหล็กภายนอกมาอยู่ในบริเวณสารนั้น ทำให้การโคจรของอิเล็กตรอนมีทิศทางเปลี่ยนไป อำนาจแม่เหล็กนั้นจะเกิดขึ้นมาในสารก้อนนั้นได้ การที่ทำให้สารหนึ่งสารใดแสดงความเป็นแม่เหล็กออกมา โดยใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกนี้ เรียกว่า การทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก และการที่อะตอมหรือโมเลกุลมีทิศโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กในทิศทางหนึ่งทิศใดมากกว่าทิศอื่นนั้น เรียกว่า โพลาริเซชันทางแม่เหล็ก (Magnetic Polarization)

### 1.3.3 ชนิดของความเป็นแม่เหล็กของสาร

#### 1.3.3.1 อำนาจแม่เหล็กพารา

การแสดงอำนาจแม่เหล็กพารา (Paramagnetism) หมายถึง การที่สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควบจัดเรียงขั้วคู่ให้หันไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น สมบัติที่สำคัญของความเป็นแม่เหล็กแบบนี้ ก็คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสาร

เป็นส่วนสำคัญโดยตรงกับค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และเป็นส่วนกลับกันกับอุณหภูมิ ตัวอย่างของสารแม่เหล็กชนิดนี้คือ สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กพารา การเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ จะมีลักษณะดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 อำนาจแม่เหล็กพารา [6]

- (a) โมเมนต์ขั้วคู่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ
- (b) สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้โมเมนต์ขั้วคู่มาเรียงตัวกัน

### 1.3.3.2 อำนาจแม่เหล็กไดอา

การแสดงอำนาจแม่เหล็กไดอา (Diamagnetism) หมายถึง การที่สารแม่เหล็กมีการต่อต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก สารแม่เหล็กแบบนี้เรียกว่า สารแม่เหล็กไดอา (Diamagnetic Substances) ตัวอย่างของสารแม่เหล็กชนิดนี้ คือ บิสมัท สาเหตุแห่งการที่สารแม่เหล็กไดอาต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น อธิบายได้ด้วยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารนั้น และต้านสารประเภทสารแม่เหล็กไดอาวางในสนามแม่เหล็ก (B) ก่อให้เกิดแรงผลักดันระหว่างสนามแม่เหล็กของสารกับสนามแม่เหล็กภายนอก สรุปได้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นตัวการเหนี่ยวนำให้สารแม่เหล็กไดอา มีขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน ซึ่งจะผลักดัน

### 1.3.3.3 อำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร

การแสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism) อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีการจัด โมเมนต์ขั้วคู่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกันให้มีทิศทางไปทางเดียวกัน ภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน สมบัติที่เด่นชัดของสารแม่เหล็กเฟอร์โร ก็คือ ความเป็นแม่เหล็กของสารไม่มีสภาพโดยตรงกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและสารอาจแสดงสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโดลิเนียม และดิสโพรเซียม สารทั้ง 5 นี้จะคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรตราบที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่า

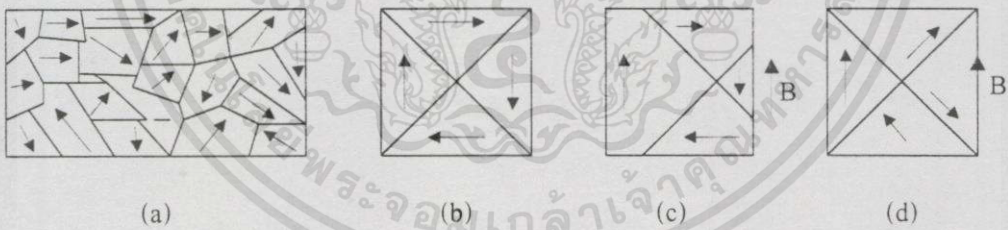
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะเปลี่ยนไปเป็นสารแม่เหล็กพาราที่สมบัตินี้จะเกิดได้ แม้ว่าอะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้อยู่ในโครงสร้างของผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแต่ธาตุทั้ง 5 นี้ อย่างเดียว

ตารางที่ 1.1 สารแม่เหล็กเฟอร์โร [6]

ธาตุ	เลขอะตอม (Z)	น้ำหนักอะตอม
Fe	26	55.85
Co	27	58.94
Ni	28	58.71
Gd	64	157.26
Dy	66	162.51

ในสารแม่เหล็กเฟอร์โรนั้น อิเล็กตรอน 2 ตัวที่อยู่ใกล้ ๆ กัน จะมีสปินชี้ไปในทิศทางขนานกัน ก่อให้เกิดปริมาตรเล็ก ๆ ขนาด  $10^{-8}$ - $10^{-12}$  ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีการเรียงของแนวการหมุนของอิเล็กตรอนไปในทิศทางขนานกัน เรียกว่า โดเมน (Domains) โดเมนหนึ่ง ๆ มีอะตอมประมาณ  $10^{17}$ - $10^{21}$  อะตอม ทิศทางความเป็นแม่เหล็กของโดเมนขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึกสาร ลักษณะโดเมนของสารแม่เหล็กเฟอร์โรแสดงได้ดังรูปที่ 1.10

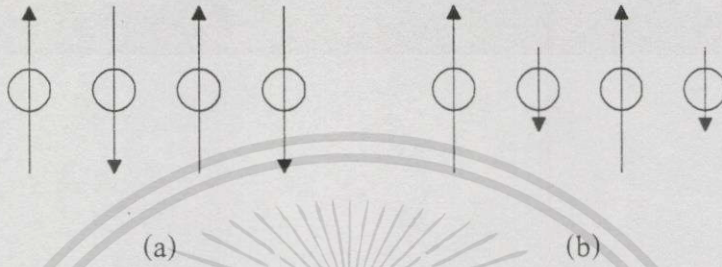


รูปที่ 1.10 ลักษณะโดเมนในสารแม่เหล็กเฟอร์โร [6]

- ขณะไม่เป็นแม่เหล็กโดเมนจะเรียงสับสนโมเมนต์ขั้วคู่จะมีทิศทางต่าง ๆ กันไป
  - ส่วนหนึ่งของโดเมนขณะไม่เป็นแม่เหล็ก
  - เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก โดเมนจะเพิ่มส่วนหนึ่ง ลดส่วนหนึ่ง
  - ขณะมีสนามแม่เหล็ก โดเมนจะเรียงทิศใหม่
- ทั้ง (c) และ (d) สารจะมีความเป็นแม่เหล็กขึ้น

### 1.3.3.4 อำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและอำนาจแม่เหล็กเฟอร์รี

สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Antiferromagnetism) หมายถึง สารที่มีการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนหลาย ๆ ตัวขนานกัน แต่มีทิศทางการกลับทิศกัน ค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของสารรวมเป็นศูนย์และมีค่าความเป็นแม่เหล็กรวมเป็นศูนย์ สารเหล่านี้ ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ และแมงกานีส ซึ่งมีลักษณะทิศทางการของโมเมนต์ขั้วคู่แสดงดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 (a) แสดงการเรียงตัวของสารแอนติเฟอร์โร (b) แสดงการเรียงตัวของสารเฟอร์รี [6]

สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์รี (Ferrimagnetism) หมายถึง สารที่มีเวกเตอร์ของโมเมนต์ขั้วคู่ขนานกันในทิศตรงกันข้ามกันมีขนาดไม่เท่ากัน เป็นผลให้อำนาจแม่เหล็กเหลืออยู่ สารเหล่านี้ ได้แก่ เฟอร์ไรต์ ( $X\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) โดยที่ X คือ Fe Mn Co Ni Cu Mg Zn และ Cd ตัวหนึ่งตัวใดก็ได้ และถ้า X เป็น Fe สารนี้ คือ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  หรือแมกนีไตต์นั่นเอง

### 1.3.4 คุณสมบัติของสารแม่เหล็กของสารตัวนำทั่วไป [6-8]

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งจะมีสมการดังต่อไปนี้

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

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

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

โดยที่	B	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก
	H	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
	M	ความเข้มข้นของแมกเนไตเซชัน (Magnetization)
	$\chi$	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Susceptibility)
	$\mu_0$	ความซึมผ่านได้ของสุญญากาศ (Permeability)
	$\mu_r$	ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3.5 แม่เหล็กเซรามิก (Ceramic Magnetics)

อิเล็กตรอนทุกตัวภายในอะตอมจะมีโมเมนต์แม่เหล็ก โดยค่าของโมเมนต์แม่เหล็กนี้เรียกว่า “Bohr Magneton” ซึ่งเท่ากับ  $9.27 \times 10^{-24}$  แอมแปร์-ตารางเมตร โลหะทรานซิชันได้แก่เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และแกดโกลเนียม ภายในอะตอมมีอิเล็กตรอนสปินอย่างไม่สมดุล ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กรวมไม่เท่ากับศูนย์จึงสามารถเกิดสภาวะแม่เหล็กได้ สารประกอบเซรามิกถ้าภายในโครงสร้างประกอบด้วยไอออนของโลหะที่กล่าวมาข้างต้น มีการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กตัวเอง แม่เหล็กเซรามิกจะมีสภาวะเฟอร์ริแมกเนติก ประกอบด้วยไอออนของโลหะและอโลหะ ซึ่งมีขนาดของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กไม่เท่ากันและมีทิศทางกลับกันแต่มีการปรับแนวให้ขนานกันได้

### 1.3.6 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สำหรับกรณีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สมการ (1.1) , (1.2) และ (1.3) จะเขียนได้เป็น

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

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

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

จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแสดงอำนาจแม่เหล็กได้อาจทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแม่เหล็กแตกต่างไปจากตัวนำธรรมดา คือ พิจารณาวงแหวนตัวนำธรรมดาและวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขนาดเท่ากัน วางในสนามแม่เหล็กภายใต้เงื่อนไขเดียวกันพบว่า เมื่อหยุดผ่านสนามแม่เหล็กเข้าไป วงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาเอง ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไหลวนในวงแหวน สำหรับวงแหวนตัวนำธรรมดาคะจะไม่ปรากฏสนามแม่เหล็กเลย

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

จากการผ่านสนามแม่เหล็กไปยังตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่า สนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้กลายเป็นสภาพปกติ (Normal State) ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้พอดีนั้นจะเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field :  $H_c$ ) และพบว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะขึ้นกับอุณหภูมิด้วย กล่าวคือ ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้จากสมการ

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2] \quad (1.7)$$

เมื่อ  $H_c$  = สนามแม่เหล็กวิกฤต

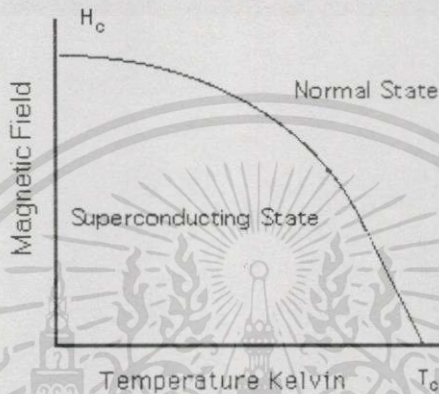
$H_0$  = สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T =$  อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

$T_c =$  อุณหภูมิวิกฤต

ด้วยเหตุนี้เองค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจึงถูกใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะทำให้ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่อุณหภูมินั้น ๆ



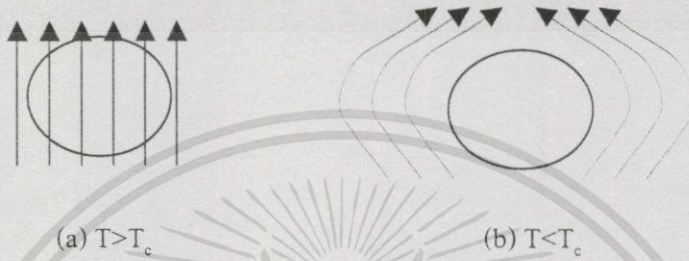
รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ [1]

จากรูปที่ 1.12 ถ้าโลหะมีค่าสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิที่สอดคล้องกันอยู่ภายใต้เส้นแผนภาพเฟส (Phase Diagram) โลหะนั้นยังคงสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ แต่ถ้าต้องการให้กลับไปสู่สภาพปกติก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มสนามแม่เหล็กหรือเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มทั้งสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิพร้อม ๆ กันได้

### 1.3.6.2 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect)

ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ เป็นสมบัติทางสนามแม่เหล็กที่สำคัญอย่างมากในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพราะใช้ทดสอบการมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอย่างง่าย ๆ จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีความต้านทานทางไฟฟ้าทำให้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะไม่เกิดแรงดันและไม่เกิดการสูญเสียทางความร้อนภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีไฟฟ้าแม้จะป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก สนามแม่เหล็กที่เคออยู่ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่มีเปลี่ยนแปลงใด ๆ จากรูปที่ 1.13 เมื่อนำวัสดุทรงกลม (ยังไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด) อยู่ในอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก แล้ววัสดุทรงกลมนั้นจะเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดา เส้นแรงแม่เหล็กจึงสามารถซึมทะลุผ่านเข้าไปในทรงกลมได้ จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิของทรงกลมให้ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตจนทำให้วัสดุทรงกลมนี้มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สนามแม่เหล็กภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้

จะต้องเป็นศูนย์เสมอและไม่ขึ้นกับขั้นตอนการลดอุณหภูมิหรือการป้อนสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ トラบไคที่อุณหภูมิมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิกวิกฤต เส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องมีลักษณะในรูป 1.13(b) เสมอ ผลที่เกิดในลักษณะนี้ทำให้ทราบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่เพียงแต่เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ (Perfect Conductor) เท่านั้นแต่ในขณะเดียวกันก็เป็นแม่เหล็กไดอาอย่างสมบูรณ์ (Perfect Diamagnetic) ด้วย ซึ่งไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กซึมซาบเข้าไปภายใน คุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กไดอาอย่างสมบูรณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

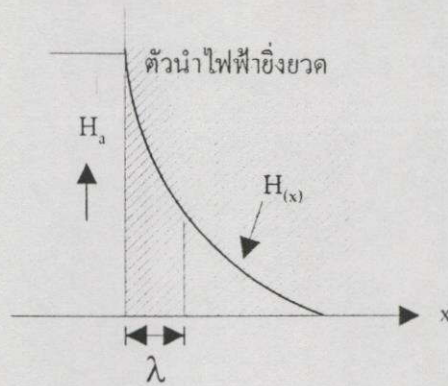


รูปที่ 1.13 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อ (a) อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกวิกฤต (b) อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกวิกฤต [1]

นาย W. Meissner และ นาย R. Ochsenfeld ได้ทำการทดลองและค้นพบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ต่อมาสองพี่น้อง F. และ H. London สามารถคิดค้นสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้เป็นครั้งแรก เขาได้ให้ความเห็นว่าในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวคนั้น อิเล็กตรอนที่ทำหน้าที่ต่อการนำไฟฟ้ายิ่งยวดมี 2 ชนิด คือ ซุปเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอน (Superconduction Electron) และนอร์มอลคอนดักชันอิเล็กตรอน (Normal Conduction Electron) ซึ่งซุปเปอร์คอนดักชันจะเป็นตัวพากระแสไฟฟ้าแบบซุปเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอน หรือแบบยิ่งยวดได้โดยปราศจากแรงต้านทานใด ๆ จากโครงสร้างผลึก ส่วนนอร์มอลคอนดักชันอิเล็กตรอนนั้นจะถูกแรงต้านทานจากข้อบกพร่องต่าง ๆ ในผลึก [7]

จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถแสดงอำนาจแม่เหล็กไดอาอันทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีคุณสมบัติต่างจากตัวนำไฟฟ้าธรรมดา โดยอิเล็กตรอนที่นำไฟฟ้ามักเคลื่อนที่เพื่อต่อต้านแม่เหล็ก ทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ถ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีลักษณะเป็นวงแหวน กระแสที่เกิดขึ้นจะไหลวนในวงแหวนคงที่ตลอดเวลา เรียกกระแสที่ไหลวนนี้ว่า กระแสคงสภาพ (Persistence Current) และกระแสที่ไหลวนนี้ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น

สมมติว่าวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีปริมาตรตั้งแต่  $x \geq 0$  เป็นต้นไป และถ้าป้อนค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H_0$ ) ในทิศทาง  $x$  แล้วจะมีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ( $B_0$ ) จะมีลักษณะดังรูปที่ 1.14



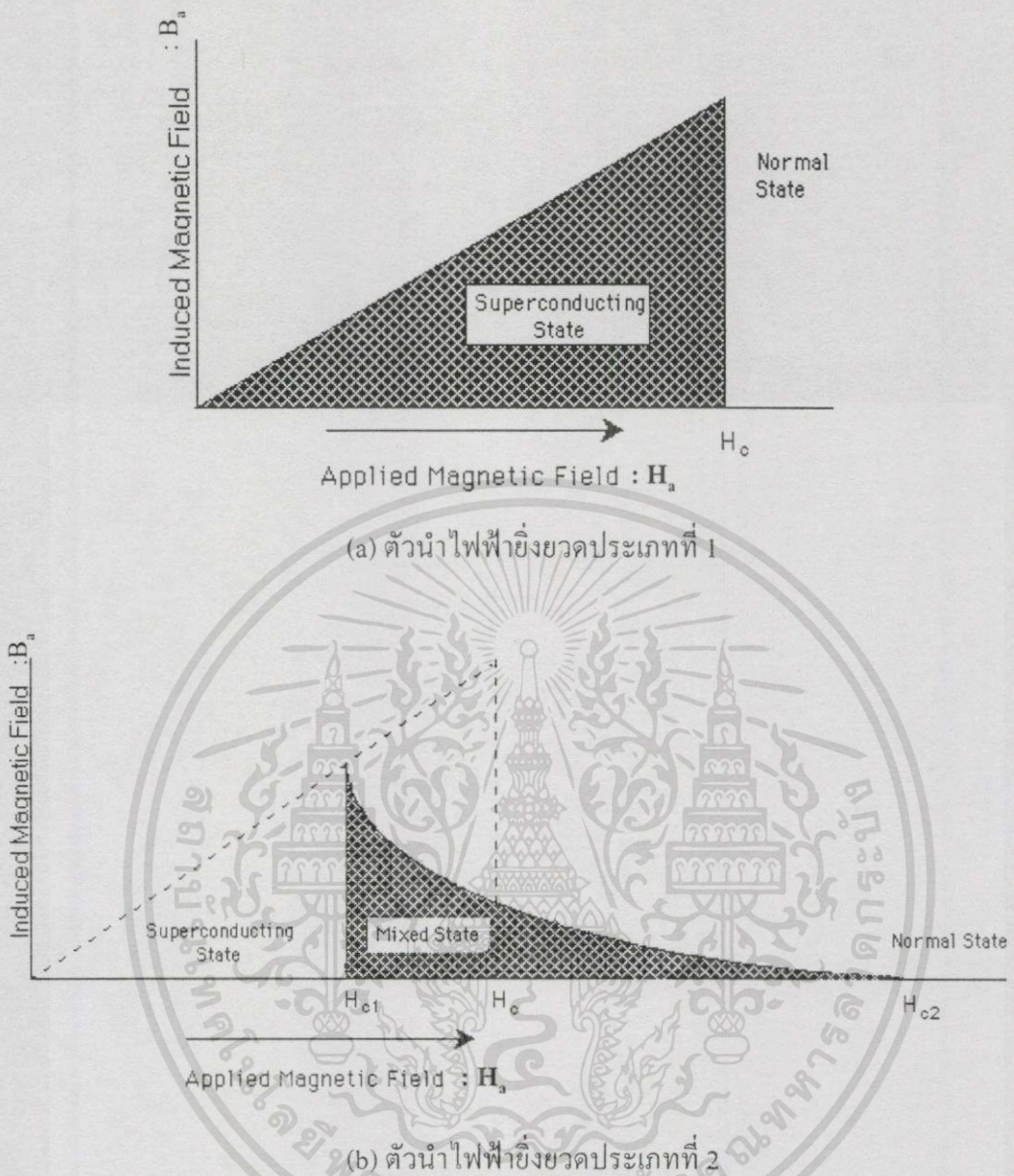
รูปที่ 1.14 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้าเชิงยาว [7]

จากรูปที่ 1.14 พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถซึมเข้าไปในวัสดุจากผิวเข้าไปเพียงความลึก  $\lambda$  ผิววัสดุที่มีความลึกมากกว่าค่าความลึก  $\lambda$  นี้จะมีค่าสนามแม่เหล็กเกือบเป็นศูนย์ ค่า  $\lambda$  นี้เรียกว่า ค่าความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็ก (Penetration Depth) ขนาดของค่าความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็กขึ้นกับชนิดของวัสดุ แต่ก็มีค่าโดยทั่วไปประมาณ 10-100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของวัสดุตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวที่ใช้งานกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวเป็นศูนย์ และวัสดุนั้นก็เป็นแม่เหล็กได้ออย่างสมบูรณ์

ต่อมา นาย A. B. Pippard ได้ทดลองทำการลดระยะเฉลี่ยปลดออกการชน (Mean Free Path) ของอิเล็กตรอน [7] โดยการเพิ่มปริมาณสารเจือปนในตัวนำไฟฟ้าเชิงยาว เขาค้นพบว่าไม่สามารถทำให้คุณสมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการเติมสารเจือปนในวัสดุตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวสามารถลดค่าระยะเฉลี่ยปลดออกการชนของอิเล็กตรอนได้ ทำให้ค่าความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็กลดลง ส่วนในกรณีของโลหะบริสุทธิ์ จะมีเพียงการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนเท่านั้น

#### 1.4 ตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวประเภทที่ 1 และ 2 [1]

ตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวมีทั้งประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าต่ำและที่มีค่าสูง ประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าต่ำมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก ส่วนประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าสูงมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงไม่มาก ดังนั้น ถ้ามองด้านความแข็งแรงวัสดุอาจแบ่งออกเป็นตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวแบบอ่อนและตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวแบบแข็ง แต่ในปัจจุบันประเภทของตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวมักแบ่งตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กเป็น 2 ประเภท และมีชื่อเรียกว่าตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวประเภทที่ 1 และตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวประเภทที่ 2 (เทียบได้กับประเภทอ่อนและประเภทแข็งตามลำดับ) เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกให้กับตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวแล้วตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวจะมีลักษณะการเกิดของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้าเชิงยาวทั้งสองประเภทดังในรูปที่ 1.15



รูปที่ 1.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก และ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [1] (a) ประเภทที่ 1 (b) ประเภทที่ 2

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารเจือปนและวิธีการขึ้นรูป กราฟการเป็นแม่เหล็กจะมีรูปเป็นฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) การเพิ่มสารเจือปนหรือวิธีการขึ้นรูปอาจทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กลายเป็นประเภทที่ 2 ได้ และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในอุดมคติที่กล่าวถึงส่วนมากมักหมายถึงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สำหรับปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก็คือ ค่าความยาวความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็กและความยาวโคฮีเรนซ์

จากการพิจารณาในรูปที่ 1.15 โดยการป้อนความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ วัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วความหนาแน่นของฟลักซ์เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้ คือ

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ครอบคลุมที่ค่าสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่ป้อน ให้ยังมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตของวัสดุนั้น จะทำให้เนื้อวัสดุไม่มีส่วนที่เป็นตัวนำปกติเลย วัสดุจึงแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ และความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กภายในวัสดุมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้า ป้อนค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต วัสดุก็จะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า ปกติ และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีค่าเท่ากับ  $\mu_0 H_0$

ถ้าวัสดุนั้นเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 แล้วทำการป้อนค่าสนามแม่เหล็กจากภายนอกเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง (Lower Critical Field :  $H_{c1}$ ) แต่ยังมีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน (Upper Critical Field :  $H_{c2}$ ) นั่นคือ  $H_{c1} < H_0 < H_{c2}$  ดังนั้นจึงทำให้เนื้อภายในวัสดุมีทั้งตัวนำไฟฟ้าปกติและตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดผสมกันอยู่ และเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกมากกว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบนแล้ว ปริมาตรของตัวนำไฟฟ้าปกติก็จะเพิ่มขึ้นและวัสดุจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าปกติทั้งหมด

### 1.5 การประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [9-10]

ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าทฤษฎีแบบใหม่มาอธิบายการเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ อุณหภูมิสูงของสารประกอบประเภทออกไซด์ เนื่องจากทฤษฎีเก่าที่เคยใช้อธิบายนั้นไม่สามารถที่จะ อธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ แต่สิ่งที่สำคัญที่ทำให้บุคคลหลายฝ่ายสนใจจริง ๆ ก็คือ การประยุกต์ ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งอาจจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับการค้นพบทรานซิสเตอร์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำเมื่อสามสิบปีก่อน ในการนำตัวนำไฟฟ้า ยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานสามารถแบ่งได้ตามแนวทางการใช้งาน 2 แนวทาง คือ

#### 1.5.1 การประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ขนาดใหญ่ (Large Scale Application)

โดยมากจะเอาสมบัติของการนำไฟฟ้าในสภาพการนำยิ่งยวดที่ทนสนามแม่เหล็ก ได้สูงมาใช้ในเชิงแม่เหล็ก เช่นการทำ Superconducting Magnet สำหรับใช้ในการแพทย์ การวิจัย ด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์ และการวิจัยอื่น ๆ ที่ต้องการสนามแม่เหล็กความเข้มสูง ๆ

อุปกรณ์ในด้านนี้จะมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก มีการสูญเสียกำลังทางไฟฟ้าต่ำ เช่น นำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งโดยปกติแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผลิตสนามแม่เหล็กสูง ๆ ต้องใช้เงินเป็นจำนวนมากที่จะรักษาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กจำนวนขนาดนี้ได้ ยิ่งไปกว่านั้นสนามแม่เหล็ก ที่สร้างขึ้นนี้ต้องการระบบหล่อเย็นซึ่งใช้เป็นพัน ๆ แกลลอนต่อนาที เพื่อป้องกันการหลอมละลาย ของขดลวด เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจากผลของการมีความต้านทานไฟฟ้าในขดลวด ถ้าใช้แม่เหล็ก ที่พันด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต เมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้า

ไหลในขดลวดได้แล้วครั้งหนึ่ง จะทำให้กระแสไหลตลอดเวลาโดยไม่มีการสูญเสียในความต้านทานแน่นอนว่าไม่มีตัวนำไฟฟ้าใด ๆ ในทางปฏิบัติที่บริสุทธิ์จริง ๆ ดังนั้นจึงเกิดมีการสูญเสียพลังงานบ้าง แต่เราต้องการใช้กำลังเพียงเล็กน้อยที่จะรักษาสนามแม่เหล็กของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไว้เช่นเดิมได้ ในการสร้างขดลวดสำหรับแม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น สารที่ใช้กันมากได้แก่  $Nb_3Sn$  ซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงถึง 88 กิโลเกาส์ และ  $V_3Ga$  ได้สนามแม่เหล็กสูงขึ้นไปถึง 500 กิโลเกาส์

### 1.5.2 การประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ขนาดเล็ก (Small Scale Application)

การประยุกต์ใช้งานในด้านนี้ต้องการกระแสไหลน้อยกว่าและมีคุณสมบัติที่พิเศษมากกว่า ส่วนมากใช้งานอิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยปรากฏการณ์โจเซฟสัน เช่น อุปกรณ์ตัวตรวจจับต่าง ๆ ระบบอนาล็อก ดิจิตอล ตัวมิชร์กระแส ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิสูงสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวและมีค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดสูงมากซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิมิถกษณะแข็ง แดงง่าย เช่นเดียวกับทองแดงและอลูมิเนียมหรือโลหะอื่น ๆ จึงไม่สามารถที่จะสร้างเป็นเส้นหรือสายเทปได้ ดังนั้นจึงต้องมีความพยายามสร้างเป็นเส้นลวดหรือสร้างเป็นแผ่นฟิล์ม

การอธิบายถึงหลักการทำงานของการนำไปประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์ขนาดเล็กๆ เหล่านี้มันทำได้ยาก เพราะมีการทำงานที่กว้างมากแต่จะเน้นการใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใช้งานทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ ต่าง ๆ ที่ทำจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีขนาดเล็กลงมาก ทำงานด้วยความเร็วสูงขึ้น มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการใช้งาน เช่นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำงานเป็นสวิทช์ปิด-เปิด โดยใช้สภาพแม่เหล็ก ตามหลักการของรอยต่อโจเซฟสันสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงๆ เป็นล้านล้านเฮิร์ต ซึ่งเร็วกว่าทรานซิสเตอร์หรือไอซีที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ (มีความเร็วในการทำงานเป็นพันล้านล้านเฮิร์ต) การนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาทำเป็นแผ่นฟิล์มบางเพื่อทำเป็นสายไฟ สายเคเบิลต้องการให้นำกระแสได้เป็นจำนวนมาก ไม่เกิดการสูญเสียพลังงาน เช่น เครื่องวัดสนามแม่เหล็กภายในโลก เพื่อหาแหล่งแร่หรือน้ำมัน เครื่องมือสแกนเนอร์ที่ใช้วัดการทำงานของคลื่นสมองที่มีความซับซ้อนแม่เหล็กต่ำมาก ๆ ได้ อุปกรณ์สื่อสารในอวกาศ เป็นต้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 บทนำ

จากการค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity) ในปี ค.ศ. 1911 โดยนาย Heike Kamerlingh Onnes[1] พบว่าปรอทมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่ออุณหภูมิลดจนถึง อุณหภูมิจุดวิกฤต สารที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะผลึกสนามแม่เหล็ก (สนามแม่เหล็กภายในเป็นศูนย์) จากการค้นพบดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่ทำให้นักฟิสิกส์พยายามที่จะหาทฤษฎีมาอธิบาย เนื่องจากไม่สามารถใช้ทฤษฎีธรรมดาที่ใช้กับโลหะของนาย Drude มาอธิบายได้ นาย London จึงเป็นคนแรกที่สร้างทฤษฎีขึ้นมาอธิบาย ในปี 1934 เรียกว่า London Theory [1] ซึ่งอธิบายว่า กระแสที่ไหลนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มหนึ่งเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีความต้านทาน อีกกลุ่มหนึ่งเป็นพวกซูเปอร์ฟลูอิดหรือ Super Fluid แต่ทฤษฎีนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับ ทั้งนี้ เพราะไม่ใช่เป็นทฤษฎีทางจุลภาค (Microscopic Theory) เป็นเพียงทฤษฎีทางมหภาค (Macroscopic Theory) ซึ่งถือเป็นทฤษฎียุคเก่า (Classical Theory) ต่อมาในปี 1950 ก็มีนาย Ginzburg และ นาย Landau ได้เสนอทฤษฎีที่มีชื่อเสียงมาก โดยใช้ทฤษฎีควอนตัมยุคเก่าแต่ก็ยังไม่ถือว่าเป็นทฤษฎีควอนตัมทางจุลภาค (Microscopic Quantum Theory) ในทางฟิสิกส์จะมีทฤษฎีอยู่ 2 อย่างในการ อธิบาย คือ ทฤษฎีทางมหภาคและทฤษฎีทางจุลภาค ถ้าอยากดูคุณสมบัติต่าง ๆ ของสสารจากระดับ พื้นฐานก็ต้องเริ่มจากสมการของชโรดิงเจอร์ (Schrodinger) ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานนำไปสู่การ อธิบายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ต้นเหตุของการเกิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดน่าจะมาจากการสั่นของ โครงผลึกหรือโฟนอน (Phonon) ซึ่งจุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของ การที่เกิดความคิดทฤษฎีที่จะนำไปสู่ สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ต้องมีเรื่องของโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นหลักการของ Bardeen จน กระทั่ง นาย Cooper ซึ่งเป็นนักฟิสิกส์ได้สร้าง Cooper Pair ขึ้นมาโดยกล่าวว่า Cooper Pair เกิด จากการจับคู่ของอิเล็กตรอนที่มีสปินและโมเมนตัมตรงข้ามกัน โดยจะรวมกันเป็น Bound และ Bonson ทำให้เกิด Bose-Einstein Condensation หลังจากนาย Cooper ได้ตีพิมพ์ผลงาน ต่อมาในปี 1957 นาย Bardeen กับ นาย Schrieffer ได้นำมาทำเป็นทฤษฎีที่สมบูรณ์กลายเป็นทฤษฎีที่มีชื่อเสียง ขึ้นมาเรียกว่าทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory) ดังนั้นทฤษฎีนี้จึงเป็นทฤษฎีที่สมบูรณ์ที่สุดของสภาพ การนำไฟฟ้ายิ่งยวดในระดับทฤษฎีทางจุลภาคซึ่งทฤษฎีนี้เริ่มต้นจากสมการ ชโรดิงเจอร์ จากนั้น เป็นต้นมาทฤษฎีของบีซีเอสสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกือบทุกอย่าง ได้ แต่ก็ไม่สามารถบอกถึงกลไกของการมาจับคู่กันของอิเล็กตรอน เพียงแต่บอกว่าสมมุติว่า อิเล็กตรอนจับคู่กันแล้วเกิดอะไรขึ้น トラบใดที่เรายังไม่สามารถอธิบายทฤษฎีทางจุลภาคได้ รู้ว่า อิเล็กตรอน 2 ตัวจับคู่กันได้อย่างไร แล้วทฤษฎีต่าง ๆ ก็เป็นเพียงทฤษฎีทางมหภาคยุคเก่า อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามทฤษฎีบีซีเอสสามารถให้ความเข้าใจมูลฐานของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่วไปได้ ในปี 1960 นาย Ivar Giaever ได้ค้นพบการทะลุผ่านของ Quasi Particle จากแผ่นฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็น โลหะ-ฉนวน-ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (NIS) และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด-ฉนวน-ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (SIS) ในการค้นพบการทะลุผ่านนี้ทำให้สามารถใช้วัดหาค่าช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) ความหนาแน่นของแถบพลังงาน (Density of State) และ Phonon Spectra ได้ ในปี ค.ศ. 1962 นาย B. D. Josephson นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้ค้นพบทฤษฎีของปรากฏการณ์โจเซฟสันและได้เสนอ Quantum Tunneling Effect ที่เกิดขึ้นเมื่อกระแส Cooper Pair ทะลุผ่านชั้นบาง ๆ ( $\sim 10 \text{ \AA}$ ) ของฉนวนที่อยู่ระหว่างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และในปี ค.ศ. 1973 เขาก็ได้รับรางวัลโนเบล ปรากฏการณ์โจเซฟสันเป็นคุณสมบัติที่น่าสนใจอย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในการเกิดปรากฏการณ์นี้อาศัยปรากฏการณ์ทะลุผ่าน (Tunneling Effect) เป็นพื้นฐานในการเกิด เมื่อเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันจะเกิดกระแสตรงซูเปอร์โหลจำนวนหนึ่ง ซึ่งกระแสตรงซูเปอร์โหลนี้จะไหลผ่านผนังกันระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคลิงก์ ซึ่งคุณสมบัติวิคลิงก์ (Weak Link) นี้เป็นคุณสมบัติพิเศษอย่างมากในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยกระแสตรงซูเปอร์โหลนี้เคลื่อนที่เร็วมากและมีพลังงานจลน์มาก ดังนั้นในการศึกษาถึงพฤติกรรมของวิคลิงก์ เราต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านจุดเชื่อมต่อและแรงดันที่ตกคร่อมจุดเชื่อมต่อในส่วนการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โจเซฟสันและวิคลิงก์ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นสำคัญที่สุด มีความเป็นไปได้ในการนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และความเร็วในการสวิตซ์สูง ซึ่งทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีหน่วยความจำและวงจรลอจิกจำนวนมาก

## 2.1 ปรากฏการณ์โจเซฟสัน (Josephson Effect) [9-13]

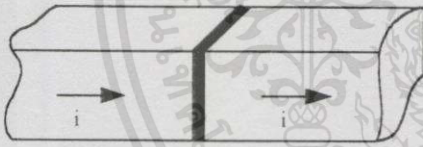
ในการศึกษาเรื่องการทะลุผ่านระหว่างโลหะ-โลหะนั้นจะต้องมีฉนวนหรือผนังกันบางๆ ซึ่งต้องมีความบางน้อยกว่า  $10^{-7}$  เมตร อิเล็กตรอนนำธรรมชาติจึงสามารถทะลุผ่านข้ามฉนวนไปได้เพราะโดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านฉนวนนี้ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานน้อยกว่าที่จะข้ามกำแพงศักย์ไปได้ แต่ถ้าฉนวนนั้นบางมาก ๆ อิเล็กตรอนก็สามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์ไปได้ ปรากฏการณ์ทะลุผ่านนี้เป็นปรากฏการณ์เชิงกลทางควอนตัม (Quantum Mechanical Phenomenon) [9] จากการศึกษาการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนเดี่ยว ๆ นี้เป็นการศึกษาการทะลุผ่านแผ่นฟิล์มโลหะสองแผ่นซึ่งมีผนังกันออกไซด์กันอยู่ ซึ่งผนังกันนี้มีอยู่หลายชนิดที่ใช้ในการศึกษา ส่วนมากแล้วในการทะลุผ่านในแต่ละด้านของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีการ Overlap กัน แต่ในความเป็นจริง ๆ แล้วผนังกันออกไซด์จะต้องเกิดการ Overlap กันขึ้นอยู่แล้ว ผลจากการเกิด Overlap นี้จะเกิดปรากฏการณ์ใหม่ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์โจเซฟสัน (Josephson Effect) ทำให้เกิดมีกระแสตรงซูเปอร์โหลผ่านแผ่นผนังกันและผนังกันนี้มีพฤติกรรมเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคลิงก์ [12] ยิ่งไปกว่านั้นถ้าเกิดมีแรงดันตกคร่อมแล้วจะมี Phase Slip เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

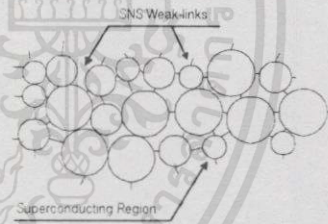
ระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองด้าน และ Phase Slip สามารถชิงครอนส์กับสนามไฟฟ้าแบบสลับที่กระทำกับรอยต่อแบบวิคลิงค์นี้

ผนังกันระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคลิงค์นี้ไม่ได้มีเฉพาะแต่ผนังกันที่สร้างจากออกไซด์เท่านั้น [5] โดยหลักของปรากฏการณ์โจเซฟสันแล้วสามารถเกิดปรากฏการณ์ได้จากกรณีที่มีการเชื่อมต่อ (Coupling) อย่างแข็งแรงเพียงพอสำหรับเฟสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในแต่ละด้านและอีกกรณีเกิดจากการเชื่อมต่อซึ่งอาจจะมีลักษณะหลวม ๆ เพียงพอสำหรับสนามคลื่นไฟฟ้ากระทำได้ในลักษณะวิคลิงค์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้สามารถแบ่งได้ตามชนิดต่าง ๆ ดังนี้ คือ

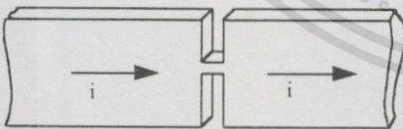
1. ผนังกันออกไซด์ระหว่างแผ่นฟิล์มที่ผ่านการ Evaporate ซึ่งในกระบวนการสร้างความบางให้เพียงพอสำหรับการให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านนั้นสร้างได้ยากมาก
2. รอยต่อโจเซฟสันระหว่างขอบเขตของเกรน (Intergrain Josephson Junction) หรือ SNS Weak Link ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก
3. แผ่นฟิล์มหรือ Bulk ที่มีลักษณะรูปแบบเป็น Constriction หรือ Microbridge
4. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะ Bulk 2 ชั้นที่มีการเชื่อมกันแบบ Point Contact ลักษณะของผิวจะเกิดการออกซิไดส์และลักษณะของ Point เกิดจากอัดของชั้นบัลค์ ส่วนมากแล้ว Point Contact จะต้องสร้างใน Cryostat ที่สามารถกำหนดความดันได้



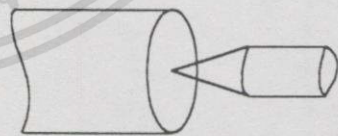
(a) รอยต่อทะลุผ่านแบบ โจเซฟสัน



(b) รอยต่อทะลุระหว่างขอบเขตของเกรน



(c) รอยต่อแบบ Constriction



(d) รอยต่อแบบ Point-Contact

รูปที่ 2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวิคลิงค์ (Weakly - Linked Superconductor) [5]

ในวิคลิงค์รูปแบบต่าง ๆ เหล่านี้จะมีพฤติกรรมแตกต่างกันในรายละเอียด แต่ทุกรูปแบบก็สามารถเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันได้ ในพฤติกรรมที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของการเชื่อมต่อ โดยรอยต่อมีลักษณะแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากวิคลิงค์รูปแบบออกไซด์ รูปแบบที่เกิดจากขอบเขตของเกรน (Intergrain) Constriction และ Point Contact ตามลำดับ รวมทั้งมีพารามิเตอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในรูปแบบวิคลิงค์ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต่าง ๆ เหล่านี้ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับทางวงจรไฟฟ้ามีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก

โดยหลักการของการเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยุคนี้ จะเกิด Overlap ของฟังก์ชันคลื่นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองด้าน โดยมีคู่อิเล็กตรอนเป็นพาหะนำกระแส ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางควอนตัม เราจึงใช้ฟังก์ชันคลื่นทางควอนตัมระดับมหภาค (Macroscopic Quantum State) อธิบายถึงสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ฟังก์ชันคลื่นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสองตัวระหว่างส่วนที่เป็นผนังกันระหว่างกันจะเกิดการ Overlap และมีกระแสตรงซูปเปอร์ไหลผ่านผนังกันนั้นได้ ดังนั้นในการศึกษาถึงปรากฏการณ์โจเซฟสันสามารถทำให้เข้าใจถึงสภาพการเปลี่ยนแปลง (Transition) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือการจัดเรียงตัวของสปินในสารแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnet) ที่จุคคูรีได้เป็นอย่างดี [12]

เนื่องจากในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นส่วนมากมีพื้นฐานมาจากรอยต่อโจเซฟสัน (Josephson Junction) และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดลักษณะวิคลิงค์ก็เป็นรอยต่อโจเซฟสันชนิดหนึ่งซึ่งสามารถนำมาสร้างได้สะดวกและง่าย ดังนั้นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะวิคลิงค์นี้จึงเป็นที่สนใจต่อการศึกษาค้นคว้าไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ของหน่วยความจำและอุปกรณ์ทางคอมพิวเตอร์อื่น ๆ อีกมากมาย

### 2.3 สมการพื้นฐานของปรากฏการณ์โจเซฟสัน [3, 12, 13]

กำหนดให้ฟังก์ชันคลื่นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในแต่ละด้านของผนังกันเป็น  $\psi_1$  และ  $\psi_2$  และคู่อิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีพลังงานเดียวกัน รวมทั้งมีการเชื่อมต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบที่ 1 และ 2 ดังนั้นสมการของการเคลื่อนที่ของฟังก์ชันคลื่นแต่ละตัวจะเป็น

$$i\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = U_1 \psi_1 + K \psi_2 \quad (2.1)$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = U_2 \psi_2 + K \psi_1 \quad (2.2)$$

กำหนดให้  $U$  = พลังงานของคู่อิเล็กตรอน

$K$  = ลักษณะของการเชื่อมต่อ

จากสมการของการเคลื่อนที่ของฟังก์ชันคลื่นแต่ละตัว ถ้าค่า  $K = 0$  แล้วตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละตัวจะมีค่าพลังงานเป็นสถานะพลังงานต่ำสุด แต่ถ้าค่า  $K \neq 0$  แล้วจะแทนสมการของ

การเคลื่อนที่ของฟังก์ชันคลื่นแต่ละตัวด้วยสมการ  $\psi = \sqrt{n} e^{i\theta}$  ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละตัวจะมีสมการต่อไปนี้ [13] คือ

$$\psi_1 = \sqrt{n_1} e^{i\theta_1} \quad (2.3)$$

$$\psi_2 = \sqrt{n_2} e^{i\theta_2} \quad (2.4)$$

กำหนดให้  $n_1, n_2$  = ความหนาแน่นของคู่อิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่ 1 และ 2

$\theta_1, \theta_2$  = เฟสของฟังก์ชันคลื่นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบที่ 1 และ 2

นำสมการที่ 2.3 และ 2.4 ไปแทนในสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ เราจะได้

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = \frac{2K}{\hbar} \sqrt{n_1 n_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) = \frac{2K}{\hbar} \sqrt{n_1 n_2} \sin \delta \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = -\frac{2K}{\hbar} \sqrt{n_1 n_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) = -\frac{2K}{\hbar} \sqrt{n_1 n_2} \sin \delta \quad (2.6)$$

และ

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = -\frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{n_2}{n_1}} \cos \delta - \frac{U_1}{\hbar} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = -\frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{n_2}{n_1}} \cos \delta - \frac{U_2}{\hbar} \quad (2.8)$$

กำหนดให้  $\delta = \theta_2 - \theta_1$ , จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 แสดงให้เห็นว่า

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -\frac{\partial n_2}{\partial t} \quad (2.9)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้านหนึ่งมีการสูญเสียประจุในอัตราเดียวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีกด้านหนึ่งที่มีการสะสมประจุ แต่อย่างไรก็ตามในขณะที่มีการสูญเสียประจุนั้น จะเกิดการชดเชยจากแหล่งกำเนิด Active (Voltage or Current Source) ดังนั้นเราจึงเขียนสมการการไหลของกระแสที่ผ่านจากด้าน 1 ไปยังด้าน 2 ดังนี้

$$I = I_c \sin \delta \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } I_c = \frac{2K}{\hbar} \sqrt{n_1 n_2} = \text{ค่ากระแสวิกฤต}$$

จากสมการที่ 2.10 สามารถบอกได้ว่า ถ้า  $\delta \neq 0$  แล้วจะมีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านชั้นฉนวนได้โดยไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ ดังนั้นชั้นฉนวนจึงมีพฤติกรรมเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สำหรับค่า  $I_c$  คือ ค่ากระแสวิกฤตจะขึ้นอยู่กับลักษณะการเชื่อมต่อของรอยต่อ ค่าความหนาแน่นของคู่อิเล็กตรอนในแต่ละด้านและอุณหภูมิ สำหรับการอธิบายถึงโมเดลของปรากฏการณ์โจเซฟสันนี้จะใช้ฟังก์ชันคลื่นในระดับมหภาค โดยกล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างที่ทฤษฎีทางจุลภาคได้มองข้ามไป ยิ่งไปกว่านั้นในสมการที่ 2.10 ใช้แสดงถึงการเชื่อมต่ออย่างหลวม ๆ ระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ซึ่งในสมการของคลื่นในสมการที่ 2.1 และ 2.2 แสดงถึงการเชื่อมต่ออย่างง่าย ๆ เช่นเดียวกับความเป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันคลื่น ความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมการเหล่านี้ใช้อธิบายได้เพียงพอสำหรับรอยต่อที่มีผนังกันเป็นออกไซด์ แต่จะไม่สามารถใช้อธิบายกับการเชื่อมต่อที่แข็งแกร่งกว่า ดังนั้นในกรณีทั่วไปที่เราสามารถใช้อธิบายได้ คือ สมการนี้  $I = I_c f(\theta)$  โดยที่  $f$  คือ Periodic ที่มีคาบเป็น  $2\pi$  แต่ถึงกระนั้นสมการที่ 2.10 ก็เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปในการทำ ความเข้าใจถึงในระบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะเป็นวงรี [3]

#### 2.4 ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสตรง (DC Josephson Effect) [3, 12]

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 คู่อิเล็กตรอนจะมีสมการการเปลี่ยนแปลงของเฟสเมื่อเทียบกับเวลาดังนี้

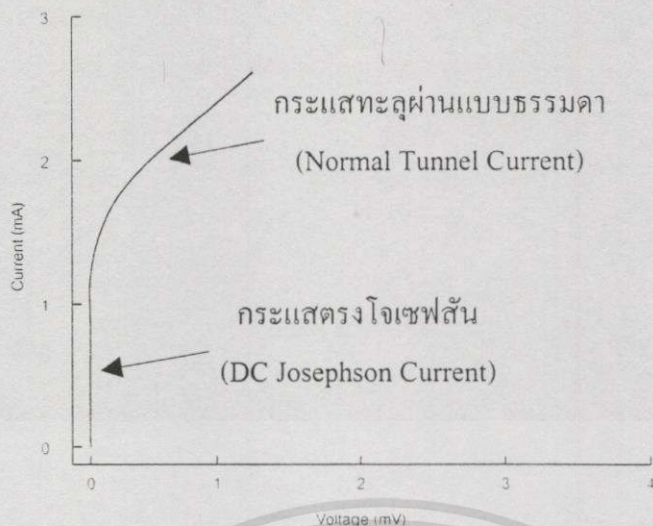
$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{2eV}{\hbar} \quad (2.11)$$

กำหนดให้  $V = \frac{U_2 - U_1}{2e}$  = ค่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ

และเมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.11 ขณะที่อุณหภูมิคงที่ จะได้

$$\delta(t) = \delta_0 + \frac{2e}{\hbar} \int V(t) dt \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.10 และ 2.12 พบว่ามีกระแสตรงไหลผ่านรอยต่อได้ในขณะที่ไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ ซึ่งค่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $+I_0$  และ  $-I_0$  โดยค่ากระแสขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างเฟสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มต้น ( $\delta_0$ ) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การเกิดในลักษณะนี้เรียกว่าปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสตรง ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อวงรีหรือรอยต่อโจเซฟสันดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวีคลิงค์[3]

ในกรณีที่มีกระแสตรงไหลผ่านรอยต่อได้ในขณะที่ไม่มีแรงดันตกคร่อมนั้น ซึ่งถ้าให้กระแส ( $I$ ) ไหลน้อยกว่ากระแสวิกฤต ( $I_0$ ) แล้วจะทำให้เฉพาะเฟสเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงเกิดกระแสตรงไหลได้โดยไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ เมื่อให้กระแสเพิ่มขึ้นมากกว่าค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) จะเกิดมีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ ซึ่งจากกราฟกระแสกับแรงดันในรูปที่ 2.2 เป็นลักษณะของกระแสที่เกิดจากการทะลุผ่านแบบธรรมดา (Normal Tunnel Current) สำหรับในช่วงของกระแสที่ไหลเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าแรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์นั้นเป็นลักษณะของการไหลของกระแสตรงโจเซฟสัน (DC Josephson Current)

## 2.5 ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับ (AC Josephson Effect) [3, 10, 13]

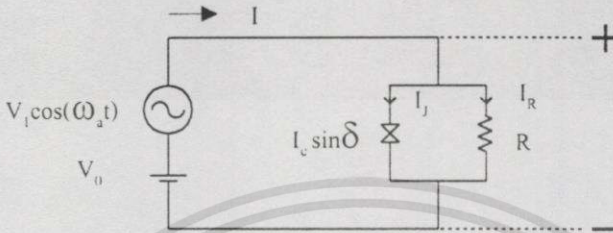
สมการพื้นฐานของโจเซฟสันทั้งสองสมการ คือ สมการที่ 2.10 และ 2.11 ขณะที่เกิดกระแสตรงซูปเปอร์ไหลมากที่สุด แรงดันตกคร่อมรอยต่อมีค่าเป็นศูนย์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสตรง แต่ถ้าเราพิจารณาโดยมีการให้แรงดันไบอัสกระแสตรง ( $V_0$ ) กระทำกับรอยต่อ ดังนั้นสมการที่ 2.10 ในเทอมซายน์จะเปลี่ยนเป็น

$$I = I_c \sin\left(\delta_0 + \frac{2eV_0}{\hbar} t\right) \quad (2.13)$$

นั่นคือ เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่งกับรอยต่อจะทำให้เกิดกระแสสลับไหลผ่านรอยต่อ โดยที่กระแสสลับนี้มีค่าเท่ากับ  $2eV_0 / \hbar$  เรียกความถี่นี้ว่าความถี่โจเซฟสัน ( $\omega_J$ )

เรียกปรากฏการณ์ในการให้กระแสสลับนี้ว่า ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับ (AC Josephson Effect)

ถ้าเราให้แรงดันไบอัสกระแสสลับ ( $V_1$ ) ร่วมกับแรงดันไบอัสกระแสตรง ( $V_0$ ) กับรอยต่อโจเซฟสัน ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 โดยแรงดันไบอัสกระแสสลับขับเคลื่อนที่เพิ่มเข้าไปนี้ มีความถี่กระแสสลับ ( $\omega_a$ ) ที่มีค่าสูง ๆ



รูปที่ 2.3 วงจรที่มีการให้ไบอัสด้วยแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับกับรอยต่อโจเซฟสัน [3]

ดังนั้น ในรอยต่อโจเซฟสันนี้จะมีแรงดันไบอัสทั้งหมด คือ

$$V = V_0 + V_1 \cos(\omega_a t) \tag{2.14}$$

จากสมการที่ 2.12 เราจะได้

$$\begin{aligned} \delta(t) &= \delta(0) + \frac{2e}{\hbar} \int (V_0 + V_1 \cos \omega_a t) dt \\ \delta(t) &= \delta(0) + \omega_J t + \frac{2eV_1}{\omega_a \hbar} \sin(\omega_a t) \end{aligned} \tag{2.15}$$

กำหนดให้  $\omega_J = \frac{2eV_0}{\hbar}$  = ความถี่ของโจเซฟสัน (Josephson Frequency)

จากวงจรในรูปที่ 2.3 ในรอยต่อโจเซฟสันจะเสมือนมีตัวต้านทาน ( $R$ ) ต่อขนานกับรอยต่อ ซึ่งเมื่อให้แรงดันไบอัสกระแสตรงค่าหนึ่งร่วมกับแรงดันไบอัสกระแสสลับทำการขับเคลื่อนให้กับรอยต่อนี้ กระแสที่ไหลผ่านเฉพาะตัวต้านทาน ( $I_R$ ) คือ

$$I_R(t) = \frac{V_0}{R} + \frac{V_1}{R} \cos \omega_a t \tag{2.16}$$

กำหนดให้กระแสประกอบด้วยกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ( $I_R$ ) และกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อโจเซฟสัน ( $I_J$ ) ดังนั้น

$$I(t) = I_R + I_J \quad (2.17)$$

ดังนั้น

$$I(t) = \frac{V_0}{R} + \frac{V_1}{R} \cos \omega_a t + I_c \sin \left[ \delta(0) + \frac{2eV_0}{\hbar} t + \frac{2eV_1}{\hbar \omega_a} \sin \omega_a t \right] \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 จะเกิดกระแสที่มีความถี่โจเซฟสัน ซึ่งเป็นความถี่ที่มีค่าคงที่ และค่ากระแสที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับเฟสตามค่าเทอมชายน์ ในสมการ ดังนั้นความถี่ของกระแสที่เกิดขึ้นจะไม่ตอบสนองต่อความถี่ของแรงดันที่ให้กับรอยต่อ ซึ่งทำให้เกิดมีความแตกต่างระหว่างค่าความถี่ขึ้นในรอยต่อ ดังนั้นทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเฟสไม่เป็นเชิงเส้นและรอยต่อสามารถมีความถี่แตกต่างกันด้วยการขับเคลื่อนด้วยแรงดันที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน ดังนั้นเพื่อความเข้าใจมากขึ้น เราจึงทำสมการ 2.18 ในเทอมอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) ซึ่งในอนุกรมของ Fourier - Bessel กล่าวไว้ว่า

$$e^{ib \sin x} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [J_n(b)] e^{inx} \quad (2.19)$$

กำหนดให้  $J_n$  คือ อันดับที่  $n$  ของฟังก์ชัน Bessel และในเทอมชายน์ของสมการ 2.18 สามารถเขียนได้ใหม่ด้วยเทอมของ  $(a + b \sin x)$  ดังนี้

$$\sin(a + b \sin x) = \text{Im} \{ e^{i(a + b \sin x)} \} \quad (2.20)$$

และอนุกรมของ Fourier-Bessel กำหนดได้ว่า

$$J_{-n}(b) = (-1)^n J_n(b) \quad (2.21)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$e^{i(a + b \sin x)} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(b) e^{i(a + nx)} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n J_n(b) e^{i(a - nx)} \quad (2.22)$$

ดังนั้นในส่วน Imaginary ของสมการ 2.22 จะได้

$$\sin(a + b \sin x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n J_n(b) \sin(a - nx) \quad (2.23)$$

ดังนั้นกระแสจากสมการที่ 2.18 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$I = I_R + I_c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n J_n \left( \frac{2eV_1}{\hbar\omega_a} \right) \sin \left[ \left( \frac{2eV_0}{\hbar} - n\omega_a \right) t + \delta(0) \right] \quad (2.24)$$

$$I = I_R + I_c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n J_n \left( \frac{2eV_1}{\hbar\omega_a} \right) \sin \left[ (\omega_J - n\omega_a) t + \delta(0) \right] \quad (2.25)$$

เนื่องจากอนุกรมของค่ากระแสในสมการที่ 2.25 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อย่างไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างกระแสกับเฟส และกระแสตรงที่เกิดขึ้นในรอยต่อนั้นเกิดจากกระแสตรงเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวต้านทาน และกระแสตรงโจเซฟสัน ซึ่งค่ากระแสตรงที่ไหลผ่านตัวต้านทาน จะมีค่าเท่ากับ  $V_0/R$  ส่วนกระแสตรงโจเซฟสันที่ไหลผ่านรอยต่อจะมีค่ากระแสตรงโจเซฟสันเมื่อเทอมซายน์เป็นศูนย์ ( $\omega_J - n\omega_a = 0$ ) นั่นคือ การไบอัสด้วยแรงดันกระแสสลับสามารถตอบสนองของกระแสตรงที่เกิดจากเทอมของซายน์ ในสมการ 2.25 ทำให้ได้ค่า  $\omega_J = 2eV_0/\hbar = n\omega_a$

ดังนั้นลักษณะสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันจะมีทั้งเส้นตรงที่เกิดจากตัวต้านทาน และ Step ของกระแสที่เกิดจากรอยต่อโจเซฟสันแสดงได้ในรูปที่ 2.4 ซึ่งพบว่าลักษณะ Step ของกระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าแรงดันดังนี้

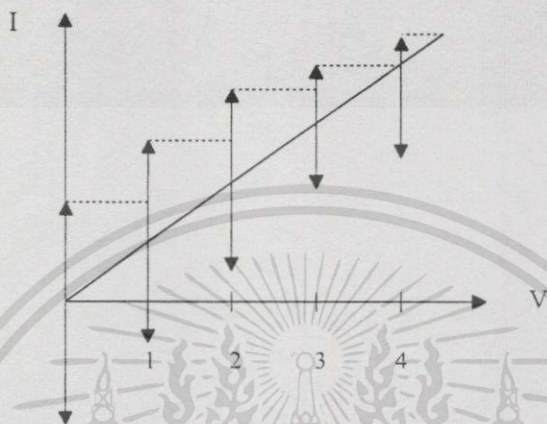
$$V_n = \frac{\hbar n \omega_a}{2e} \quad (2.26)$$

ตำแหน่ง Step ของกระแสสามารถอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าผลต่างเฟสเริ่มต้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากผลการทดลองส่วนมากแล้วอุปกรณ์แหล่งจ่ายจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของรอยต่อโจเซฟสันตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังนั้นแหล่งกำเนิดที่มีการขับแรงดันกับรอยต่อโจเซฟสันนี้จะเป็แหล่งกำเนิดชนิดแหล่งกำเนิดกระแส (Current Source) มากกว่าแหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) ยกตัวอย่างเช่นแหล่งกำเนิดกระแสจะประกอบด้วยเทอมของกระแสตรงและกระแสสลับที่ใช้ในการขับวงจรดังนี้

$$I(t) = I_R + I_c \sin \omega_a t \quad (2.27)$$

ลักษณะของกราฟกระแสกับแรงดันที่เกิดทั้งกระแสตรงและกระแสสลับที่เกิดจากการใช้แรงดันกระแสตรงขับรอยต่อนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นในรูปที่ 2.4 เราคาดหวังว่าเมื่อเพิ่มกระแสขับด้วยค่าที่เริ่มจากศูนย์ แล้วค่าแรงดันที่เกิดขึ้นในรอยต่อจะยังคงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และเมื่อเพิ่มกระแสขับเคลื่อนไปเรื่อย ๆ จนเกินค่าความสูงของ Step ของกระแสขณะแรงดันเป็นศูนย์ตามรูปที่ 2.4 แล้วจะเกิดค่าแรงดันโดยมีความชันเป็นค่าตัวต้านทานจนกว่าค่าแรงดันจะถึง

ค่า Step ของกระแสถัดไป จุดที่กระแสเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งของ Step นี้แรงดันยังคงที่อย่างสัมพันธ์กัน ลักษณะของกระแสที่เพิ่มตามแรงดันในลักษณะนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างในการทดลองและจากการคำนวณที่ได้จากการให้แหล่งกำเนิดกระแสที่ทำการขับเคลื่อนด้วยแรงดันไบอัสกระแสตรงกับกระแสสลับ โดยแรงดันในรอยต่อโจเซฟสันจะมีค่าตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ตามสมการ 2.26



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่มีการขับเคลื่อนด้วยกระแสตรงจากวงจรรภายนอก [3]

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านเฉพาะรอยต่อจะมีค่า

$$I = I_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n J_n \left( \frac{2eV_I}{\hbar\omega_a} \right) \sin \left[ \left( \frac{2eV_0}{\hbar} - n\omega_a \right) t + \delta_0 \right] \tag{2.28}$$

ลักษณะที่สำคัญที่สุดของสมการนี้คือ มีกระแสตรงซูเปอร์ (DC Super Current) เมื่อ

$$2eV_0 = n\hbar\omega_a \tag{2.29}$$

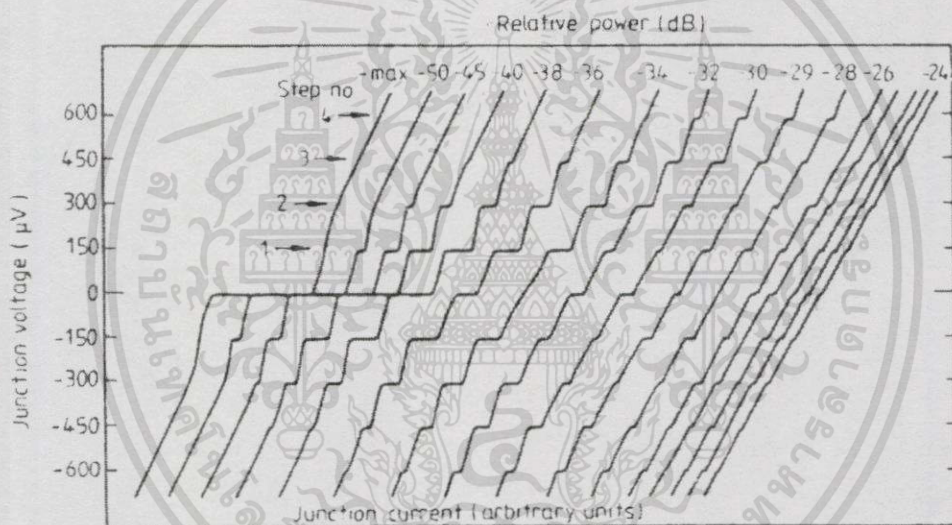
โดยมีแอมพลิจูดของกระแสเป็น

$$I_n = (-1)^n I_c J_n \left( \frac{2eV_I}{\hbar\omega_a} \right) \sin(\delta_0) \tag{2.30}$$

จากสมการที่ 2.29 เป็นข้อกำหนดในการเกิดกระแสตรงซูเปอร์ ซึ่งหมายถึงว่า ถ้า  $n = 1$  เป็นการเกิดทะลุผ่านโดยมีการดูดกลืนอนุภาคโฟตอน 1 ตัว ส่วนค่า  $n$  เป็นการเกิดการทะลุผ่านโดยมีการดูดกลืนอนุภาคโฟตอน  $n$  ตัว พร้อมกับการเกิด Step ของกระแสตรงซูเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการให้คลื่นไมโครเวฟกับรอยต่อโจเซฟสันแล้วจะมีการเกิด Step ของแรงดันคงที่ (Constant Voltage Step) ขึ้น ซึ่งนาย Shapiro เป็นผู้ค้นพบในปี 1963 Step ของแรงดันคงที่ด้วยคลื่นไมโครเวฟได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 กระแสมีการออสซิลเลตโดยจะมีค่าแอมพลิจูดของกระแสเป็นไปตามฟังก์ชันของความเข้มคลื่นไมโครเวฟและขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ Bessel ยกตัวอย่างเช่น ขณะที่กำลังของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจะทำให้ตำแหน่งของ Step ตัวที่ 2 ( $n = 2$ ) จะสูงขึ้นจากศูนย์ไปยังค่าสูงสุดแล้วจึงลดลงเป็นอย่างนี้ต่อไปเรื่อยๆ โดยปกติพบว่าในเชิงปริมาณที่ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ Bessel ดีพอสมควร สำหรับรอยต่อ Point-Contact ยกเว้นแต่ Step ที่มีแรงดันเป็นศูนย์ (Zero-Voltage Step) จะมีค่าสูงพร้อมกับกำลังงานที่เกิดมีค่าต่ำ ซึ่งเหตุผลที่ใช้อธิบายช่วงที่มีค่าสูงนี้ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน แต่ก็มีกรขยายความออกไปโดย นาย Grimes และนาย Shapiro ในปี 1968 พร้อมกับทฤษฎีคราะห์โดย Zimmerman ในปี 1970 [3]



รูปที่ 2.5 การเกิด Step ของแรงดันเมื่อมีการให้คลื่นไมโครเวฟกับรอยต่อโจเซฟสัน โดย Step มีค่าคงที่ [3]

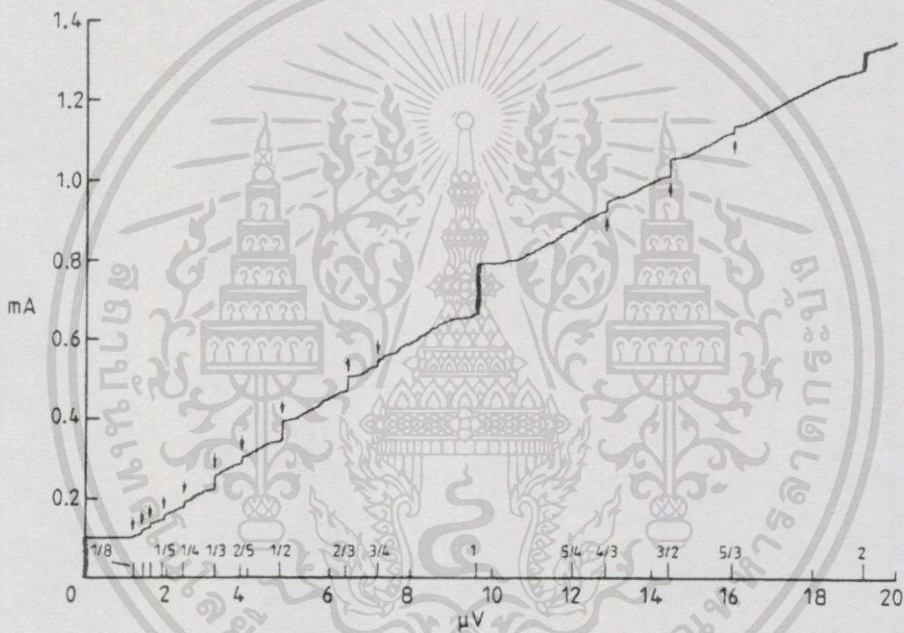
ในรอยต่อชนิดไมโครบริดจ์ เราจะมีกระแสที่มีลักษณะเป็นคาบกับค่าของเฟสตามสมการของ  $I_c(\theta)$  แม้ว่าจะมีความแตกต่างระหว่าง  $f(\theta)$  และคลื่นไซน์ปกติแต่ไม่มีความสำคัญอะไร เราจะพิจารณาถึงสิ่งที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับเท่านั้น เราจะกระจายสมการของ  $F(\theta)$  เป็นผลรวม Fourier ของคลื่นไซน์ ซึ่งเป็นสมการสำหรับกระแสที่เราจะนำไปวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่เงื่อนไขการเกิดซิงโครนัส

$$f(\theta) = \sum_{n'} A_{n'} \sin n' \theta \tag{2.31}$$

จากสมการที่ 2.29 แทนในสมการที่ 2.28 แล้วเพิ่มผลรวมตลอด  $n'$  ดังนั้น เงื่อนไขในการเกิดซิงโคโนสจะกลายเป็น

$$2eV = \frac{n}{n'} \hbar \omega_a \quad (2.32)$$

ผลการทดลองสำหรับปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับของไมโครบริดจ์ที่ถูกขับเคลื่อนแสดงได้ในรูปที่ 2.6 เป็นอนุกรมของซับฮาร์โมนิก (Subharmonic Series) ที่มี  $n = 1$  โดย  $n'$  มี 6 ค่า ( $n' = 1, 2, 3, 4, 5$  และ 6) และในการเกิดตำแหน่งของ Step นั้นจะเกิดตามตำแหน่ง  $n$  และ  $n'$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กันด้วยตัวเลขง่าย ๆ จากความเป็น Unity



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับของรอยต่อโจเซฟสันในรูปแบบ Microbridge เมื่อให้คลื่นไมโครเวฟกระทำกับรอยต่อ [3]

ผลของปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับนี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการใช้งาน ซึ่งเมื่อมีการจ่ายสนามไมโครเวฟจากภายนอกให้กับรอยต่อ สิ่งที่ได้สำคัญที่สุด คือ การวัดค่าคงที่มูลฐาน ของ  $h/e$  ซึ่งวัดได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งเราพบว่าสนามไมโครเวฟมีค่าความถี่กระแสสลับ ( $\omega_a$ ) สามารถเหนี่ยวนำกับรอยต่อทำให้เกิด Step ขึ้น โดย Step ตัวแรก ( $n = 1$ ) อยู่ที่ตำแหน่งแรงดันตามความสัมพันธ์ดังนี้  $V/\omega = \hbar/2e$  นั่นคือ ผลของโจเซฟสันที่วัดได้จาก  $h/e$  มีค่าเทียบเท่ากับค่ามาตรฐานแรงดันที่อยู่ในเทอมมาตรฐานความถี่

ดังนั้น เมื่อให้คลื่นไมโครเวฟกับรอยต่อแล้วจะเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับขึ้นอย่างไรก็ตามในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะวิคลิงค์ทุกรูปแบบจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมากโดยอยู่ในระดับ 1 โอห์มหรือน้อยกว่ามาก ซึ่งในวงจรไฟฟ้าภายนอกจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก

## 2.6 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรงกับความดัน (DC Current-Voltage Characteristics) [3,13]

เพื่อกำหนดพฤติกรรมของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะแบบวิคลิงค์ให้มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับวงจรทางไฟฟ้า ดังนั้น จึงจำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านลิงค์และแรงดันที่ตกคร่อมลิงค์

จากสมการของปรากฏการณ์โจเซฟสัน

$$I = I_0 \sin \delta \quad (2.33)$$

และ

$$\frac{d\delta}{dt} = 2eV / \hbar \quad (2.34)$$

ดังนั้น

$$V_{\text{link}} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\delta}{dt} = \Phi_0 \frac{d\delta}{dt} \quad (2.35)$$

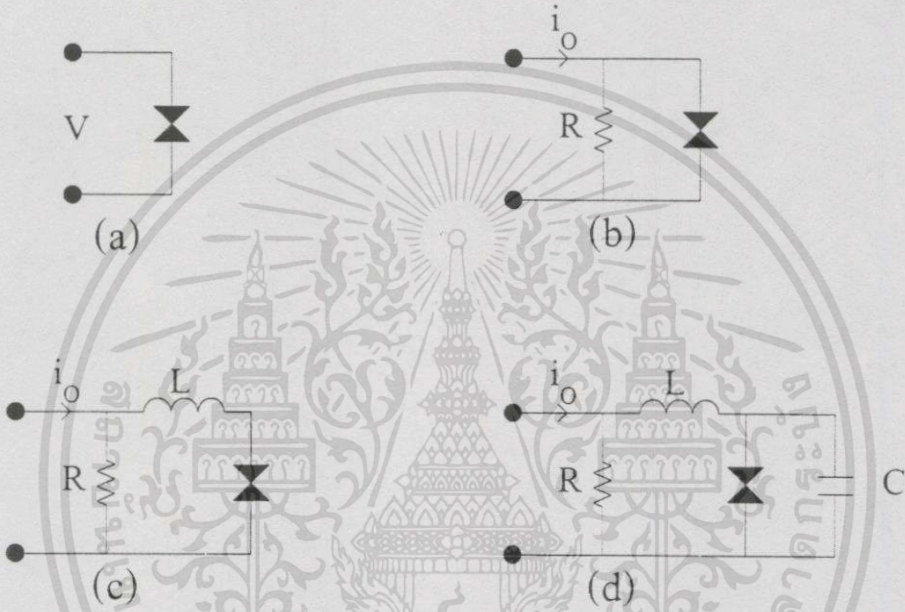
$$\Phi_0 = \frac{\hbar}{2e} = \text{Flux Quantum} \quad (2.36)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมลิงค์กับการเปลี่ยนแปลงของผลต่างเฟสเมื่อเทียบกับเวลานั้นจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่เกิดเนื่องมาจากพฤติกรรมของกระแสซูเปอร์ไหลผ่านลิงค์ที่มีลักษณะเป็นคู่อิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวิคลิงค์นี้มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับปรากฏการณ์โจเซฟสันทำให้สามารถใช้สมการของปรากฏการณ์โจเซฟสันอธิบายได้

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะเป็นวิคลิงค์นี้มีหลายชนิด ซึ่งทุกชนิดจะมีลักษณะสมบัติของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรงกับความดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดลักษณะเดียวกันหมด ดังในรูปที่ 2.2 เมื่อให้กระแสไหลผ่านโดยยังไม่เกินค่ากระแสวิกฤต จะไม่มีแรงดันตกคร่อมลิงค์ แต่เมื่อให้กระแสไหลผ่านลิงค์ที่มากกว่ากระแสวิกฤตมีการเกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นระหว่างลิงค์ และเมื่อเพิ่มกระแสมากขึ้นเรื่อย ๆ จะได้กราฟกระแสกับแรงดันเป็นเส้นตรง โดยความชันของเส้นกราฟ

คือ ความต้านทานปกติของวัสดุ (Normal Resistance) ในรอยต่อชนิดทะลุผ่านกราฟกระแสกับแรงดันจะมีฮิสเตอร์รีซิสและกระแสวิกฤตลดลงในขณะที่ลดกระแสย้อนกลับ ส่วนวิคลิงค์ในรูปแบบที่เหลือก็สามารถให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดังในรูปที่ 2.2

เมื่อทำการเพิ่มกระแสกับรอยต่อโจเซฟสันแล้วกระแสไหลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่ากระแสและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรอยต่อโจเซฟสันต่างก็ขึ้นอยู่กับเวลา ทำให้มีการพิจารณาถึงสภาพการนำไฟฟ้าของวิคลิงค์สามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับวงจรทางไฟฟ้าทั่วไป ดังนั้นตัวนำไฟฟ้ายังขาดแบบวิคลิงค์ในรูปแบบชนิดต่างๆ สามารถมีวงจรเสมือนทางไฟฟ้าในแต่ละชนิดดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรเสมือนของตัวนำไฟฟ้ายังขาดรูปแบบวิคลิงค์แต่ละชนิด [9]

- (a) Pure Weak Link
- (b) SNS Weak Link
- (c) Point Contact และ Constriction
- (d) Tunneling Junction

จากรูปที่ 2.7(a) เป็นวงจรเสมือนของตัวนำไฟฟ้ายังขาดแบบวิคลิงค์ที่มีกระแสตรงซูปเปอร์ไหลอย่างเดียวนั้น ซึ่งเป็นการไหลของคู่อิเล็กตรอน โดยไหลตามสมการทั้งสองดังนี้

$$I = I(\delta) \tag{2.37}$$

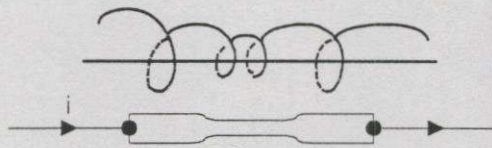
$$V = \Phi_0 \frac{d\delta}{dt} \tag{2.38}$$

เนื่องจากกระแสที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะวิคลิงค์นั้นจะเป็นกระแสที่มีความสัมพันธ์ตามปรากฏการณ์โจเซฟสัน ดังนั้นกระแสที่ไหลในวงจรเสมือนไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคลิงค์นี้ จะมีความสัมพันธ์ตามสมการ คือ  $I = I_c \sin \delta$

ส่วนสำหรับรูปที่ 2.7(b) เป็นวงจรเสมือนในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในรูปแบบวิคลิงค์ชนิด SNS (SNS Weak Link) ซึ่งในวงจรเสมือนในรูปแบบนี้จะคล้ายกับวงจรเสมือนในรูปแบบวิคลิงค์ในรูป 2.7(a) เพียงแต่เพิ่มตัวต้านทาน (R) ต่อขนานกับวิคลิงค์เข้าไปในวงจรเสมือนในรูปที่ 2.7 (a) ตัวต้านทานนี้เปรียบเสมือนค่าสภาพต้านทานของวัสดุแต่ละชนิดที่เกิดมาจากอิเล็กตรอนปกติ ส่วนวงจรเสมือนของรูปแบบ Point Contact และ Constriction ได้ดังในรูปที่ 2.7(c) ซึ่งจะเพิ่มตัวขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance) ต่ออนุกรมกับวงจรเสมือนของวิคลิงค์ ส่วนในรูปแบบทะลุผ่านจะมีวงจรเสมือนทางไฟฟ้า โดยเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าแบบชัณฑ์ (Shunt Capacitance) เข้าไปในวงจร ซึ่งค่านี้เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงแทนตัวเก็บประจุต่อขนานกับวงจรวิคลิงค์ ดังแสดงในวงจรเสมือนรูปที่ 2.7(d) สำหรับการพิจารณาทางวงจรไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะเป็นวิคลิงค์นี้จริง ๆ อาจจะไม่นำทั้งค่าเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุมาคิดก็ได้ ดังนั้นวงจรเสมือนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดลักษณะวิคลิงค์ในรูปแบบทั่ว ๆ ไปที่ครอบคลุมทุกรูปแบบนี้จะมีวงจรเสมือนดังรูปที่ 2.7 (d)

เนื่องจากวงจรเสมือนทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิคลิงค์ในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้สามารถอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบได้ ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจะได้ค่าของกระแสวิกฤต ความต้านทาน ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากพลวัตกรรมของวิคลิงค์ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกันกับวงจรทางไฟฟ้าทั่วไป

ในวงจรเสมือนทางไฟฟ้าของรอยต่อโจเซฟสันจากรูปที่ 2.7(a) เมื่อเกิดแรงดันตกคร่อมรอยต่อขึ้นนั้น กระแสตรงซุเปอร์ที่ไหลผ่านรอยต่อนั้นจะเกิดการออสซิลเลชัน เช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำเข้าไปในวงจรเสมือนของวิคลิงค์ชนิดบริดจ์ (Bridge) จะทำให้เกิดการออสซิลเลชันชนิด Relaxation ขึ้นดังในรูปที่ 2.8 เมื่อเกิดการออสซิลเลชันจะทำให้ความหนาแน่นของคู่อิเล็กตรอนลดลงและเกิดลูปของ Helix เช่นเดียวกับ Pinched off

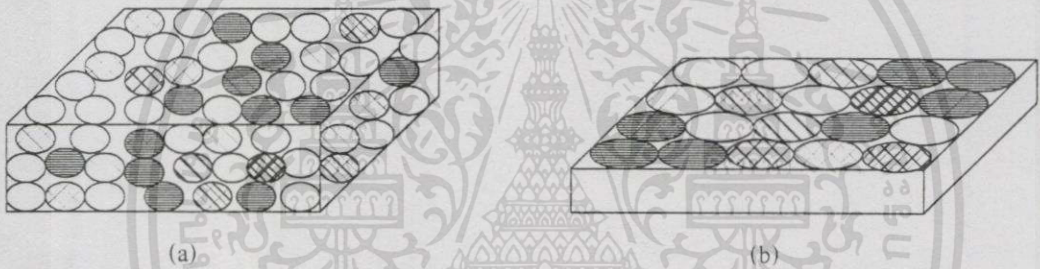


รูปที่ 2.8 ลักษณะการออสซิลเลชันของฟังก์ชันคลื่นในรอยต่อวิคลิงค์ชนิดบริดจ์ (Bridge) [3]

ในปรากฏการณ์โจเซฟสันที่เกิดขึ้นจากลักษณะวิคลิงค์อีกรูปแบบหนึ่ง คือ รอยต่อโจเซฟสันที่เกิดจากขอบเขตของเกรนหรือรอยต่อโจเซฟสันระหว่างเกรนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง (Intergrain Josephson Junction) [11] รอยต่อโจเซฟสันชนิดนี้สามารถแสดงพฤติกรรมของปรากฏการณ์โจเซฟสันได้เช่นเดียวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีรูปแบบวิคลิงค์อื่นๆ

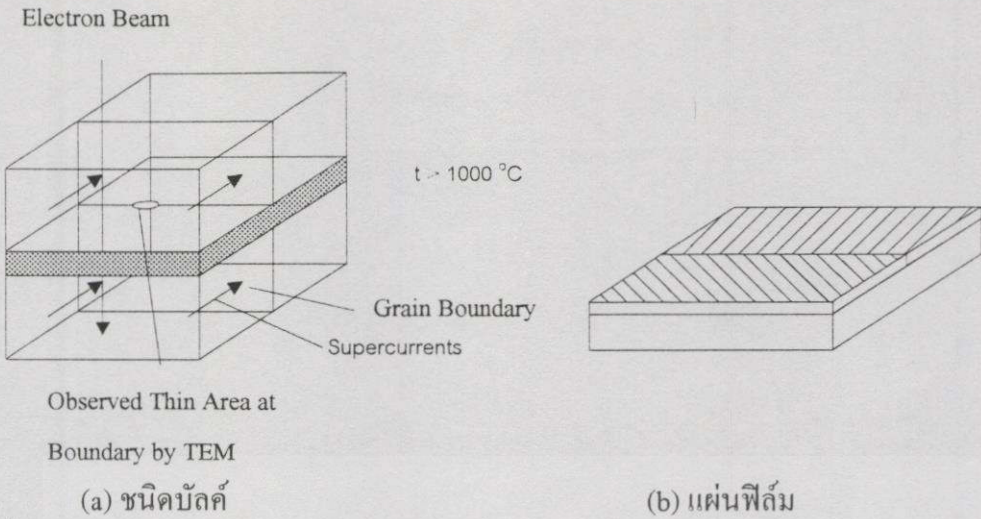
## 2.7 ขอบเขตของเกรนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง (High $T_c$ Superconducting Grain Boundaries) [11]

ในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงในชนิดต่าง ๆ จะมีขอบเขตของเกรนแตกต่างกันดังในรูปที่ 2.9 วัสดุเซรามิกรูปแบบบัลค์จะมีโครงสร้างของเกรนที่เม็ดเกรนไม่เรียงตัวไปทางเดียวกันเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับเม็ดเกรนในวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มที่เม็ดเกรนมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าและมีช่องว่างระหว่างเกรนน้อยกว่ามาก



รูปที่ 2.9 ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดเกรนในโครงสร้างจุลภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก ออกไซด์อุณหภูมิสูง (a) Bulk (b) Thin Film (แนวเส้นแทนระนาบ  $ab$  วงกลมแทนเม็ดเกรนในวัสดุและพื้นที่ว่างเป็นพื้นผิวของระนาบ  $ab$ ) [13]

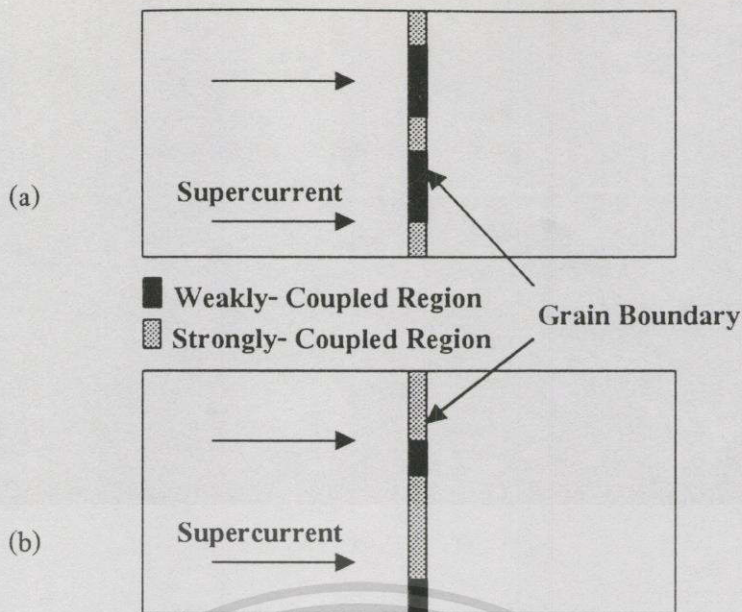
ถ้าขอบเขตของเกรนในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงมีการเรียงตัวไม่ไปในทางเดียวกันเป็นจำนวนมาก จะทำให้การนำไฟฟ้าลดต่ำลง (Poor Conductivity) จากรูปที่ 2.9 ลักษณะของเส้นในวงกลมแทนระนาบ  $ab$  ส่วนวงกลมแทนเกรนในวัสดุและพื้นที่ว่างเป็นพื้นผิวของระนาบ  $ab$  ซึ่งในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกนี้ประกอบด้วยเกรนที่เรียงตัวอย่างสุ่ม ในกระบวนการสร้างมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการเรียงตัวของเกรน โดยในแผ่นฟิล์มจะมีการเรียงตัวของเกรนได้ดีกว่าในวัสดุแบบบัลค์ดังในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการเรียงตัวของเกรนและขอบเขตของเกรนในวัสดุที่มีเป็นบัลค์และแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 2.10 ขอบเขตของเกรนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

เส้นทางของการนำไฟฟ้า (Conduction Path) จะมีการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อมีเกรนเรียงตัวผิดปกติมาก ถึงแม้ว่าวัสดุนั้นจะเป็นชนิดโครงสร้างผลึกเดี่ยว คุณสมบัติการนำกระแสและความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ดีนั้นมีผลมาจากการเรียงตัวของเกรนในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบนี้เป็นอย่างมาก

ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อ (Coupling Strength) ถูกกำหนดจากสภาพรอยต่อมากกว่าการเรียงตัวของขอบเขตของเกรน ชั้นสารที่เป็นแผ่นฟิล์มจะมีลักษณะของโครงสร้างที่มีโครงสร้างผลึกที่มีค่าโคฮีเรนต์สูงและขอบเขตของเกรนที่มีพลังงานน้อย (Low Energy Grain Boundaries) จะมีการเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรงและเส้นฟลักซ์แม่เหล็กสามารถทะลุผ่านได้ยาก ซึ่งมุมของขอบเขตของเกรนมีมุมสูงจะทำให้เป็นลักษณะการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรง ส่วนในการเกิดลักษณะของการเชื่อมต่ออย่างหลวม ๆ นั้นจะเกิดจากการที่ขอบเขตของเกรนมีมุมต่ำ (Low Angle Grain Boundaries) อีกทั้งค่าความหนาแน่นของกระแสวิกฤตจะลดลงอย่างมากเมื่อขอบเขตของเกรนถูกฟลักซ์แม่เหล็กทะลุผ่าน ในส่วนของขอบเขตของเกรนที่มีลักษณะของการจับตัวของเกรนอย่างหลวม ๆ และการจับตัวอย่างแข็งแรงนั้นแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งขอบเขตของเกรนเกิดจากความบกพร่องของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะเป็นข้อบกพร่องทางระนาบ (Planar Defect) ส่วนในแผ่นฟิล์มนั้นเกิดจากข้อบกพร่องที่มีลักษณะเส้น (Line Defect) และชั้นสารที่เป็นแผ่นฟิล์มมีการเรียงตัวของเกรนได้ดีกว่าเกรนในชั้นสารชนิดบิลต์ ซึ่งมีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตเคลื่อนที่ได้ดี สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสวิกฤตที่เคลื่อนที่กับขอบเขตของเกรนได้แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพโครงสร้างขอบเขตของเกรน [13]

(a) ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตต่ำ

(b) ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตสูง

จากรูปที่ 2.11 เป็นแผนภาพโครงสร้างขอบเขตของเกรนที่มีความหนาแน่นกระแสวิกฤต โดยการนำกระแสไฟฟ้าที่มีพฤติกรรมของวัสดุคั้นเป็นชิ้นสารชนิด Polycrystalline ที่ผ่านการชินเทอร์แล้วเกิดเฟสที่สอง (Second Phase) เคลือบที่พื้นที่ขอบเขตเกรนและเกิดการเรียงตัวที่ผิดปกติไปของเกรน ซึ่งในรอยต่อไอเซฟสันแบบวัสดุคั้นนี้โดยส่วนมากแล้วจะจับตัวกันลดลงเมื่อถูกสนามแม่เหล็กกระทำ และที่อุณหภูมิชินเทอร์สูง ๆ สามารถทำให้ส่วนที่จับตัวกันอย่างแข็งแรงสามารถมีการเกิดของเฟสของเหลว (Liquid Phase) ที่เกิดจากการชินเทอร์ ดังนั้นความสามารถในการนำกระแสจะขึ้นอยู่กับส่วนพื้นที่มีเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงในขณะที่มีค่าสนามสูง ๆ จากข้อมูลในการทดลองที่มีผู้ทดลองมาแล้วนั้นพบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตพร้อมกับให้ค่าสนามแม่เหล็กกระทำต่อวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO มีผลต่อการนำกระแสไฟฟ้าในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของการเชื่อมต่อกันของขอบเขตเกรนมีหลายชนิด โดยจะพิจารณาถึงการเรียงตัวของเม็ดเกรนร่วมกับโครงสร้างผลึกที่สำคัญอื่น ๆ อีกและคุณสมบัติของสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ผลึกโคฮีเรนต์ การเชื่อมต่อทางเชิงกล ปฏิกริยาทางเคมี อุณหภูมิวิกฤต และสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด เส้นทางที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเม็ดเกรนมีการเรียงตัวผิดปกติไป ไม่เป็นระเบียบถึงแม้ว่าวัสดุชิ้นนั้นมีโครงสร้างผลึกรูปเดียวกัน ดังนั้นวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีเม็ดเกรนเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบอย่างสูงจะทำให้สมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและการนำกระแสไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

## บทที่ 3

### การทดลอง

ในการศึกษาและวิจัยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำการศึกษาและประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ จากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) [14, 15] ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว อีกทั้งกระบวนการสร้างก็ไม่ซับซ้อนมากนัก สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อุณหภูมิในการเผาก็ไม่สูงมากนักและสารประกอบที่ใช้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อร่างกายในระหว่างกระบวนการสร้าง ทางห้องปฏิบัติการฯ ได้มีความพยายามที่จะหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบใหม่ขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเดิม โดยต้องการใช้กระบวนการสร้างเดิม เพื่อความสะดวกและง่ายต่องานวิจัย ดังนั้นจึงได้จึงได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบใหม่ คือ สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (GBCO) [16] ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในกลุ่มเดียวกันแต่ในการศึกษานี้ต้องหาเงื่อนไขในกระบวนการสร้างใหม่เพื่อปรับหากระบวนการสร้างที่เหมาะสมกับห้องปฏิบัติการและศึกษาถึงสมบัติต่างๆ ที่สำคัญ

#### 3.1 อุปกรณ์และวัสดุในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงครั้งนี้เราจะทำการศึกษาและวิจัยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ชนิด คือ YBCO และ GBCO ดังนั้น สารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมประกอบด้วยอิทเทียมออกไซด์ ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 % มวลโมเลกุล 225.81 แบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 % มวลโมเลกุล 197.35 คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 % มวลโมเลกุล 79.54 และแกดโดลีนียมออกไซด์ ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มวลโมเลกุล 362.517

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

นำสารเคมีในหัวข้อที่ 3.1.1 ได้แก่ อิทเทียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูง จากนั้นนำสารประกอบออกไซด์ทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 นำมาบดให้เข้ากันโดยสังเกตจากสีของผงสารต้องเป็นสีเดียวกัน

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการซินเทอ์ (Sintering)

ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO จะใช้ปฏิกิริยาของแข็ง ซึ่งต้องใช้การซินเทอ์ ดังนั้น ในกระบวนการสร้างนี้ต้องมีอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่สารพร้อมกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ อุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

#### 3.1.3.1 เตาเผา (Furnance)

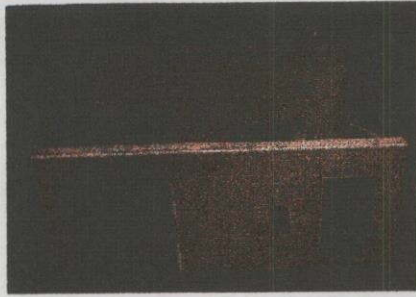
เป็นเตาเผาอุณหภูมิสูง (1050 องศาเซลเซียส) เตามีลักษณะเป็นทรงกระบอกประกอบด้วยท่อเซรามิกทนความร้อนพันด้วยขดลวดความร้อน เตาเผาแบบขดลวดใช้ไฟฟ้า 220 โวลต์ ไม่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงถึง 1050 องศาเซลเซียส

#### 3.1.3.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

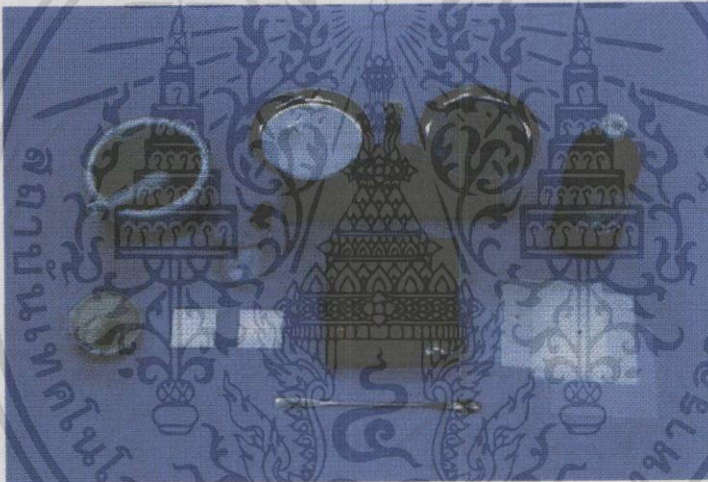
ใช้ชุดควบคุม Electronic Temperature Controller ซึ่งใช้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0-1000 องศาเซลเซียส เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาให้คงที่ ด้วยการส่งสัญญาณ ON-OFF จากตัวควบคุมไปยัง Electromagnetic Switch เพื่อทำการตัดต่อไฟเลี้ยงขดลวดความร้อนของเตาเผาทำให้เตาเผาที่มีความผิดพลาดของอุณหภูมิประมาณไม่เกิน  $\pm 20$  องศาเซลเซียส ชุดควบคุมอุณหภูมินี้ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผาความร้อนสูง 1050 องศาเซลเซียส

### 3.1.4 อุปกรณ์ในการเตรียมสาร

จากรูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการเตรียมสาร ได้แก่ เครื่องชั่งสองแขนและชุดประกอบอุปกรณ์ ครกบดสาร ถ้วยเผาทนความร้อน แผ่นอลูมินา ซ้อนดักสาร กระดาษพาราฟิน บีกเกอร์ หลอด Capillary และแอลกอฮอล์



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ต่างๆ ในการเตรียมสาร

### 3.1.5 อุปกรณ์ในการขึ้นรูปสาร

ในการอัดจะใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแรง 10 ตัน มีมิเตอร์เข็มความดันของค่าแรงอัดได้ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ดังในรูปที่ 3.4 ได้แก่ ชุดตัวเบ้าอัดที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับหัวอัดแรง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร เลื่อยเหล็กและฉลุ ชุดตะไบ ฟู่กัน ถูมือ และที่ปิดจมูกกันฝุ่น



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในชิ้นรูปสาร

### 3.1.6 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

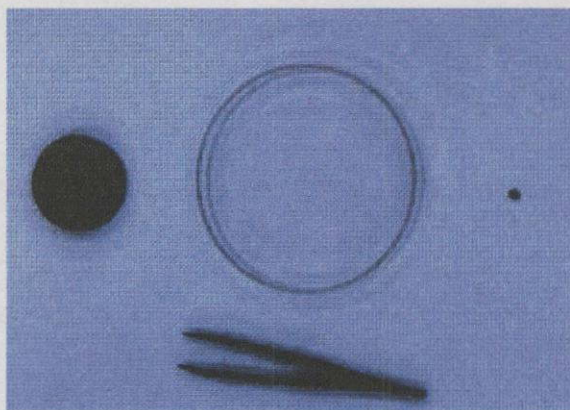
สำหรับชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบด้วย แหล่งกำเนิดกระแส Nano Voltmeter เครื่องบันทึก 2 แกน (X-Y Recorder) และ Probe วัดชั้นสารที่มีขั้ว 11 ขั้ว และคีมคีบสายไฟต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 3.5



รูปที่ 3.5 Probe วัดชั้นสารและอุปกรณ์การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

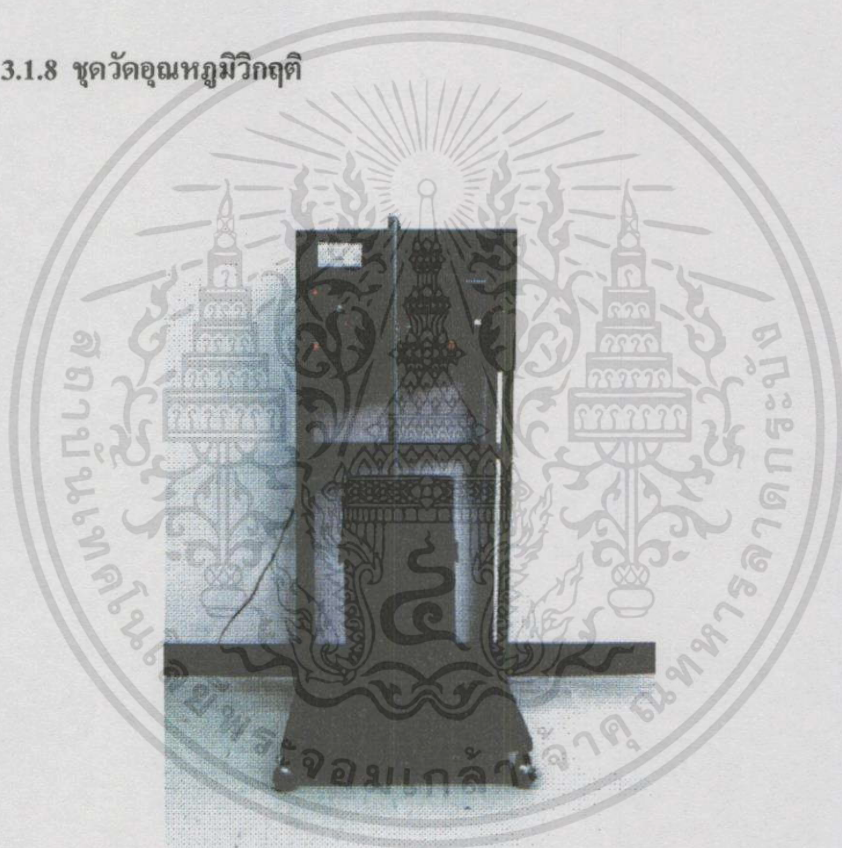
### 3.1.7 ชุดวัดปรากฏการณ์ไมสเนอร์

สำหรับชุดปรากฏการณ์ไมสเนอร์จะประกอบด้วย แม่เหล็กถาวรความเข้มสูง ชนิด Sm-Co คีมจับพลาสติก งานแก้วใส ไนโตรเจนเหลว และไม้บรรทัดพลาสติก รูปที่ 3.6 แสดงชุดวัดปรากฏการณ์ไมสเนอร์



รูปที่ 3.6 ชุดวัดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

### 3.1.8 ชุดวัดอุณหภูมิวิกฤติ



รูปที่ 3.7 ชุดวัดอุณหภูมิวิกฤติ

### 3.1.9 ชุดบัคกรีอัลตราโซนิก

ในการบัคกรีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทเซรามิกนี้ต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อให้รอยต่อเป็นโอห์มมิก ประกอบด้วย ตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำผสมอินเดียมและชุดบัคกรีอัลตราโซนิก ดังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชุดบดกรี้อัตราโซนิกและตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำผสมอินเดียม

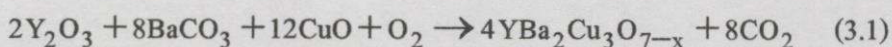
### 3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ [14]

กระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  สามารถเตรียมขึ้นได้จากสารประกอบอิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนตและคอปเปอร์ออกไซด์มาผสมกันให้มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก  $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu}$  เป็น  $1 : 2 : 3$  อัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองมาแล้วว่าให้คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป และสามารถสร้างเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ที่เกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 90 เคลวิน ซึ่งกระบวนการสร้างนี้เป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### 3.2.1 การคำนวณน้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลอง

ธาตุที่ใช้ในกระบวนการสร้าง คือ อิทเทรียม แบเรียม และทองแดงธาตุเหล่านี้มาจากสารประกอบ ดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ สารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% ปริมาณสารที่ใช้ในแต่ละครั้งของการสร้างจะขึ้นกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่สำคัญ คือ อิทเทรียม แบเรียม และทองแดง ถ้าต้องการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  เราต้องใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก  $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu}$  เป็น  $1 : 2 : 3$

ปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้



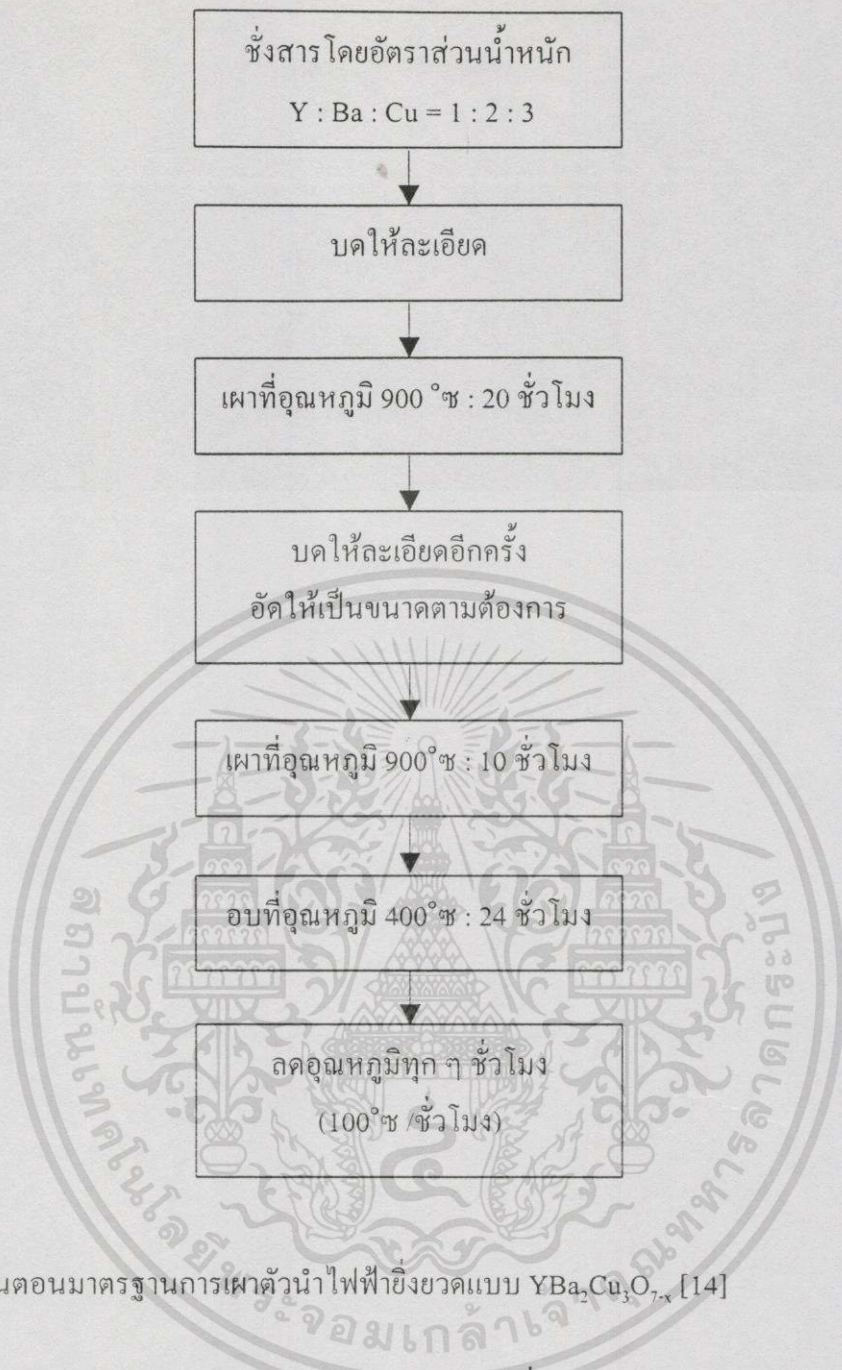
จากสมการ (3.1) พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารประกอบจากสมการจะได้  $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu}$  เป็น  $1 : 2 : 3$  มวลของอะตอมของธาตุต่าง ๆ คือ  $\text{Y} = 88.9$   $\text{Ba} = 137.34$   $\text{Cu} = 63.54$   $\text{C} = 12$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $O = 15.9$  สำหรับออกซิเจนจะไม่นำมาคิดในมวลโมเลกุลของสารตั้งต้น เพราะจะทำปฏิกิริยาการเผา เราจะได้ออกซิเจนจากอากาศอยู่แล้ว ดังนั้น มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งหมดเท่ากับ 745.15 กรัม ซึ่งหมายถึงว่าจะได้ผลิตภัณฑ์  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  745.15 กรัม ปริมาณ  $x$  หมายถึงปริมาณออกซิเจนที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายค่าตามแต่การเกิดปฏิกิริยาเคมีแต่เราไม่ต้องการ ดังนั้น ปริมาณ  $x$  ควรลดให้เป็นศูนย์ ( $x \rightarrow 0$ ) ซึ่งกระบวนการกำจัดออกซิเจนโดยใช้ความร้อนนี้เรียกว่า Calcination Process จากปฏิกิริยาเคมีมวลโมเลกุลสารตั้งต้นทั้งหมด 745.15 กรัม ถ้าต้องการ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  100 กรัม ต้องใช้อิทธิเทรียมออกไซด์ 15.13 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 52.88 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 31.98 กรัม [14]

### 3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

1. ชั่งสารประกอบ  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$  และ  $CuO$  โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก  $Y : Ba : Cu$  เป็น 1 : 2 : 3
2. บดสารประกอบทั้งสามชนิดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. ตักสารผสมใส่ถ้วยทนไฟ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่เผามาเขี่ยส่วนสีเขียวออก จากนั้นนำสารมาบดละเอียดและนำไปอัดด้วยแรง 1 ตัน ให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารใส่บนแผ่นกระเบื้อง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิจาก 900 องศาเซลเซียส เป็น 400 องศาเซลเซียส อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ลดอุณหภูมิทุก ๆ ชั่วโมง ด้วยอัตราชั่วโมงละ 100 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้อง
8. นำเม็ดสารที่ทดสอบคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ได้แก่ ปฏิกิริยาการนำไมส์เนอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันเมื่อไม่มีและมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำและอุณหภูมิวิกฤต



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนมาตรฐานการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  [14]

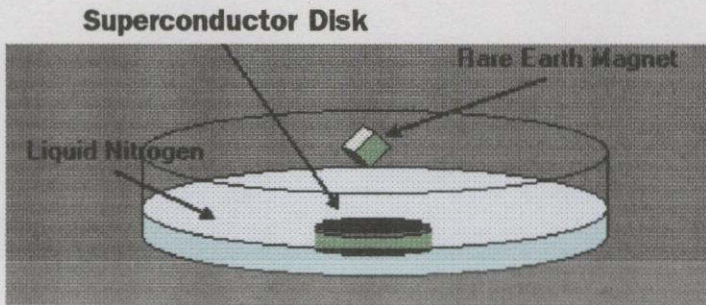
### 3.2.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว สารตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเผาตามรูปที่ 3.9 แล้วจะนำมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อแสดงว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่สมบูรณ์ ดังนี้

#### 3.2.3.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์

เป็นวิธีทดสอบพื้นฐานของการมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาแล้วไปลดอุณหภูมิในไนโตรเจนเหลว เมื่อเม็ดสารเกิดมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะ

แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังแสดง  
ในรูปที่ 3.10

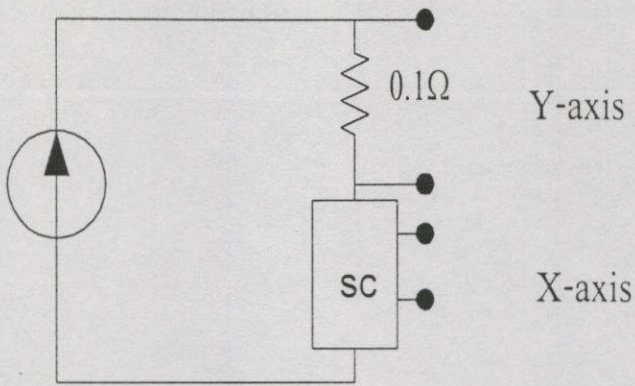


รูปที่ 3.10 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์

### 3.2.3.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

- เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

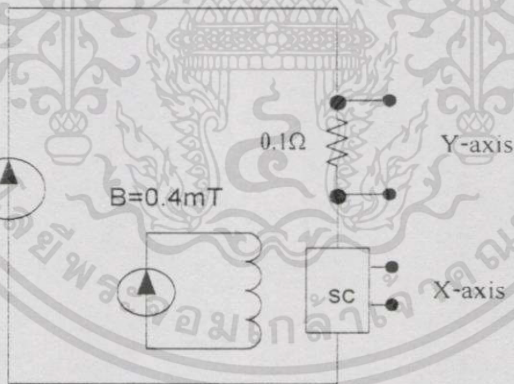
การทดสอบคุณสมบัตินี้เป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยมีวงจรดังรูปที่ 3.11 ซึ่งใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) แล้ววัดแรงดันตกคร่อมขั้วสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้อง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นค่าความต้านทานได้ ทำให้แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิห้องขั้วสารนั้นมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดา และเมื่อจุ่มขั้วสารลงในไนโตรเจนเหลว จะสังเกตเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจะตั้งขึ้นในแนวแกน Y ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีความต่างศักย์เกิดขึ้นเลย เมื่อไม่มีกระแสไหลผ่านความต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าไปอัสให้กับขั้วสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากการไหลของกระแสมีค่ามากขึ้น ถ้ากระแสไปอัสมีค่ามากกว่าค่ากระแสวิกฤตแล้วสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลาย เมื่อเพิ่มกระแสให้กับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้นแล้วเส้นกราฟจะค่อย ๆ เบนออกจากแกน Y แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากการเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดสภาพต้านทานไฟฟ้าขึ้น สำหรับกระแสไปอัสสูงสุดที่ป้อนให้กับขั้วสาร โดยที่ขั้วสารยังมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จะกำหนดให้เป็นค่ากระแสวิกฤต ซึ่งนำมาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของการนำกระแส จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต โดยที่ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของขั้วสารไม่ขึ้นกับรูปร่าง แต่ค่ากระแสวิกฤตจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 3.11 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

- เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กกระทำเป็นการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ซึ่งพบว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมนั้นจะมีค่ามากขึ้น ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้น เนื่องจากมีผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร สำหรับวงจรในการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

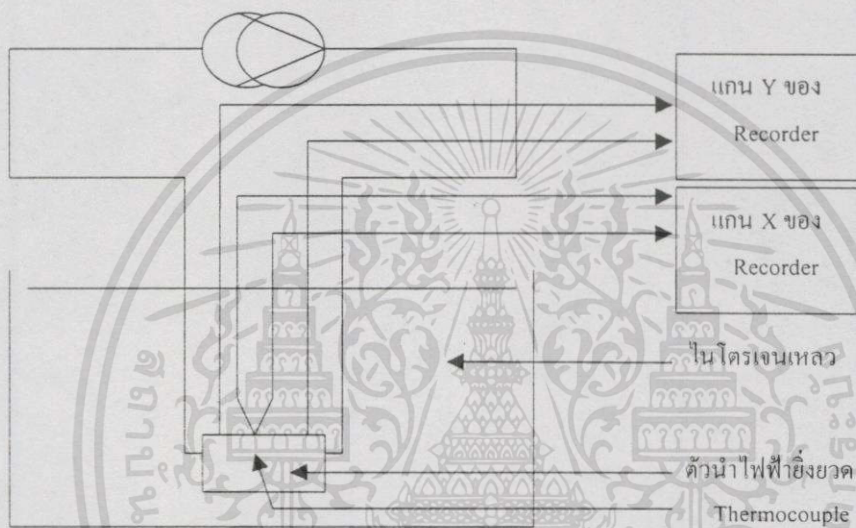
วงจรวัดกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำนี้ประกอบด้วยวงจรเดียวกับชุดวงจรวัดระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ แต่เพิ่มชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กคงที่ที่ปรับค่าได้เข้าไปในการจ่ายสนามแม่เหล็กจะจ่ายกระแสผ่านขดลวด 10 มิลลิแอมป์เทียบเท่ากับ 10 a.u. หรือสนามแม่เหล็ก 0.8 มิลลิเทสลา ในการทดลองจะทำการวัดความ

สัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 3.2.3.3 การวัดอุณหภูมิวิกฤต

ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตนั้นค่าอุณหภูมิวิกฤตเป็นสมบัติเฉพาะของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิด ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตจะใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.13

แหล่งจ่ายกระแสคงที่



รูปที่ 3.13 วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในการวัดนี้จะนำชิ้นสารมาปรับแต่งแล้วบัดกรีเป็นแบบ Four-Point Probe โดยขั้วที่ 1 และ 4 ได้รับการป้อนกระแสค่าหนึ่งจากแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนในขั้ว 2 และ 3 นั้นถูกต่อเข้าแกน Y เพื่อแสดงค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะที่ทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นสาร ส่วนเทอร์โมคัปเปิลเปิดดูวางให้สัมผัสกับผิวของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยสัญญาณ ซึ่งแรงดันจะต่อเข้าที่แกน X จากนั้นนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและเทอร์โมคัปเปิลค้อย ๆ จุ่มลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องลงไปยังอุณหภูมิที่จุดเดือดของไนโตรเจนเหลว

เมื่อชิ้นสารอยู่ที่อุณหภูมิห้องจะเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารค่าหนึ่งเหมือนเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่วๆ ไป มีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง แต่เมื่อนำชิ้นสารไปทำการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิกำหนดแล้วค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะหมดไป (ความต้านทานเป็นศูนย์) หรือชิ้นสาร

นั้นเกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นจะเรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต ซึ่งสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต้องมีอุณหภูมิวิกฤตสูง ๆ

### 3.3 การทดลองหาอุณหภูมิในการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ [16-18]

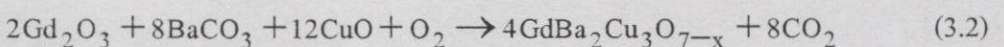
จากการที่มีการศึกษาถึงกระบวนการสร้างและประยุกต์ใช้งานในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  มาแล้วนั้น [14] จึงได้มีความพยายามที่จะวิจัยหาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบใหม่ที่สามารถใช้กระบวนการสร้างเดิมเพื่อความสะดวกในการวิจัยและเพื่อหาแนวทางการประยุกต์ใช้งานร่วมกัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าหาสารตั้งต้นใหม่แทนตัวเดิม คือใช้สารประกอบแกดโกลีนียมออกไซด์ ( $Gd_2O_3$ ) แทนอิตเทรียมออกไซด์ ( $Y_2O_3$ ) สาเหตุที่เลือกเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  เพราะมีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว และในกระบวนการสร้างครั้งนี้จะใช้กระบวนการสร้างเดียวกับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  เพราะมีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากนัก สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อุณหภูมิในการเผาไม่สูงมากนัก และสารประกอบที่ใช้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อร่างกายในระหว่างการสร้าง จากสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  ที่สร้างขึ้นได้มีข้อดี คือ มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กของธาตุแกดโกลีนียมร่วมอยู่ด้วยและสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นานกว่า และมีค่ากระแสวิกฤตต่ำกว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตระกูลอิตเทรียม

แผนผังกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO ได้แสดงในรูปที่ 3.9 นั้นมีตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา ซึ่งสามารถทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด GBCO มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุด อุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบใหม่นี้จะใช้ในกระบวนการสร้างมาตรฐานต่อไป

#### 3.3.1 การเตรียมสารเคมี

การเตรียมสารเคมีสำหรับกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO สามารถเตรียมได้จากสารประกอบแกดโกลีนียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสารประกอบทั้งสามชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99 % จากนั้นนำสารประกอบทั้งหมดมาบดผสมกันโดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก  $Gd : Ba : Cu$  เป็น 1 : 2 : 3

การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลองนั้นสามารถคำนวณได้จากปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้งสามและเขียนสมการของปฏิกิริยาได้ดังนี้

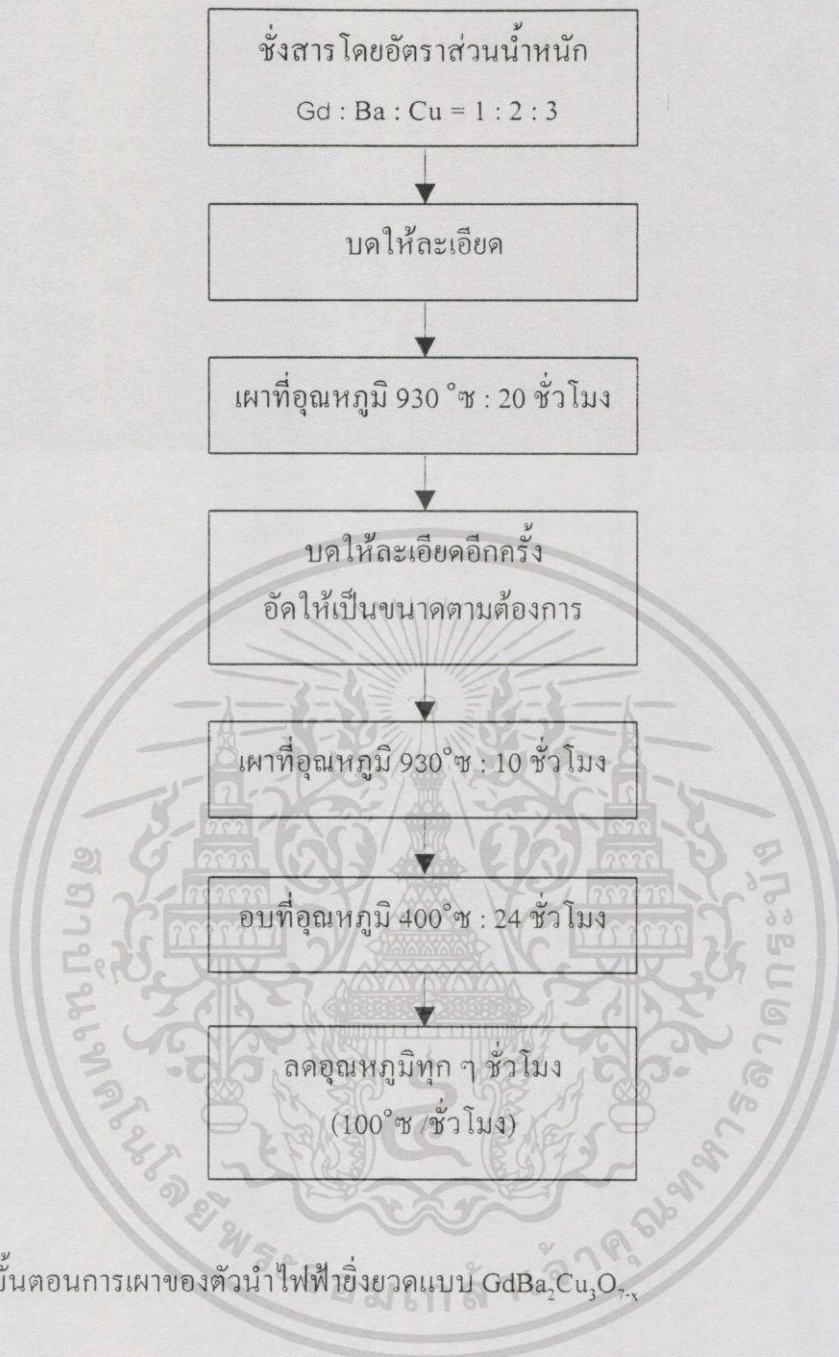


จากสมการ (3.2) พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารประกอบจากสมการจะได้ Gd : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งมวลอะตอมของธาตุต่าง ๆ มีค่าดังนี้ Gd = 157.26 Ba = 137.34 Cu = 63.54 C = 12 และ O = 15.9

สมการเคมีของปฏิกิริยาเคมีมีมวลโมเลกุลสารตั้งต้นทั้งหมด 814.58 ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์กับ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  814.58 กรัม ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้นแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  100 กรัม ต้องใช้แคลโคลิเนียมออกไซด์ 22.25 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 48.45 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 29.29 กรัม

### 3.3.2 วิธีการทดลอง

1. ชั่งสารประกอบ  $Gd_2O_3$ ,  $BaCO_3$  และ  $CuO$  ซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก Gd : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3
2. บดสารประกอบทั้งสามชนิดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. ตักสารผสมใส่ถ้วยทนไฟ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่เผามาเขี่ยส่วนสีเขียวย่อออก จากนั้นนำสารมาบดละเอียดและนำไปอัดด้วยแรง 1 ตัน ให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารใส่บนแผ่นกระเบื้อง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิจาก 900 องศาเซลเซียส เป็น 400 องศาเซลเซียส อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ลดอุณหภูมิทุก ๆ ชั่วโมง ด้วยอัตราชั่วโมงละ 100 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้อง
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิจาก 900 องศาเซลเซียส เป็น 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังในรูปที่ 3.14
9. นำเม็ดสารตัวอย่างไปทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ และปรับแต่งชิ้นสารให้มีขนาด  $2.0 \times 2.0 \times 7.0$  มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นสารไปบัดกรีแบบ Four-Point Probe เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

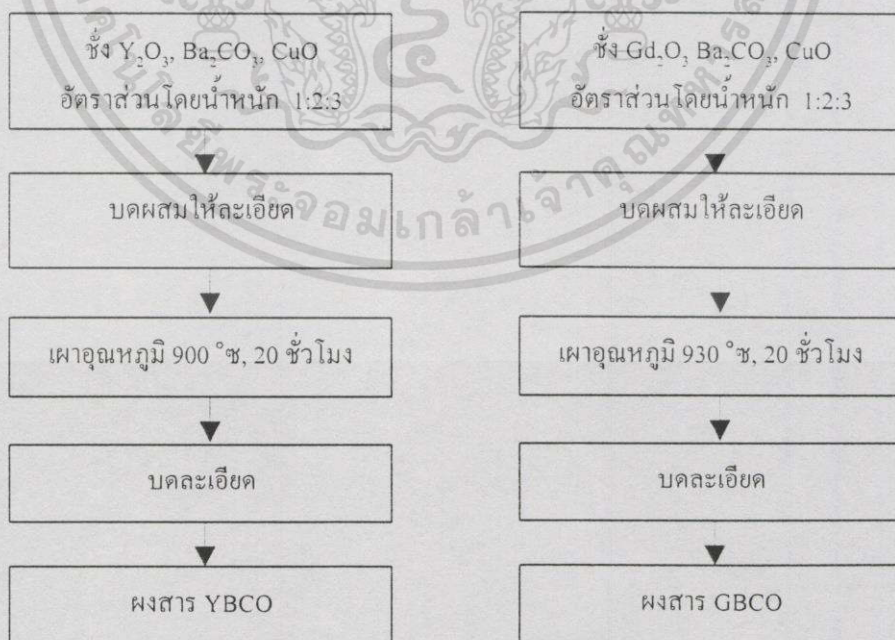
### 3.4 การทดลองหาอุณหภูมิในการเผาของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO [19]

เมื่อได้ผลจากการทดลองหาอุณหภูมิในการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  แล้วจะทำให้ได้กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO อีกทั้งคุณสมบัติพิเศษของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไม่มีค่าสภาพต้านทานเมื่อมีกระแสไหล จึงทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงาน และความร้อนในขณะใช้งาน ซึ่งในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยรอยต่อ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำนั้นมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงแนวทางในการใช้งานร่วมกันเป็นอุปกรณ์ทางรอยต่อโจเซฟสัน

กระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ จะมีกระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 แบบ คือ สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO [14, 16] โดยทั้ง 2 แบบจะมีลำดับขั้นตอนการสร้างคล้ายกัน จะต่างกันที่อุณหภูมิในการเผา ซึ่งในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะใช้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ส่วนในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO จะใช้ อุณหภูมิในการเผาเป็น 930 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ใช้สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิทั้งสองแบบมา ทำการศึกษาร่วมกันต่อไป

### 3.4.1 การเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO

ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO มีขั้นตอนในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดดังรูปที่ 3.15 ตามขั้นตอนกระบวนการเตรียมของห้องปฏิบัติการฯ เริ่มจากนำผงสาร  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$  และ  $CuO$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ทำการชั่งสาร Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 นำผงสารมาบดผสมให้เข้ากันเป็นอย่างดี แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ขั้นตอนต่อไปนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เผาแล้วมาแยกส่วน Non-Superconductor แยกเก็บไว้ จากนั้นนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO บดให้ละเอียด ส่วนการเตรียมผงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO ทำการเตรียมเช่นเดียวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการเผาจาก 900 องศาเซลเซียส เป็น 930 องศาเซลเซียส และสารตั้งต้น  $Y_2O_3$  เป็น  $Gd_2O_3$  หลังจากนั้นทำตามขั้นตอนการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  และ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การขึ้นรูปรอยต่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

ในการขึ้นรูปตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแบบต่าง ๆ ครั้งนี้ จะทำการขึ้นรูปสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแบบ YBCO GBCO และรอยต่อชนิด YBCO/GBCO โดยใช้สารตั้งต้นที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมจากรูปที่ 3.15 สำหรับขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ

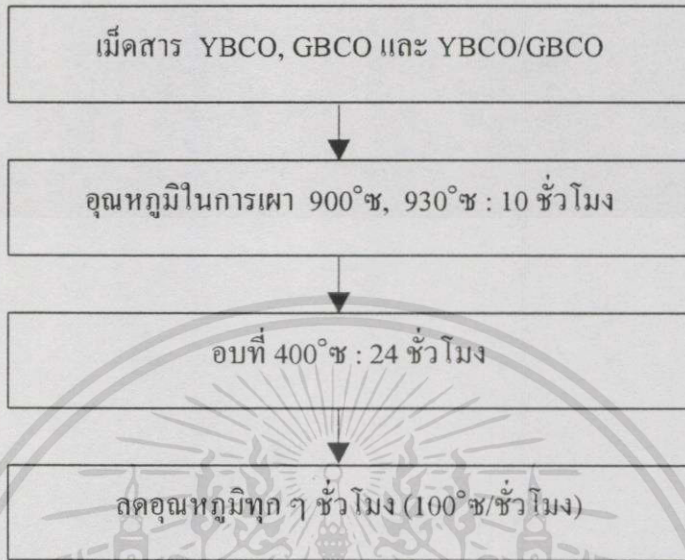
1. ชั่งสาร YBCO 1 กรัม อัดเป็นเม็ดสารด้วยแรงอัด 1.5 ตัน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ซึ่งจะได้เม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแบบ YBCO ดังรูป 3.16(a)
2. ชั่งสาร GBCO 1 กรัม อัดเป็นเม็ดสารด้วยแรงอัด 1.5 ตัน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ซึ่งจะได้เม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแบบ GBCO ดังรูปที่ 3.16(b)
3. ชั่งสาร YBCO 0.5 กรัม อัดเป็นเม็ดสารด้วยแรงอัด 1.5 ตัน จากนั้นชั่งสารชนิด GBCO 0.5 กรัม แล้วทำการอัดรวมกับ YBCO ด้วยแรง 1.5 ตัน จึงจะได้เม็ดสารรอยต่อชนิด YBCO/GBCO ดังรูปที่ 3.16(c)
4. เม็ดสารที่ผ่านการอัดตามข้อ 1, 2 และ 3 จะมีลักษณะตามรูปที่ 3.16 จากนั้นนำเม็ดสารแต่ละชนิดไปผ่านขั้นตอนการเผาโดยใช้อุณหภูมิในการเผา 900 องศาเซลเซียส และ 930 องศาเซลเซียส ทำตามขั้นตอนการเผาดังรูปที่ 3.17 เพื่อหาอุณหภูมิในการเผาของรอยต่อ YBCO/GBCO ที่เหมาะสมและกำหนดเป็นอุณหภูมิมาตรฐานในกระบวนการสร้างรอยต่อ



รูปที่ 3.16 ขนาดของเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

5. นำเม็ดสารตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเผาจากรูปที่ 3.17 นำไปทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ในการศึกษาหาอุณหภูมิการเผานี้จะใช้ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานของการมีสภาพนำไฟฟ้าที่ยาว ในการทดลองนี้จะนำเม็ดสารตัวอย่างจากข้อที่ 4 ไปลดอุณหภูมิด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วนำแม่เหล็กถาวรเหนือเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแล้ววัดความสูงของการลอยตัวของแม่เหล็กด้วยวิธีวัดตามความสูงด้วยการใช้ไม้บรรทัดพลาสติก

ในการศึกษาหาอุณหภูมิการเผาไหม้จะใช้ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ถ้าแสดงไมส์เนอร์ได้ดีก็มีสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการทดลองหาอุณหภูมิการเผาเม็ลตสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 3.5 การทดลองทางกายภาพ

เมื่อได้ผลการหาอุณหภูมิการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBCO/GBCO ที่เหมาะสมแล้ว ทำให้ได้กระบวนการสร้างมาตรฐานของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO จากนั้นเราจะทำการศึกษาทางกายภาพเปรียบเทียบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐานในแต่ละชนิด

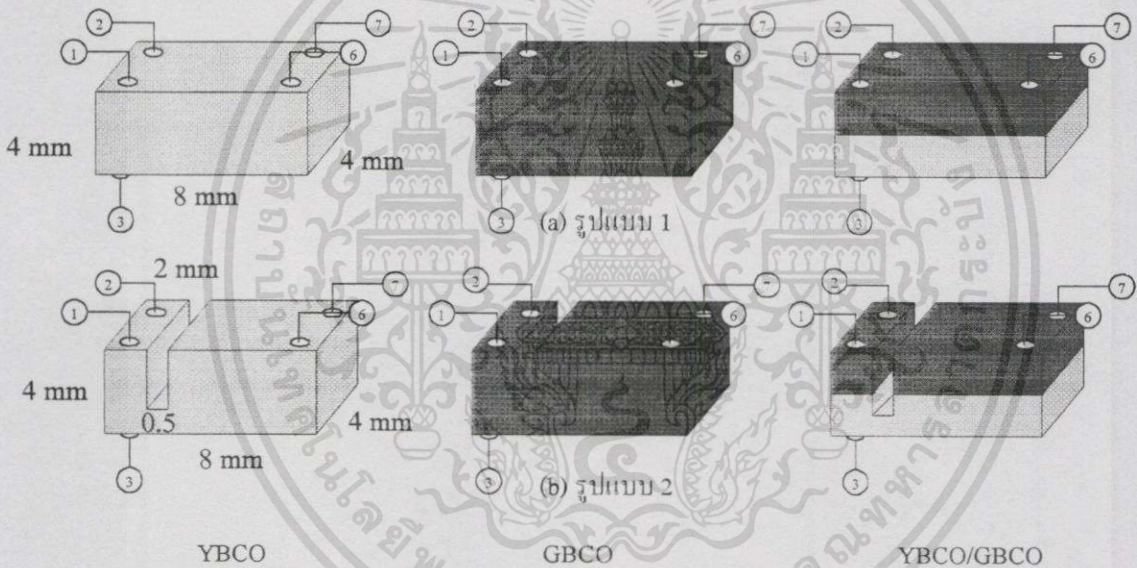
### 3.6 การทดลองหาลักษณะความเป็นรอยต่อของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

#### แบบ YBCO/GBCO

เมื่อเราได้ศึกษาถึงกระบวนการสร้างและสมบัติทางกายภาพของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO แล้วจากนั้นจึงนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบนี้มาทำการศึกษาความเป็นรอยต่อของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO โดยแสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ใช้เครื่องบันทึกสองแกน (x-y Recorder) วัดจากชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในลักษณะต่าง ๆ กัน เริ่มจากการทดลองต่อไปนี้จะทำการวัดเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยเปรียบเทียบจากชิ้นงานแบบ YBCO, GBCO และ YBCO/GBCO

และแรงดันระหว่างขั้ว (ในชิ้นงานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO ไม่มีลักษณะของความเป็นรอยต่อต่างกับในชิ้นสาร YBCO/GBCO ที่มีลักษณะของความเป็นรอยต่อ)

ในการทดลองจะนำเม็ดยาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ที่ผ่านขั้นตอนการเผาในแต่ละกระบวนการแล้วต้องนำมาทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ก่อนทุกครั้ง จึงสามารถนำเม็ดยาทั้งสามชนิดมาทำการขึ้นรูปและบัดกรีขั้วขึ้นสารตามรูปแบบที่กำหนดได้ ในการทดลองนี้กำหนดได้ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบ 1 และ รูปแบบ 2 ดังในรูปที่ 3.18 ชิ้นสารรูปแบบ 1 เมื่อบัดกรีแล้วจะแสดงดังรูปที่ 3.18(a) จากนั้นจึงนำไปวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยทำการให้กระแสไหลเข้าที่ขั้ว 1-7 ทำการวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารระหว่างขั้ว 2-3 และ 2-6 เมื่อทำการวัดครบทั้ง 3 ชิ้นสารจึงนำชิ้นสารในรูปแบบ 1 มาตะไบพร้อมกับบัดกรีขั้วในรูปแบบ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.18(b) เมื่อได้แล้วนำไปทดสอบหุภูมิในไนโตรเจนเหลวพร้อมกับวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเช่นเดียวกับรูปแบบ 1 จนครบทั้ง 3 แบบ



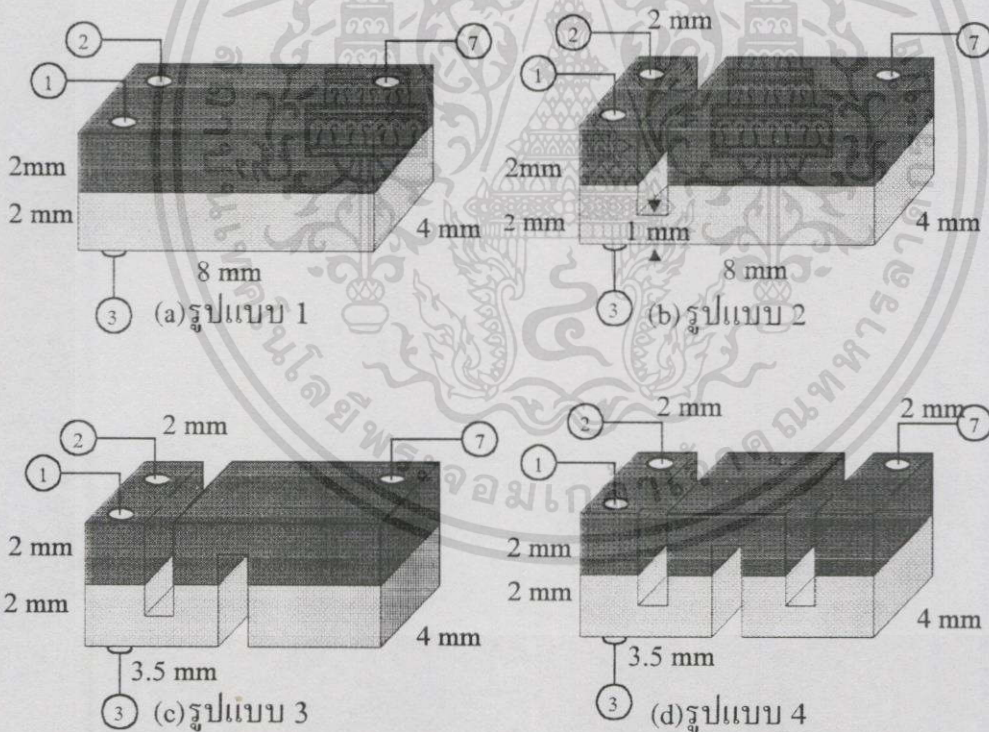
รูปที่ 3.18 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1 และ 2

### 3.7 การทดลองหาผลของรูปแบบรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO และผลการวัดค่าแรงดันต่างขั้ว

จากผลของรูปแบบรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO มีลักษณะของความเป็นรอยต่อแล้วทำให้เกิด Step เกิดขึ้นบนกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยเกิด Step จำนวน 1 และ 2 ตำแหน่ง ทำให้ได้มีความสนใจต่อลักษณะของรูปแบบรอยต่อ YBCO/GBCO เพิ่มขึ้นและตำแหน่งขั้วการวัดค่าแรงดันขึ้นสารว่ามีผลต่อการเกิด Step บนกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ดังการทดลองต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองส่วนนี้ทำการศึกษาถึงผลของรอยต่อต่างชนิดที่มีรูปแบบต่างๆ และผลของการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ ของชิ้นสารแบบ YBCO/GBCO ที่มีต่อลักษณะการเกิดของ Step บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยทำการตะไบชิ้นสารแบบ YBCO/GBCO 4 รูปแบบ คือ รูปแบบ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งลักษณะรูปร่างและการบัดกรีขั้วชิ้นสารได้ดังในรูปที่ 3.19 ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเริ่มจากนำชิ้นสาร YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1 มาทำการบัดกรีขั้วดังแสดงในรูปที่ 3.19(a) เสร็จแล้วนำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยให้กระแสไหลเข้า-ออกที่ขั้ว 1-7 ทำการวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 2-3, 2-4, 2-5 และ 2-6 จากนั้นนำชิ้นสาร YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1 ที่วัดแล้วมาทำการตะไบชิ้นสาร YBCO/GBCO ให้มีลักษณะรูปร่างในรูปแบบ 2 และทำการบัดกรีขั้วดังในรูปที่ 3.19(b) ต่อมาจึงนำชิ้นสารที่บัดกรีแล้วไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกครั้งแล้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารแต่ละขั้วระหว่างขั้ว 2-3, 2-4, 2-5 และ 2-6 ดังเช่นในรูปแบบ 1 เมื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเสร็จแล้วจึงนำชิ้นสารในรูปแบบ 2 มาตะไบและบัดกรีขั้วเป็นรูปแบบ 3 และ 4 ดังในรูปที่ 3.19(c) และ 3.19(d) ตามลำดับ โดยทำการตะไบสลับกับการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ดังในรูปแบบ 1 และ 2



รูปที่ 3.19 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสาร YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1, 2, 3 และ 4

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

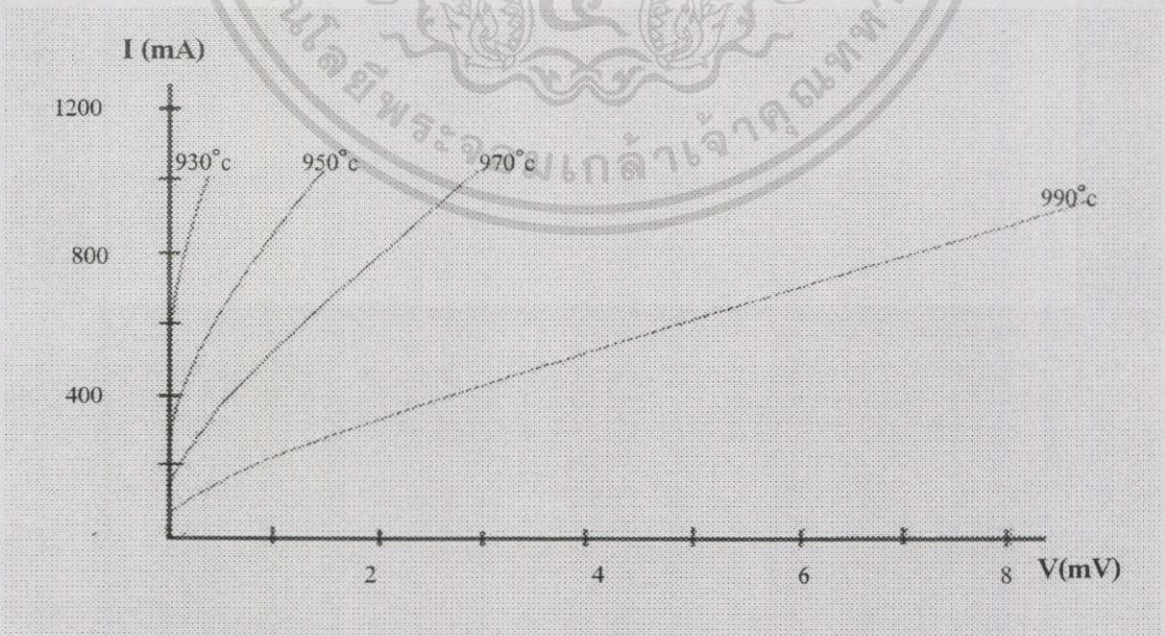
#### 4.1 ผลการหาอุณหภูมิในการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

จากผลการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ความสูงของปรากฏการณ์ไมสเนอร์

Sintering Temperature (°C)	900	930	950	970	990
Height (mm)	0.0	1.7	1.3	1.0	0.5

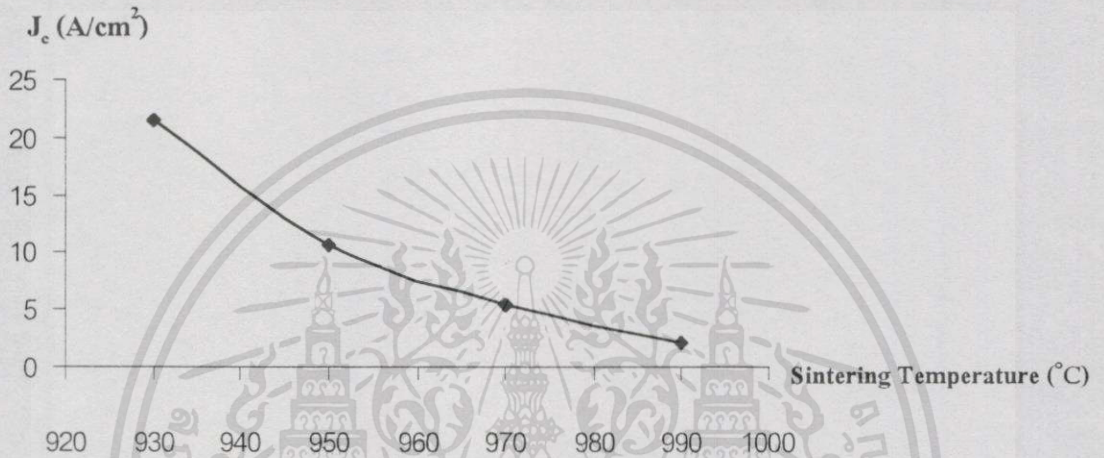
จากตารางที่ 4.1 เป็นผลความสูงของปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่งเป็นผลการทดลองของการเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  นี้โดยใช้ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดการผลักก้อนแม่เหล็กแต่สามารถดูดกับแม่เหล็ก ส่วนชิ้นสารที่เผาอุณหภูมิ 930-990 องศาเซลเซียส จะมีความสูงของแม่เหล็กเหนือชิ้นสารแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 930 องศาเซลเซียส จะผลักก้อนแม่เหล็กได้สูงสุด และเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นจะผลักก้อนแม่เหล็กได้น้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่เผาอุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

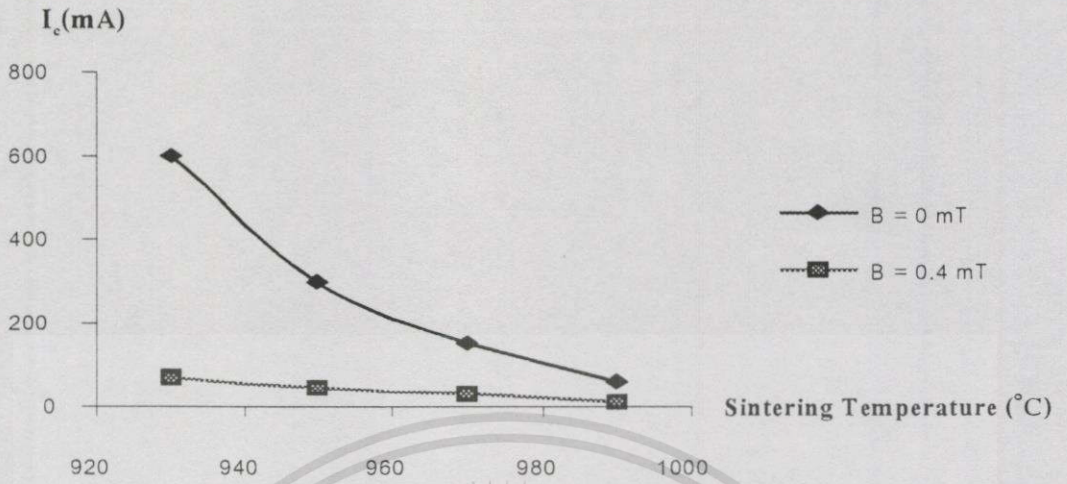
จากกราฟรูปที่ 4.1 เป็นผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ซึ่งวัดได้จากชิ้นสารที่มีอุณหภูมิในการเผาต่าง ๆ กัน พบว่าค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารที่เผาอุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส มีค่ามากที่สุดและเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นแล้วค่ากระแสวิกฤตมีค่าลดลง แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อการลดลงของสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวหรือมีการเกิดส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวเพิ่มมากขึ้น สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะได้อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส สามารถให้ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตสูงสุดเช่นเดียวกัน และค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตกับอุณหภูมิการเผาต่างๆ

เมื่อเราหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวอย่างต่าง ๆ แล้ว เรามาทำการทดลองในลักษณะเดียวกันเพียงแต่เพิ่มสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่า 0.4 มิลลิเทสลากระทำกับชิ้นสารด้วย เราจะได้ผลการทดลองในลักษณะเดียวกัน คือ เมื่ออุณหภูมิในการเผาเป็น 930 องศาเซลเซียส จะได้ค่ากระแสวิกฤตสูงสุดและลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่เมื่อชิ้นสารถูกสนามแม่เหล็กกระทำจะทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลงอย่างมากและอุณหภูมิในการเผาสูงมากขึ้น ทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลงเช่นเดียวกัน แต่ลดลงไม่แตกต่างกันมาก ผลที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

สำหรับผลการทดลองหาค่าอุณหภูมิวิกฤตแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิในการเผา 930 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิวิกฤตสูงสุดและลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟค่ากระแสสวิกฤตเมื่อมีและไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำ



รูปที่ 4.4 กราฟค่าอุณหภูมิวิกฤตที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ

## 4.2 ผลการหาอุณหภูมิการเผารอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

ในการศึกษาหาอุณหภูมิการเผาจะใช้ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ถ้าแสดงไมส์เนอร์ได้ดีก็มีสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีด้วยเช่นกัน

### 4.2.1 ผลการเกิดไมส์เนอร์

สำหรับผลการทดลองไมส์เนอร์กับเม็ดสารแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ในผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการเผา 900 องศาเซลเซียส จะมีเม็ดสารเฉพาะแบบ YBCO เท่านั้นที่เกิดไมส์เนอร์ ส่วนเม็ดสารแบบ GBCO และ YBCO/GBCO ไม่เกิดไมส์เนอร์อีกทั้งในเม็ดสารแบบ GBCO เกิดการดูดกับแม่เหล็กด้วย ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ผ่านมาแล้ว สำหรับอุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส นั้นเม็ดสารสามารถเกิดไมส์เนอร์ได้ทุกแบบ ส่วนความสูงของเม็ดสาร YBCO ลดลงและเม็ดสารแบบ GBCO ให้ความสูงได้ต่ำกว่าเม็ดสารแบบอื่น ๆ ส่วนเม็ดสารแบบ YBCO/GBCO มีความสูงปานกลาง ซึ่งแสดงว่ารอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO สามารถมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีพอสมควร

ตารางที่ 4.2 ความสูงของปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ชั้นสาร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความสูงไมส์เนอร์ (มิลลิเมตร)
Y	900	2.0
	930	1.0
G	900	ดูดแม่เหล็ก
	930	0.5
Y/G	900	ไม่แสดงไมส์เนอร์
	930	1.5

## 4.3 ผลทางกายภาพของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO

### 4.3.1 ผงสาร

ลักษณะผงสารที่ผ่านการบดแล้วทั้งแบบ YBCO และ GBCO จะมีสีเทาคล้าย ๆ กัน แต่เมื่อนำมาผ่านขั้นตอนการเผา 20 ชั่วโมงแล้ว ผงสารแบบ GBCO จะมีสีผงที่มีลักษณะเป็นสีดำเข้มกว่าผงสารแบบ YBCO และในผงสารแบบ GBCO จะมีเกล็ดขาวอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากลักษณะเฉพาะของธาตุชนิด  $Gd^{3+}$  และยังมีสมบัติเป็นธาตุทางแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรรวมอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 เม็ดสาร

เม็ดสารรอยต่อแบบ YBCO/GBCO เมื่อผ่านขั้นตอนการอัดและเผาแล้วจะสังเกตเห็นว่าเม็ดสารรอยต่อแบ่งชั้นกันอย่างชัดเจน เนื่องจากสีที่ต่างกันของเนื้อสารระหว่างแบบ YBCO และ GBCO ซึ่งสีเนื้อสารแบบ GBCO มีสีดำเข้มกว่า

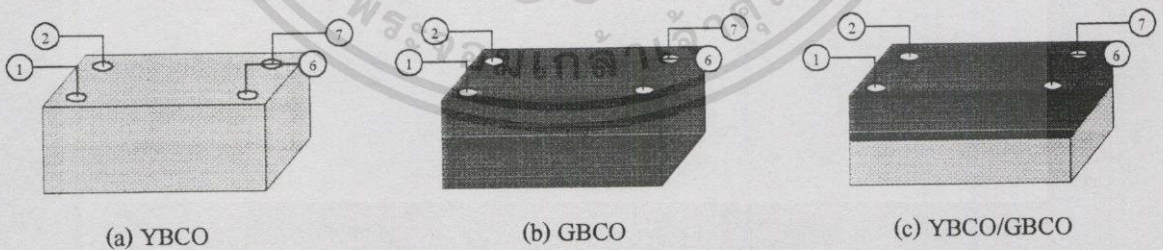
## 4.4 ผลของลักษณะความเป็นรอยต่อของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

### 4.4.1 ชั้นสารแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1

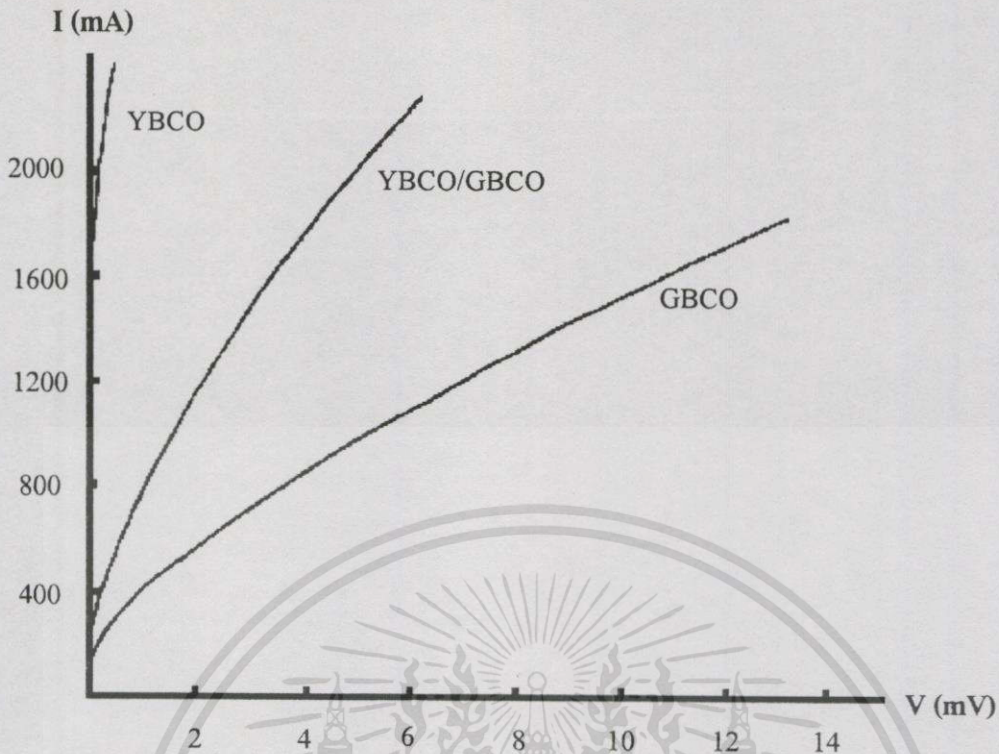
ในการทดลองนี้จะทำการให้กระแสไหลเข้า-ออกระหว่างขั้ว 1-7 แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างขั้ว 2-6 และ 2-3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันมีลักษณะต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 4.4.1.1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6

จากรูปที่ 4.5 (a) (b) และ (c) แสดงรูปร่างชั้นสารแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ตามลำดับพร้อมกับการบัดกรีขั้วของชั้นสาร โดยให้กระแสที่ขั้ว 1-7 แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างขั้ว 2-6 ซึ่งจะได้กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันดังในรูปที่ 4.6 จากกราฟพบว่าค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารแบบ YBCO มีค่าประมาณ 1800 mA โดยเป็นค่ากระแสวิกฤตที่มีค่าสูงสุด ส่วนชั้นสารแบบ YBCO/GBCO จะได้ค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 310 mA ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชั้นสารแบบ YBCO เป็นอย่างมาก สำหรับชั้นสารแบบ GBCO มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 190 mA ซึ่งเป็นค่ากระแสวิกฤตที่มีค่าต่ำสุดและเมื่อให้กระแสมากกว่าค่ากระแสวิกฤตแต่ละชั้นสารพบว่าเกิดในลักษณะเดียวกัน คือ เกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารโดยชั้นสารแบบ YBCO ให้แรงดันน้อยที่สุด ส่วนชั้นสารแบบ GBCO ให้ค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารมากที่สุด



รูปที่ 4.5 รูปร่างและการบัดกรีชั้นสารในรูปแบบ 1 ของชั้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6

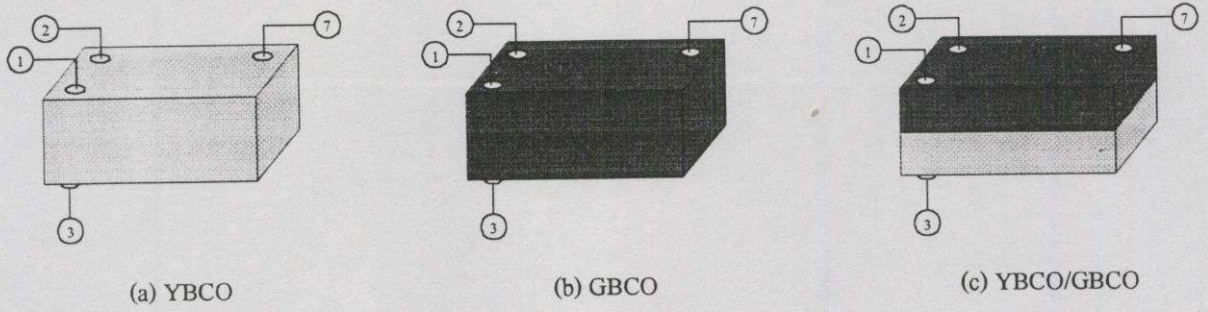


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นสารรูปแบบ 1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6

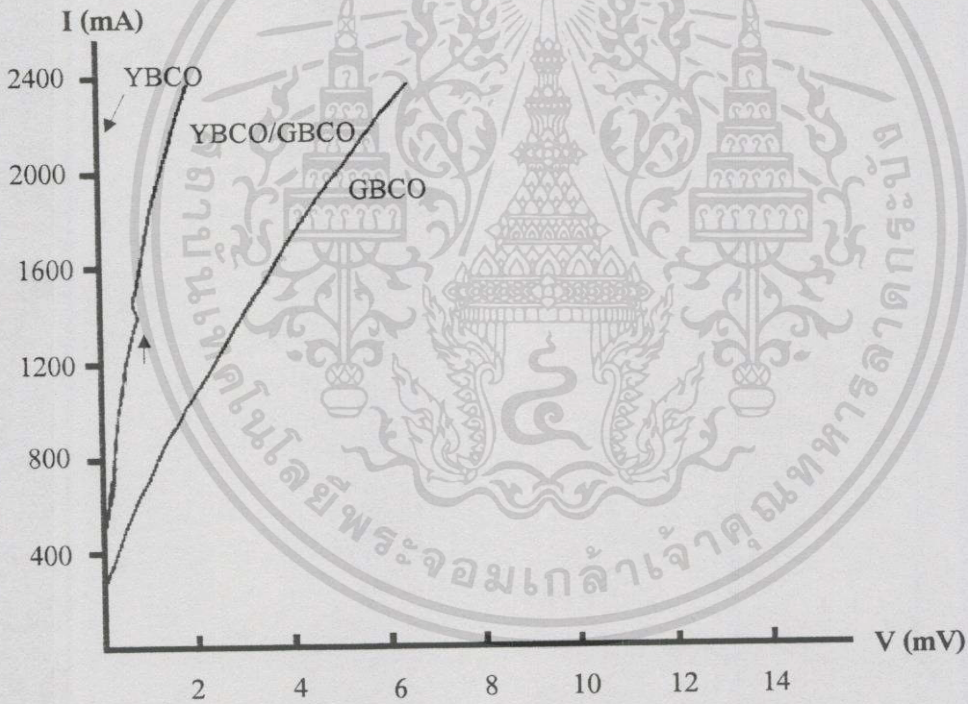
#### 4.4.1.2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3

จากรูปที่ 4.7 เมื่อทำการให้กระแสระหว่างขั้ว 1-7 แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างขั้ว 2-3 จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดังรูปที่ 4.8 พบว่าชั้นสารแบบ YBCO มีเส้นตามแกนกระแส ซึ่งแสดงว่ายังไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสาร ค่ากระแสวิกฤตมีค่ามากกว่า 2400 mA ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบที่มีค่ากระแสวิกฤตสูงสุด

ส่วนชั้นสารแบบ GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 ค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารแบบ GBCO มีค่าเท่ากับ 300 mA ซึ่งต่ำกว่าชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ YBCO/GBCO สำหรับชั้นสารแบบ YBCO/GBCO มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 570 mA ซึ่งก็ยังเป็นค่ากระแสวิกฤตที่มีค่าอยู่ระหว่าง YBCO และ GBCO จากการพิจารณาลักษณะของเส้นกราฟเมื่อเกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสาร เมื่อกระแสที่มีค่ามากกว่ากระแสวิกฤตที่ขั้ว 1-7 จะเกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้นและเพิ่มตามค่ากระแสที่เพิ่มขึ้น แรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดในชั้นสารทุกแบบแต่ในแบบ YBCO/GBCO จะมีลักษณะแตกต่างที่พิเศษออกไป คือ จะมี Step เกิดขึ้นบนกราฟของกระแสกับแรงดัน จำนวน 1 Step ตำแหน่งของ Step คือ กระแส 1380 mA แรงดัน 0.90 mV



รูปที่ 4.7 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารในรูปแบบ 1 ของชิ้นสาร YBCO, GBCO และ YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารรูปแบบ 1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3

#### 4.4.2 ชั้นสารแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 2

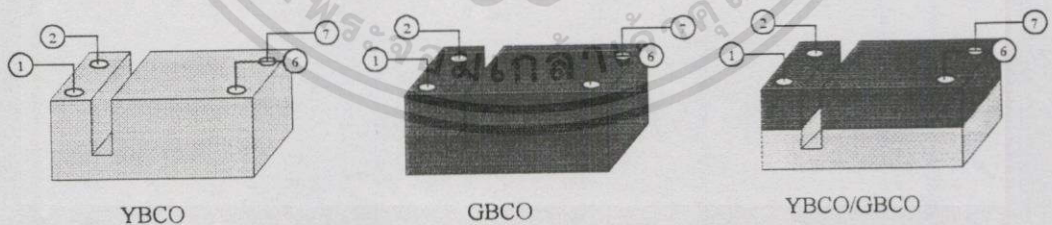
ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบ 1 เป็นรูปแบบ 2 โดยในรูปแบบ 2 นี้ก็จะทำการวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 และ 2-3 เช่นเดียวกับในชั้นสารรูปแบบ 1 ทำการให้ค่ากระแสเข้า-ออกที่ขั้ว 1-7 เช่นเดิม โดยเริ่มจากการวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10

##### 4.4.2.1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6

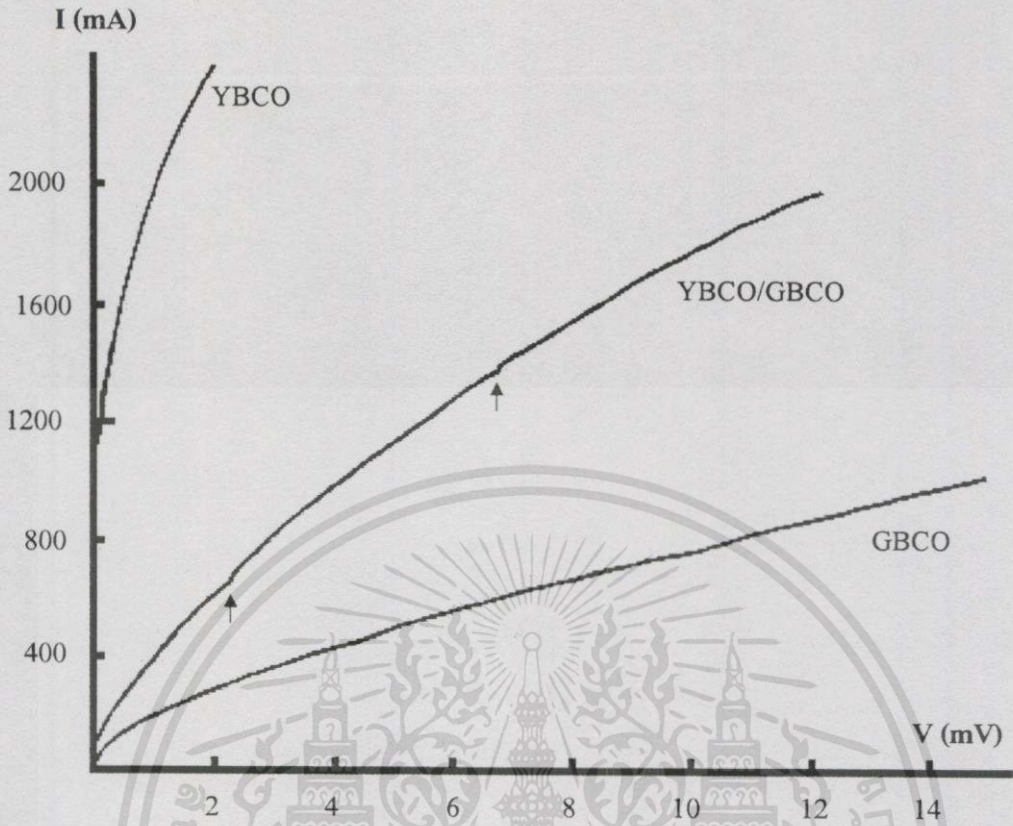
จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารแบบ YBCO ในรูปแบบ 2 มีค่าเท่ากับ 1170 mA ซึ่งยังคงมีค่าสูงกว่าแบบ GBCO และ YBCO/GBCO เมื่อให้กระแสมากกว่ากระแสวิกฤตจะเกิดมีแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้น ค่าแรงดันนี้จะเพิ่มตามค่าของกระแสที่เพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนชั้นสารแบบ GBCO จะมีลักษณะของเส้นกราฟในลักษณะเดียวกับชั้นสารแบบ YBCO และยังคงมีค่ากระแสวิกฤตที่ต่ำสุด โดยในรูปแบบ 2 นี้มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 50 mA ซึ่งมีค่าต่ำมากและเมื่อให้กระแสเกินค่ากระแสวิกฤตจะเกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารเพิ่มตามค่ากระแส เช่นเดียวกับชั้นสารแบบ YBCO

ส่วนชั้นสารแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 2 นี้ค่ากระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 130 mA เมื่อให้กระแสมากกว่ากระแสวิกฤตแล้วจะเกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้นเช่นเดียวกันแต่มีลักษณะพิเศษเพิ่มขึ้นมา คือเกิดมี Step ขึ้นบนเส้นกราฟจำนวน 2 Step โดยเกิด Step ตำแหน่งแรกที่ค่ากระแส 690 mA แรงดัน 2.30 mV และตำแหน่งที่สองของ Step คือ กระแส 1440 mA แรงดัน 6.75 mV



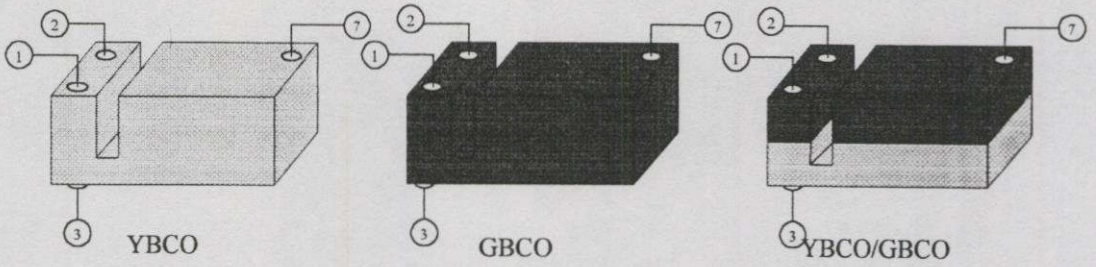
รูปที่ 4.9 รูปร่างและการบัดกรีชั้นสารรูปแบบ 1 ของชั้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3



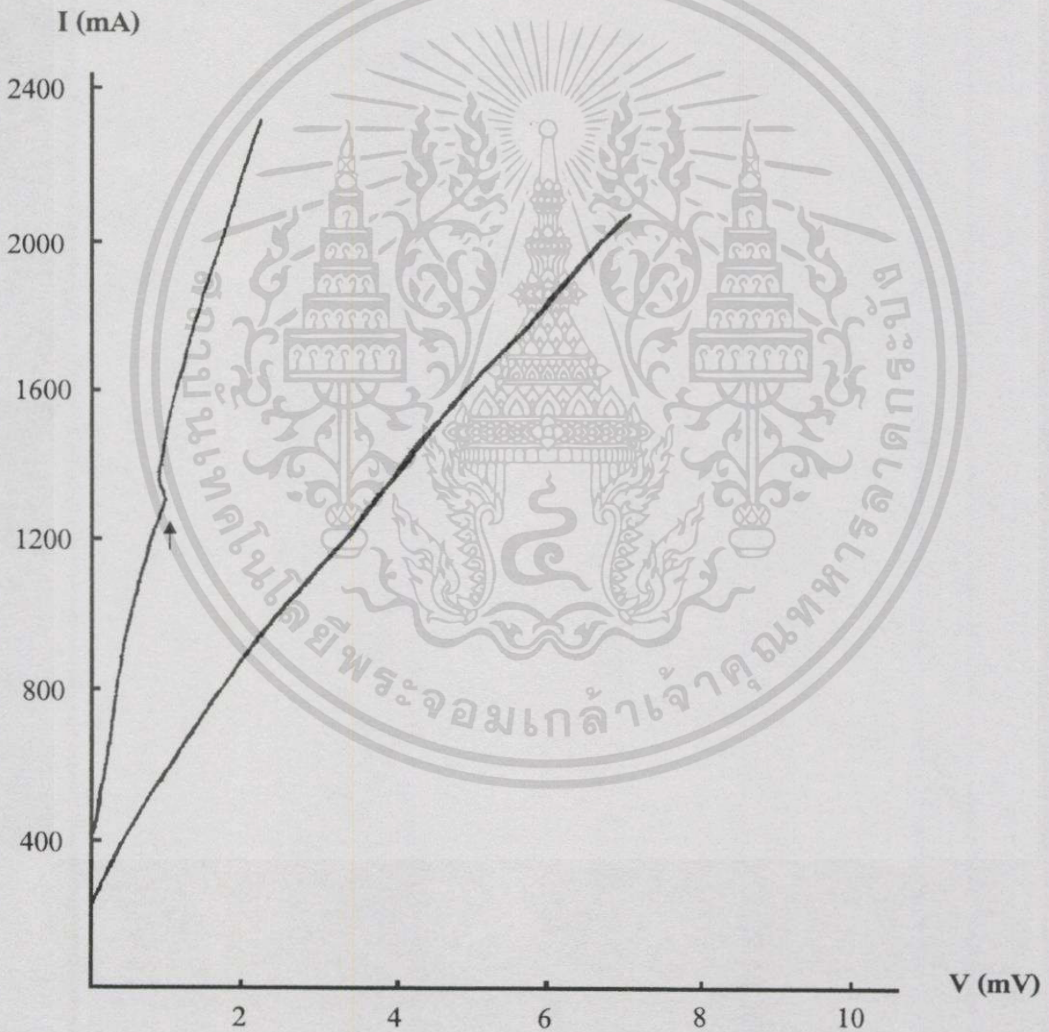
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นสารในรูปแบบ 2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6

#### 4.4.2.2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าในชั้นสารแบบ YBCO ยังคงมีค่าแรงดันเป็นศูนย์อยู่ ซึ่งค่ากระแสวิกฤตในชั้นสารนี้มีค่าสูงมากกว่า 2400 mA ส่วนชั้นสารแบบ GBCO ค่ากระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 240 mA ซึ่งมีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ก็ยังเป็นชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีค่าต่ำสุด และเมื่อเพิ่มค่ากระแสที่ให้กับชั้นสารค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับชั้นสารแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 2 มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 420 mA และเมื่อให้กระแสมากกว่ากระแสวิกฤตจะเกิดแรงดันขึ้นเช่นเดียวกันและเกิด Step ขึ้นจำนวน 1 Step เช่นเดียวกับในรูปแบบ 1 แต่ตำแหน่งของ Step อยู่ที่ ค่ากระแสเท่ากับ 1320 mA แรงดัน 1.00 mA



รูปที่ 4.12 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารรูปแบบ 2 ของชิ้นสาร YBCO GBCO และ YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบ 2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลักษณะของรอยต่อจากชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO GBCO และ YBCO/GBCO ข้างต้นทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารในรูปแบบต่าง ๆ

ชนิดชั้นสาร	$I_c$ (mA)			
	รูปแบบ 1		รูปแบบ 2	
	ขั้ว 2-6	ขั้ว 2-3	ขั้ว 2-6	ขั้ว 2-3
YBCO	1,800	>2,400	1,170	>2,400
GBCO	190	300	50	240
YBCO/GBCO	310	570	130	420

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่ง Step ของชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบต่าง ๆ

ชั้นสาร	YBCO/GBCO	1 <sup>st</sup> Step		2 <sup>nd</sup> Step	
		I(mA)	V(mV)	I(mA)	V(mV)
รูปแบบ 1	ขั้ว 2-6	-	-	-	-
	ขั้ว 2-3	1380	0.9	-	-
รูปแบบ 2	ขั้ว 2-6	690	2.3	1440	6.75
	ขั้ว 2-3	1320	1.0	-	-

เมื่อวัดค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างขั้ว 2-6 ในรูปแบบ 1 และรูปแบบ 2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO จะเป็นรูปแบบที่ไม่มีลักษณะของรอยต่อ เพราะกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ได้เป็นกราฟของตัวนำไฟฟ้าปกติทั่ว ๆ ไปคือ เมื่อตะไบชั้นสารเปลี่ยนเป็นรูปแบบ 2 ค่ากระแสวิกฤตลดลงและเกิดค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารเมื่อให้กระแสมากกว่าค่ากระแสวิกฤต ในชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO มีค่ากระแสวิกฤตสูงสุด และชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO จะมีค่ากระแสวิกฤตต่ำสุด ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นสมบัติทั่วไป ดังนั้น เมื่อทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 จากชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในรูปแบบ 1 และ 2 ทั้งชนิด YBCO และ GBCO จะเป็นรูปแบบที่ไม่มีลักษณะของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 1 ขณะวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ก็ยังไม่มีลักษณะของความเป็นรอยต่อ เพราะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไม่แตกต่างไปจากชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO มีเพียงค่ากระแสวิกฤตมีค่า

น้อยกว่าชั้นสารแบบ YBCO มากและมีค่ามากกว่าชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO ไม่นัก ส่วนชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบ 2 ขณะวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 จะมีลักษณะของความเป็นรอยต่อ เพราะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันมี Step ของกระแสเกิดขึ้นจำนวน 2 Step การเกิดของ Step นี้เกิดเนื่องมาจากชั้นสาร YBCO/GBCO มีรูปแบบ 2 ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีการควบคุมการไหลของกระแสให้ผ่านรอยต่อต่างชนิดระหว่างชั้นสาร YBCO และ GBCO ค่าแรงดันที่วัดได้เป็นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อต่างชนิดเป็นจำนวน 2 ครั้ง จึงได้ Step ของกระแส 2 Step ดังนั้น ชั้นสารแบบ YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ในรูปแบบ 1 จะไม่มีลักษณะของความเป็นรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่ในรูปแบบ 2 จะมีลักษณะของความเป็นรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 ในชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO ในรูปแบบ 1 และ 2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 แบบนี้ไม่มีลักษณะของความเป็นรอยต่อ เพราะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับแรงดันอยู่ในสภาวะปกติ ไม่มี Step ของกระแสเกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนจากรูปแบบ 1 เป็น 2 ทำให้ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเกิดเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้น ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO ในรูปแบบ 1 และ 2 ขณะวัดระหว่างขั้ว 2-3 ไม่มีลักษณะของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและเมื่อเปลี่ยนรูปแบบ 1 เป็น 2 จะทำให้ค่ากระแสวิกฤตเพิ่มขึ้นและแรงดันตกคร่อมน้อยลงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 ในชั้นสารแบบ YBCO และ GBCO จะให้คุณสมบัติคล้าย ๆ กับการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ต่างกันตรงที่ค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างขั้ว 2-3 จะให้ค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารน้อยลงและค่ากระแสวิกฤตมีค่ามากกว่าการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 มาก เนื่องจากการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 มีระยะทางของการวัดน้อยกว่าขั้ว 2-6 จึงทำให้ค่าแรงดันที่ได้มีค่าน้อยกว่า

ส่วนชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 ในรูปแบบ 1 และ 2 จะมีลักษณะของความเป็นรอยต่อทั้งสองรูปแบบ เพราะเกิดมี Step ของกระแสเกิดขึ้นบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน แต่เกิดต่างจากขั้ว 2-6 คือ มี Step ของกระแสเกิดขึ้น 1 Step ค่าแรงดันของ Step จากการวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 น้อยกว่าขั้ว 2-6 เนื่องจากระยะของการวัดที่น้อยกว่า ทำให้ค่าแรงดันของ Step มีค่าน้อยกว่าและการวัดระหว่างขั้ว 2-6 จะมีเฉพาะรูปแบบ 2 เท่านั้นที่มีลักษณะของความเป็นรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การเกิด Step ของกระแส จำนวน 1 Step ในรูปแบบ 1 และ 2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 นั้นต่างก็เป็นการวัดค่าแรงดันที่เกิดจากการไหลของกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อระหว่างชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO เพียงครั้งเดียว ทำให้ได้ Step ของกระแส จำนวน 1 Step เกิดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และจะมีตำแหน่งของ Step เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากรูปแบบที่เปลี่ยนไปจะมีผลไม่มากต่อตำแหน่ง Step ของกระแส เมื่อทำการเปลี่ยนรูปแบบ 1 เป็น

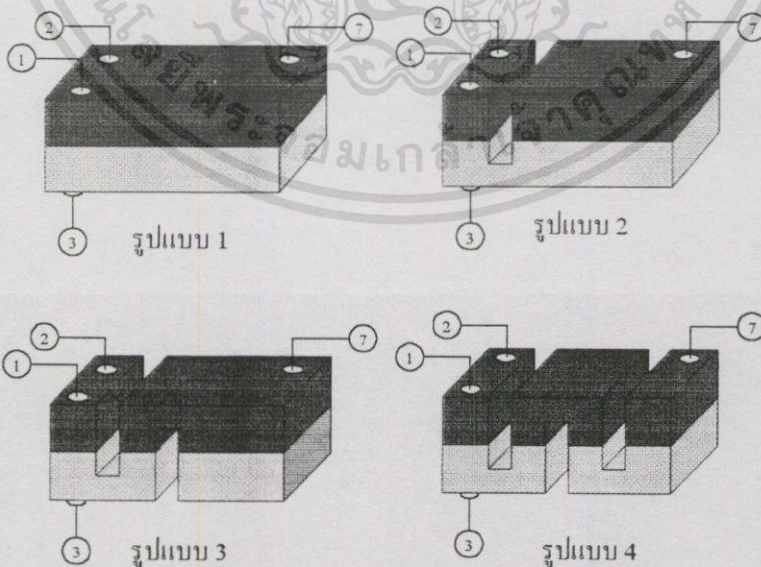
รูปแบบ 2 จึงไม่ค่อยมีผลต่อการเกิด Step ของกระแสบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเท่าใดนัก ดังนั้น ชินสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เมื่อทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 แล้วทั้งรูปแบบ 1 และ 2 ต่างก็มีลักษณะของความเป็นรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและรูปแบบไม่มีผลต่อตำแหน่งของ Step ซึ่งต่างกับเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ที่จะมีลักษณะของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเฉพาะรูปแบบ 2 เท่านั้น

#### 4.5 ผลของรูปแบบรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในการวัดแต่ละขั้ว

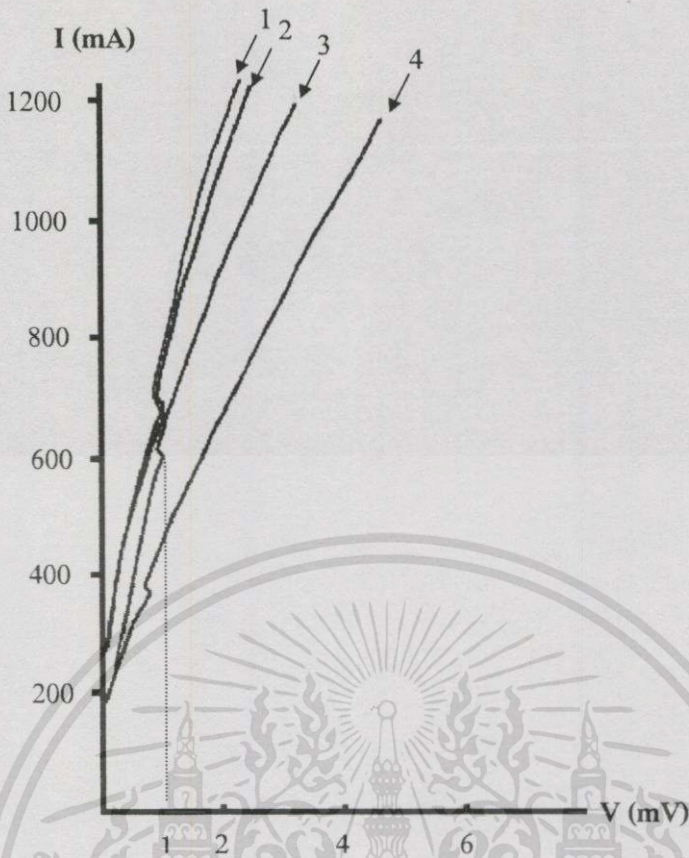
##### 4.5.1 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 เมื่อทำการตะไบแล้ววัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 จากชินสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ แล้วพบว่าจะมีเส้นกราฟ 4 เส้น ในลักษณะต่าง ๆ กัน คือ ในรูปแบบ 1 และ 2 จะมีค่ากระแสวิกฤตเท่ากัน คือ 550 mA ส่วนในรูปแบบ 3 และ 4 จะมีค่ากระแสวิกฤตลดลงและมีค่าเท่ากัน คือ 375 mA ทั้ง 4 รูปแบบเมื่อให้กระแสมากกว่าค่ากระแสวิกฤตแล้วจะมีแรงดันตกคร่อมชินสารเกิดขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการตะไบชินสาร

ในรูปแบบ 4 มีแรงดันตกคร่อมมากที่สุดแต่ค่าแรงดันตกคร่อมทั้ง 4 รูปแบบไม่ต่างกันมาก เส้นกราฟจะเกิด Step ของกระแสจำนวน 1 Step ในทุกรูปแบบโดยอยู่ในตำแหน่งของแรงดันใกล้เคียงกัน ตำแหน่ง Step ในรูปแบบ 1 จะเกิดที่ค่ากระแส 1375 mA แรงดัน 1.10 mV ส่วนตำแหน่ง Step ในรูปแบบ 2 คือ กระแส 1325 mA แรงดัน 1.13 mV ตำแหน่ง Step ในรูปแบบ 3 อยู่ที่กระแส 1200 mA แรงดัน 1.00 mV ในรูปแบบ 4 ตำแหน่งของ Step คือ กระแส 750 mA แรงดัน 0.87 mV



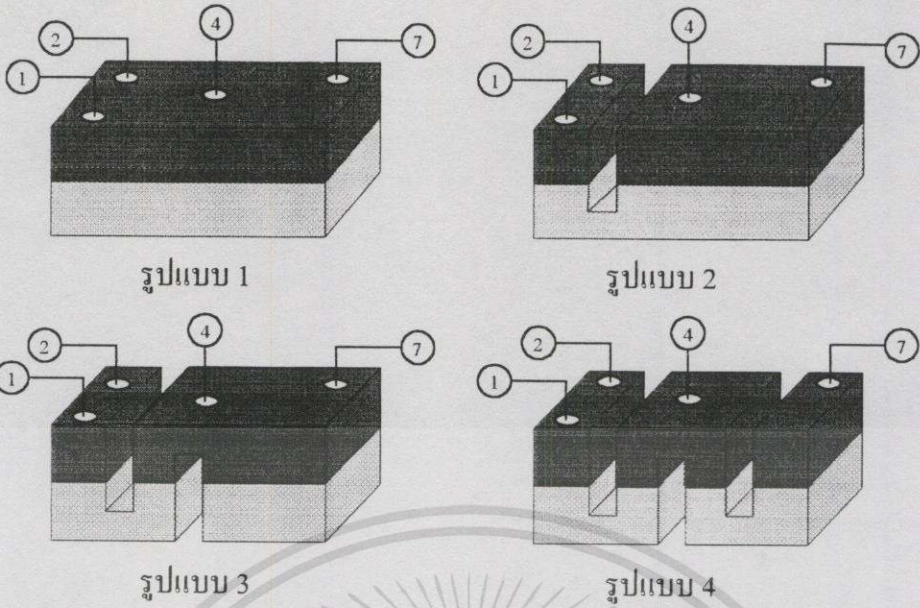
รูปที่ 4.13 รูปร่างและการบัดกรีชินสารเมื่อวัดแรงดันขั้ว 2-3 ในชินสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ



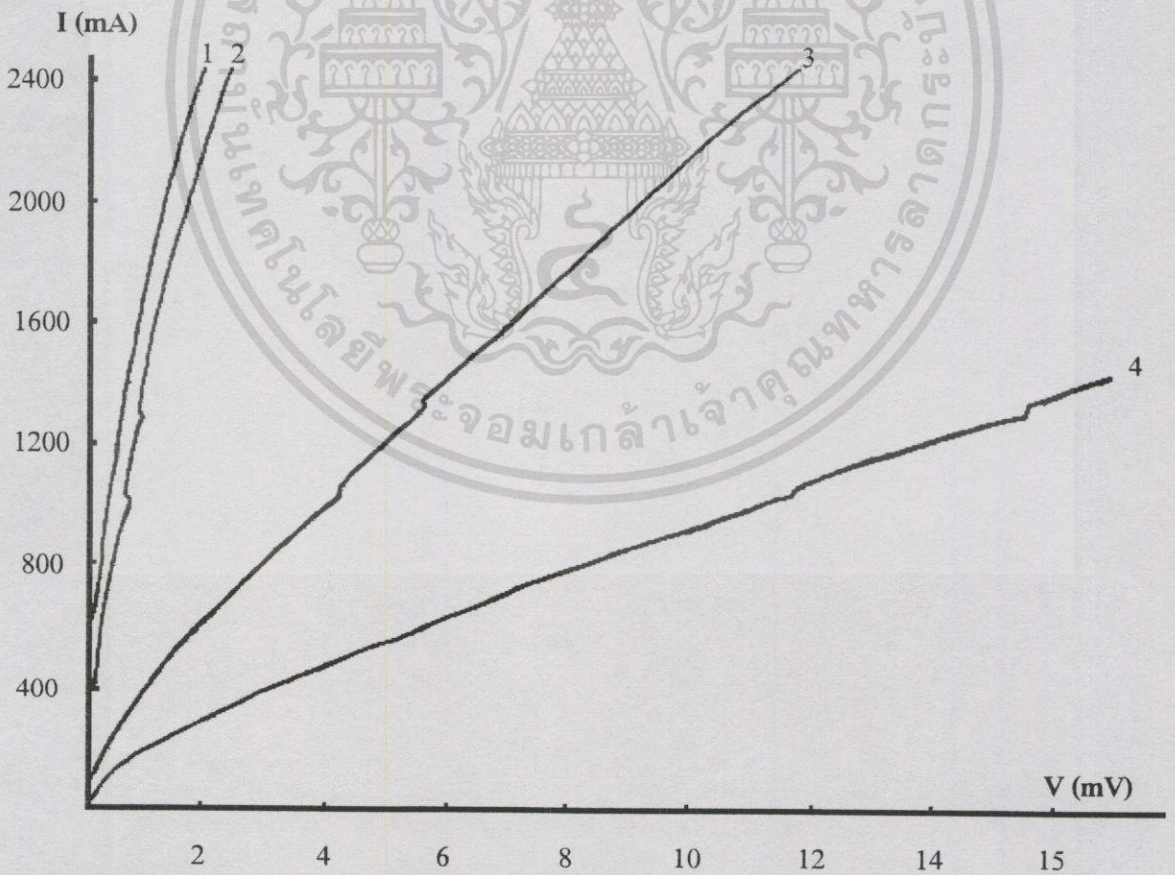
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 ในชั้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ

#### 4.5.2 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-4

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ผลจากกราฟเมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว พบว่า ในรูปแบบ 1 จะได้เส้นกราฟของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่วไป โดยมีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 650 mA และไม่มี Step เกิดขึ้นในรูปแบบ 1 จะมีแรงดันตกคร่อมชั้นสารน้อยที่สุด เมื่อทำการตะไบชั้นสาร เป็นรูปแบบ 2 จะมีกระแสวิกฤตลดลงมีค่าเท่ากับ 400 mA แต่แรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในรูปแบบ 2 มีค่ามากกว่าในรูปแบบ 1 และเกิดมี Step เกิดขึ้นจำนวน 2 Step อยู่ที่ตำแหน่งกระแส 1050 mA แรงดัน 0.80 mV ส่วน Step ตัวที่ 2 อยู่ที่กระแส 1325 mA แรงดัน 1.00 mV ส่วนในรูปแบบ 3 ค่ากระแสวิกฤตลดลงอย่างมากเท่ากับ 125 mA เมื่อให้กระแสมากกว่ากระแสวิกฤตจะเกิดแรงดันตกคร่อมมากขึ้นและเกิด Step ขึ้น 2 Step เช่นเดียวกัน ตำแหน่งของ Step คือ กระแส 1075 mA แรงดัน 4.40 mV และกระแส 1375 mA แรงดัน 5.87 mV ในรูปแบบ 4 ก็เกิดเส้นกราฟในลักษณะเดียวกันแต่ค่ากระแสวิกฤตต่ำลงอย่างมากเหลือ 45 mA และตำแหน่งของ Step อยู่ที่ค่ากระแส 1070 mA แรงดัน 12.30 mV และตัวที่สองอยู่ที่กระแส 1360 mA แรงดัน 16.50 mV



รูปที่ 4.15 รูปร่างและการบัดกรีขึ้นสารเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ในชั้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ



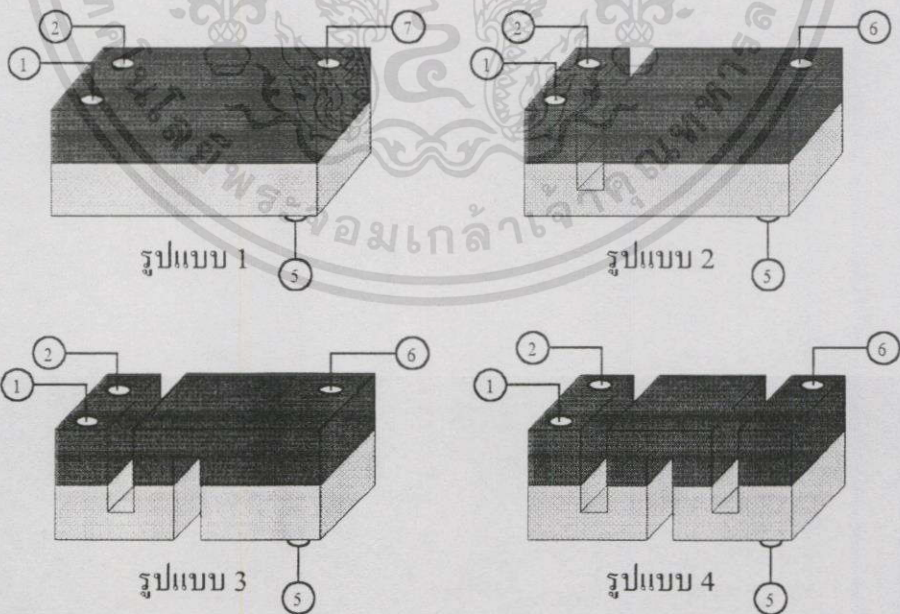
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ในชั้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

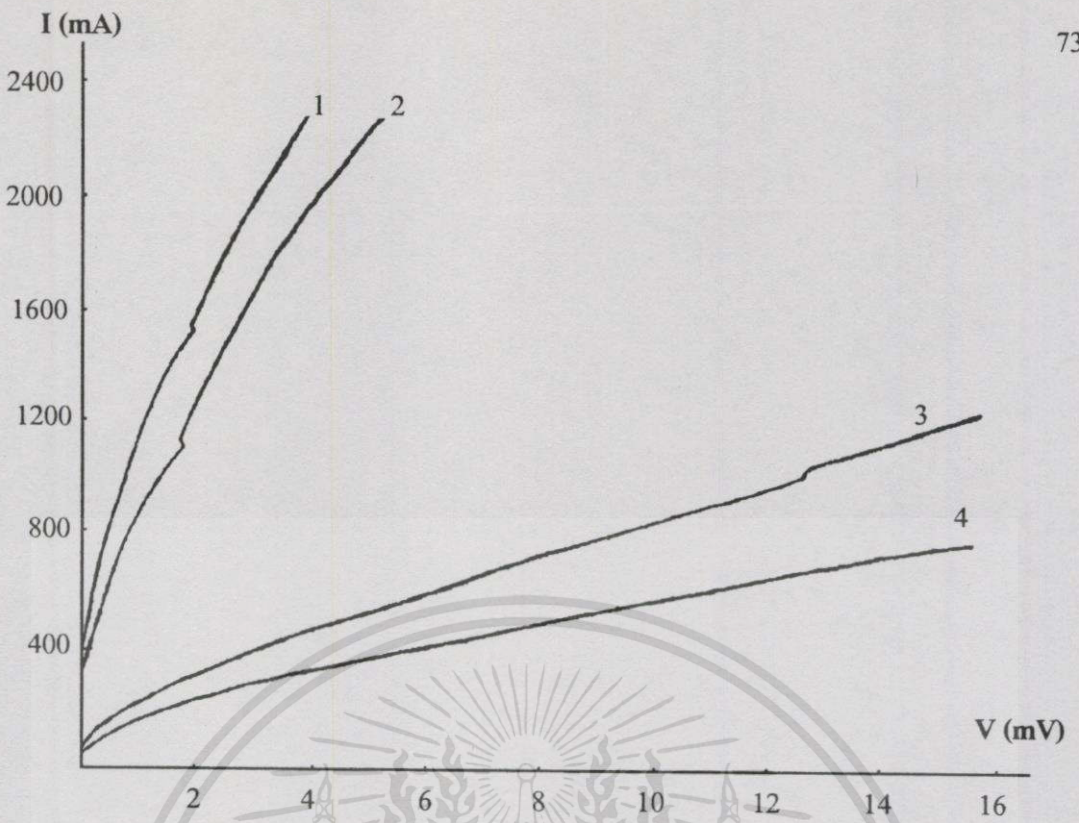
### 4.5.3 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-5

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 พบว่า ในรูปแบบ 1 และ 2 ได้กราฟในลักษณะเดียวกัน โดยเกิด Step ขึ้น 1 Step อยู่ที่ตำแหน่งแรงดันใกล้เคียงกัน ในรูปแบบ 1 มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 440 mA ตำแหน่งของ Step อยู่ที่ค่ากระแส 1496 mA แรงดัน 2.0 mV ส่วนในรูปแบบ 2 มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 360 mA ตำแหน่งของ Step อยู่ที่ค่ากระแส 1110 mA แรงดัน 1.8 mV ส่วนรูปแบบ 3 นั้นค่ากระแสวิกฤตลดลงอย่างมากเหลือ 77 mA และเส้นกราฟจะมี Step เกิดขึ้นจำนวน 1 Step เช่นเดียวกัน และรูปแบบ 4 มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 52 mA ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีค่ากระแสวิกฤตน้อยที่สุดและมีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารมากที่สุด เส้นกราฟในช่วงที่เกิดแรงดันตกคร่อมจะไม่มี Step เกิดขึ้น ค่าแรงดันตกคร่อมในรูปแบบ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในรูปแบบ 3 และ 4 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก

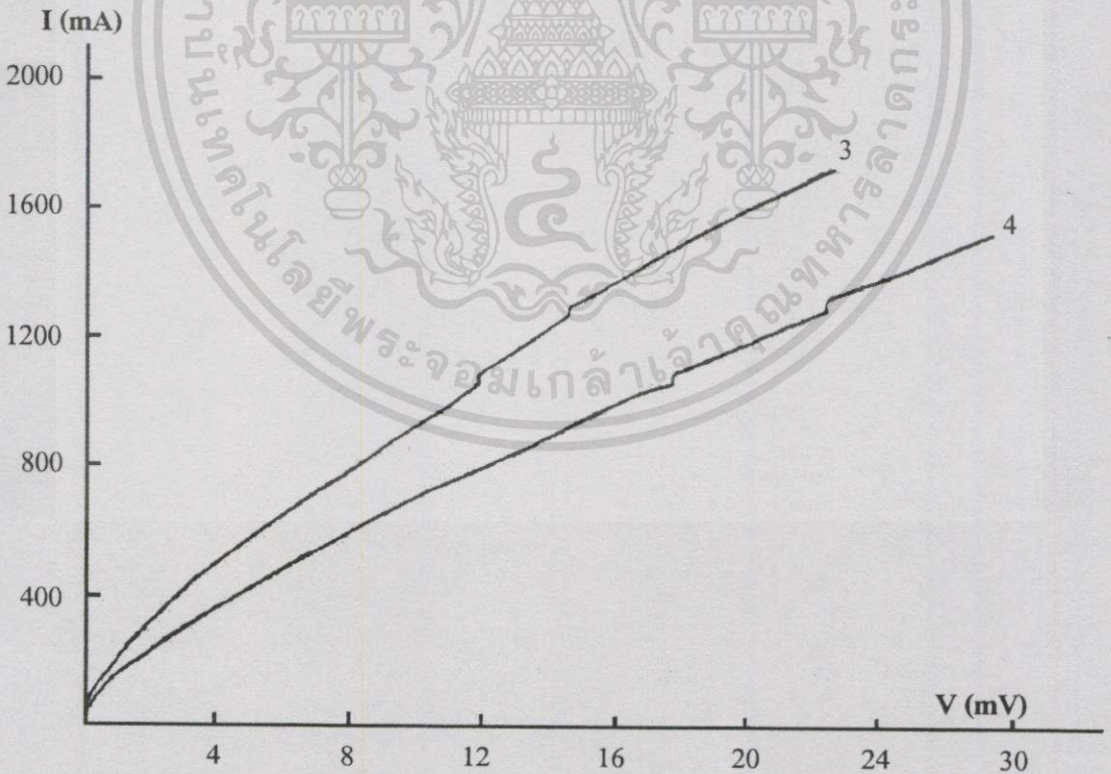
เนื่องจากการวัดระหว่างขั้ว 2-5 เป็นการวัดที่มีลักษณะการวัดค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารคล้ายกับการวัดระหว่างขั้ว 2-3 รูปแบบ 4 จึงควรมี Step เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจึงทำการขยายช่วงแรงดันเพิ่มขึ้น จึงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อวัดค่าแรงดันเพิ่มขึ้น จะได้ Step จำนวน 2 Step อยู่ที่ตำแหน่งกระแส 1080 mA แรงดัน 12.00 mV ตำแหน่งตัวที่สองของ Step คือ กระแส 1280 mA แรงดัน 14.80 mV ส่วนรูปแบบ 4 พบ 2 Step เช่นเดียวกัน ตำแหน่งแรก ของ Step อยู่ที่กระแส 1082 mA แรงดัน 18.00 mV ตำแหน่งที่สองพบที่กระแส 1330 mA แรงดัน 22.80 mV



รูปที่ 4.17 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 ในชั้นสาร YBCO/GBCO  
4 รูปแบบ



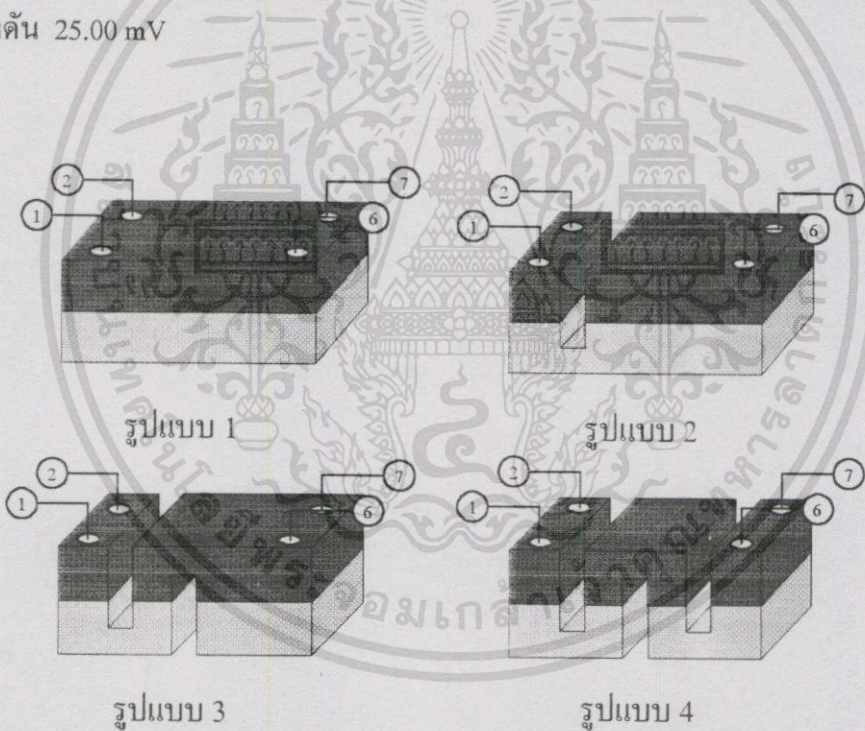
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 (ต่อ) ในชั้นสาร YBCO/GBCO  
รูปแบบ 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

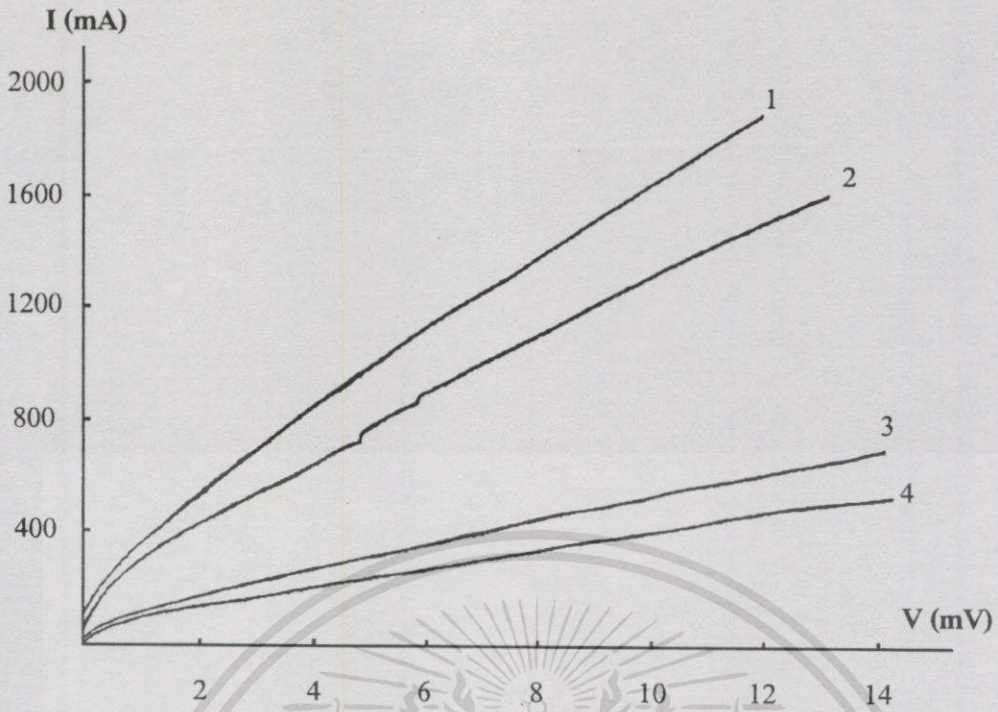
#### 4.5.4 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 พบว่าในรูปแบบ 1 เกิดเส้นกราฟในลักษณะของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่ว ๆ ไป โดยมีกระแสวิกฤตเท่ากับ 120 mA ในรูปแบบ 2 เส้นกราฟเกิด 2 Step อยู่ที่ตำแหน่งกระแส 730 mA แรงดัน 4.80 mV อีกตำแหน่งอยู่ที่กระแส 880 mA และ 5.87 mV ในรูปแบบ 3 และ 4 เส้นกราฟค่าแรงดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และไม่มี Step เกิดขึ้น แต่เนื่องจากการวัดแรงดันนี้คล้ายกับการวัดระหว่างขั้ว 2-4 จึงน่าจะมี Step เกิดขึ้นเหมือนกัน จึงได้ทำการขยายช่วงการวัดค่าแรงดันเพิ่มขึ้น และได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 4.22

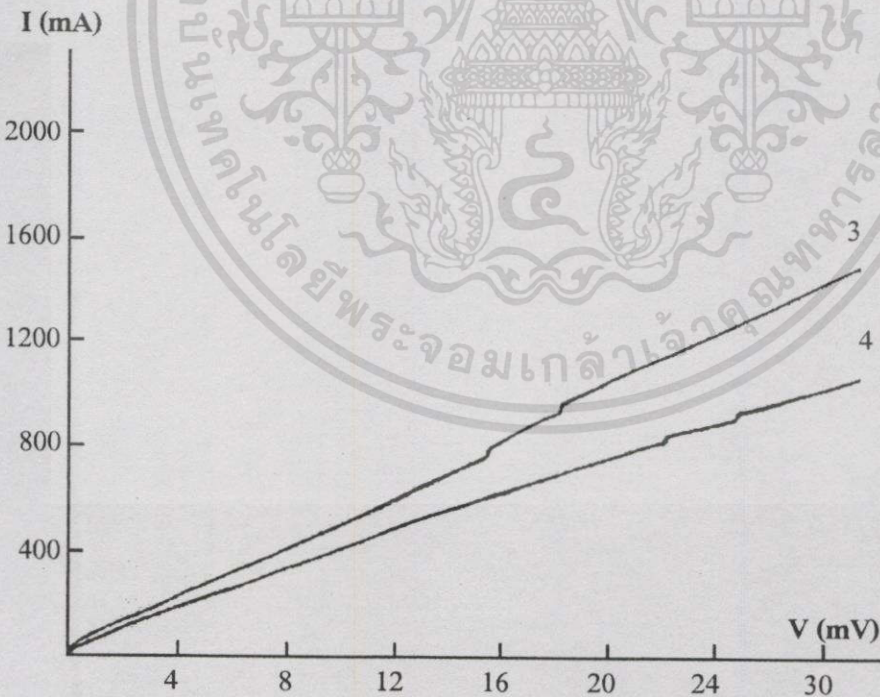
เมื่อทำการวัดซ้ำจากชิ้นสารรูปแบบ 3 และ 4 ต่างก็มี Step เกิดขึ้นบนกราฟกระแสกับแรงดันจำนวน 2 Step ด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยรูปแบบ 3 มีตำแหน่ง Step ที่กระแส 786 mA แรงดัน 15.7 mV ตำแหน่งที่สอง คือ กระแส 957 mA แรงดัน 18.40 mV ส่วนรูปแบบ 4 ตำแหน่ง Step แรก คือ กระแส 828 mA แรงดัน 22.28 mV ส่วนตำแหน่งของ Step ตัวที่สองคือ กระแส 928 mA แรงดัน 25.00 mV



รูปที่ 4.20 รูปร่างและการบัดกรี เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ในชิ้นสาร YBCO/GBCO 4 รูปแบบ



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 ในชั้นสาร YBCO/GBCO  
4 รูปแบบ

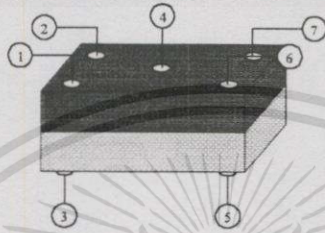


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 (ต่อ) ในชั้นสาร YBCO/GBCO  
รูปแบบ 3 และ 4

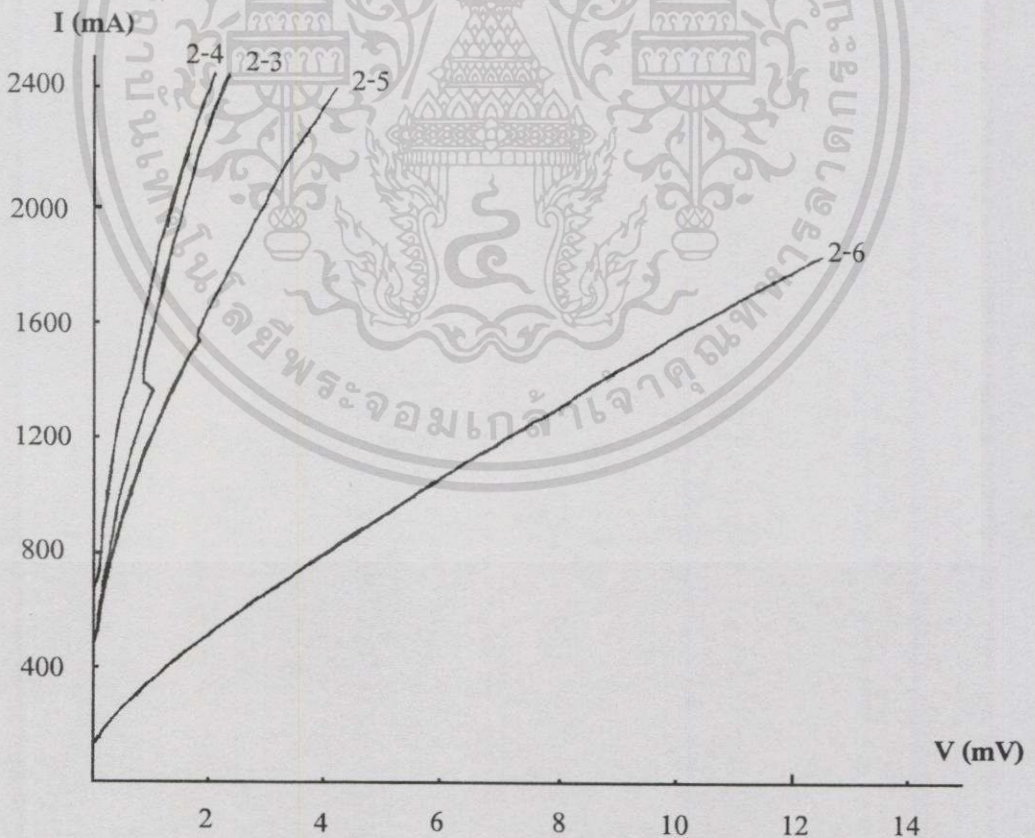
## 4.6 ผลของการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วในแต่ละรูปแบบ

### 4.6.1 รูปแบบ 1

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่า แรงดันที่วัดจากขั้ว 2-4 จะให้กระแสแฉกที่สูงสุด และค่าแรงดันตกคร่อมขั้วมีค่าน้อยกว่าการวัดแรงดันจากขั้วอื่น ๆ รูปแบบ 1 เมื่อวัดจากขั้ว 2-4 และขั้ว 2-6 จะไม่มี Step เกิดขึ้นต่างจากเมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 และ 2-5 คือจะมี Step ของกระแสเกิดขึ้นจำนวน 1 Step ตำแหน่งของ Step จากขั้ว 2-5 มีค่ามากกว่าขั้ว 2-3 แต่ไม่ต่างกันมากนัก ค่าแรงดันตกคร่อมจากขั้ว 2-6 มีค่ามากกว่าขั้วอื่น ๆ มาก



รูปที่ 4.23 รูปร่างและการบัดกรีขั้วในรูปแบบ 1 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ

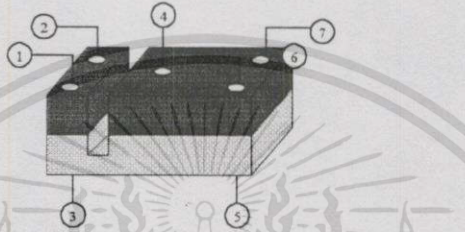


รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ ในชิ้นสาร YBCO/GBCO รูปแบบ 1

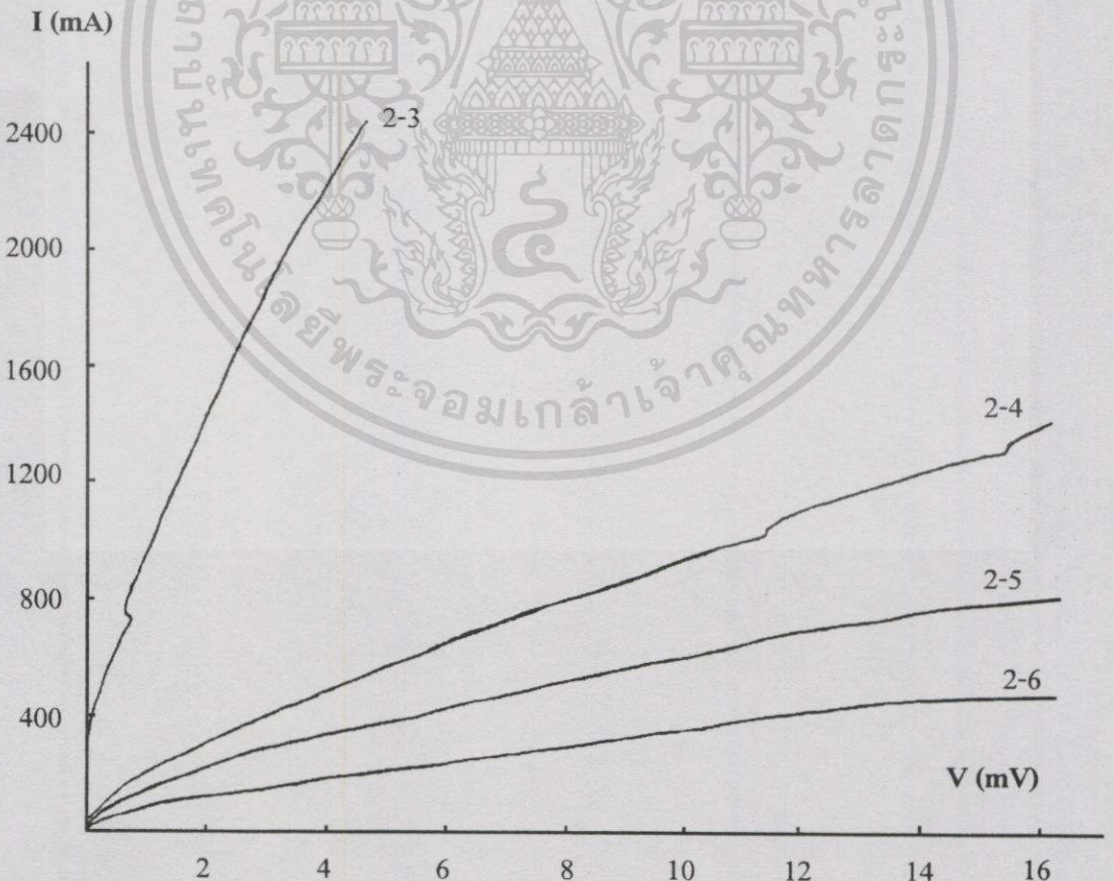
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 รูปแบบ 2

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าเส้นกราฟจากการวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 และ 2-5 ในรูปแบบ 2 มีลักษณะใกล้เคียงกัน คือ มี Step เกิดขึ้น 1 Step แต่ตำแหน่งกระแสของ Step จากขั้ว 2-3 อยู่สูงกว่าแต่ค่าแรงดันของ Step มีค่าน้อยกว่า ส่วนขั้ว 2-5 มีค่ากระแสวิกฤตน้อยกว่าขั้ว 2-3 เส้นกราฟจากขั้ว 2-5 จะมีค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารเพิ่มขึ้นมากกว่าขั้ว 2-3 ส่วนขั้ว 2-3 กับ 2-4 จะให้ค่าแรงดันใกล้เคียงกันซึ่งต่างจากค่าแรงดันจากขั้ว 2-6 ซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้ตำแหน่งของ Step เปลี่ยนแปลงไปด้วย ส่วนขั้ว 2-4 และ 2-6 มี Step กระแสเกิดขึ้น จำนวน 2 Step แต่ต่างกันที่ตำแหน่งของ Step และขั้ว 2-6 มีค่ากระแสวิกฤตต่ำสุด



รูปที่ 4.25 รูปร่างและการบัดกรีขั้วในรูปแบบ 2 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้วต่างๆ



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่างๆ ในชิ้นสาร YBCO/GBCO

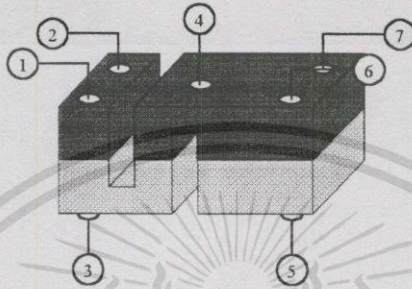
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปแบบ 2

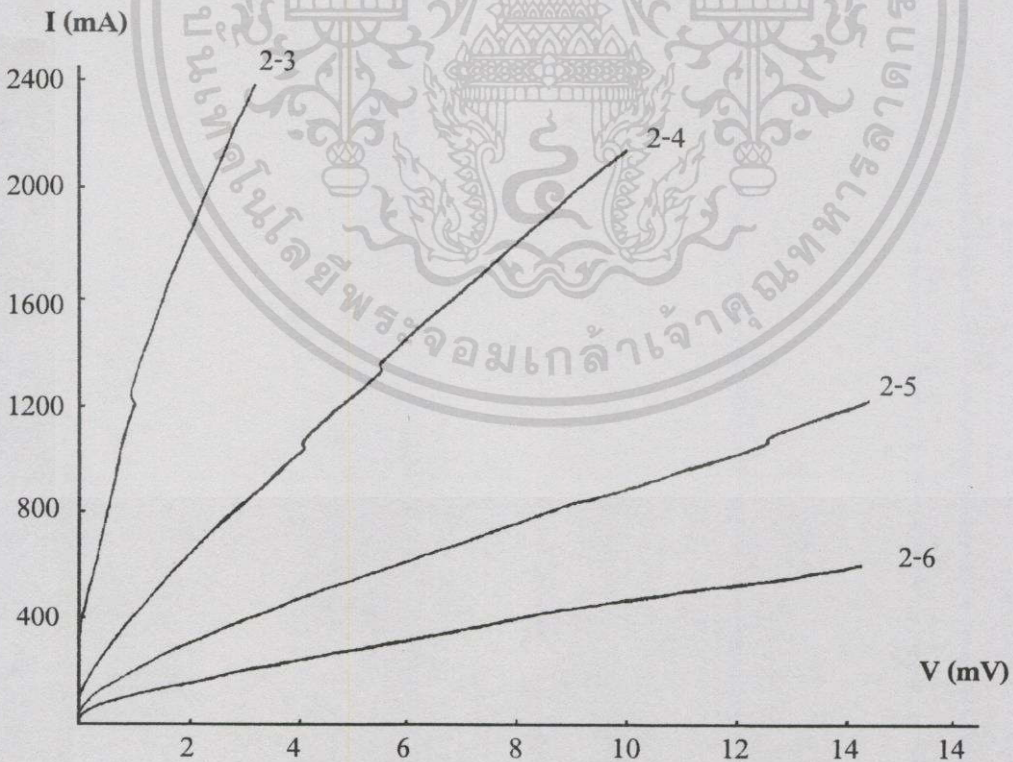
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.6.3 รูปแบบ 3

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าเส้นกราฟ 2-3 และ 2-5 ยังให้ลักษณะเส้นกราฟคล้ายๆ กัน โดยเกิด 1 Step โดยขั้ว 2-3 จะมีค่ากระแสแสวิกจุดสูงสุด ส่วนแรงดันระหว่างขั้ว 2-4, 2-5 และ 2-6 มีกระแสแสวิกลดต่ำลงตามลำดับ ค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 มีการเกิด 2 Step ค่าแรงดันของขั้ว 2-4 อยู่ระหว่างค่าแรงดันขั้ว 2-3 และ 2-5 และค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 จะมีค่าแรงดันมากที่สุดและกระแสแสวิกต่ำสุด



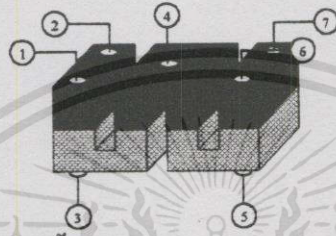
รูปที่ 4.27 รูปร่างและการบัดกรีขั้วในรูปแบบ 3 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้วต่างๆ



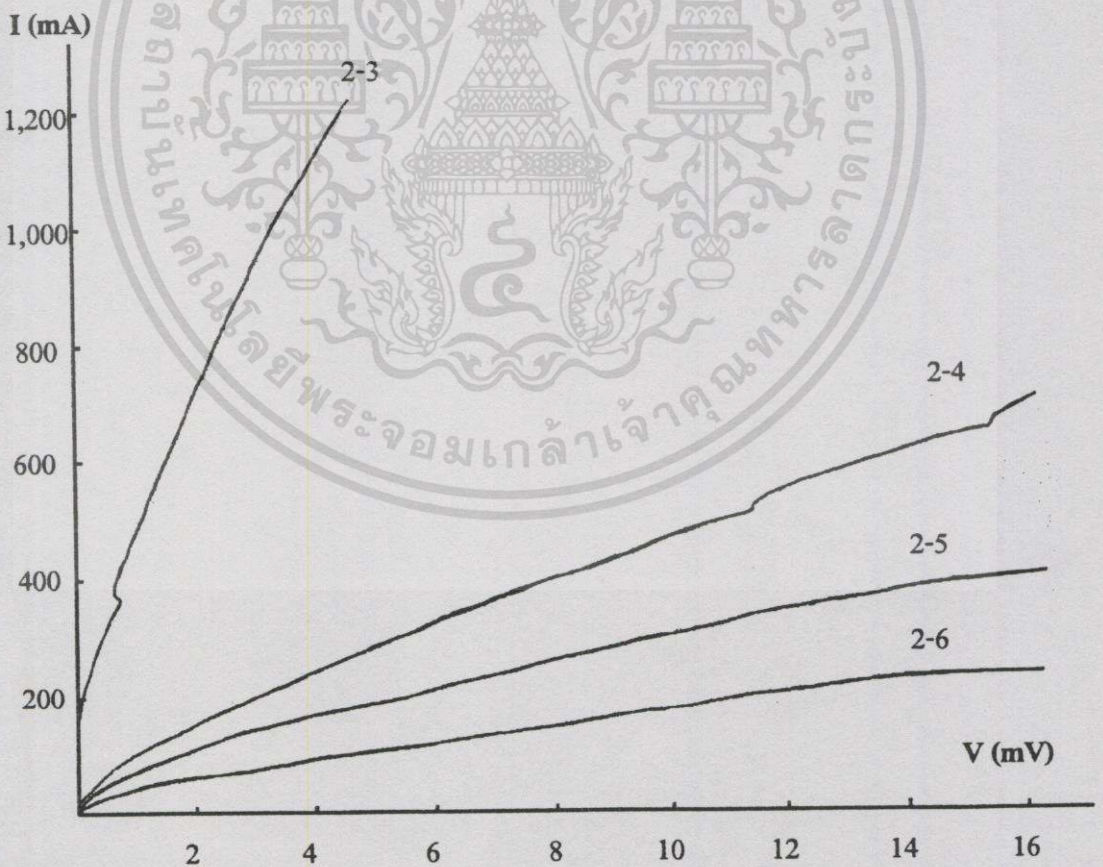
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่างๆ ในชิ้นสาร YBCO/GBCO รูปแบบ 3

#### 4.6.4 รูปแบบ 4

จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 พบว่าเส้นกราฟระหว่างขั้ว 2-3 ยังให้ลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากนัก มีค่ากระแสวิกฤตสูงที่สุด และมีค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารน้อยสุด เกิด Step ของกระแส จำนวน 1 Step ส่วนแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ก็ยังเหมือนเดิม มีค่ากระแสวิกฤตลดลงจากขั้ว 2-3 อย่างชัดเจน จะมี Step ของกระแสจำนวน 2 Step แต่ตำแหน่งของ Step เปลี่ยนแปลงด้วยค่าแรงดันที่เพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสวิกฤตของขั้ว 2-5 และ 2-6 ลดลงตามลำดับ ค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างขั้ว 2-4 , 2-5 และ 2-6 มีค่าเพิ่มอย่างมาก โดยเฉพาะขั้ว 2-6 มีค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารมากที่สุดและกระแสวิกฤตต่ำสุด



รูปที่ 4.29 รูปร่างและการบัดกรีชิ้นสารในรูปแบบ 4 ของชิ้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันระหว่างขั้วต่างๆในชิ้นสาร YBCO/GBCO รูปแบบ 4

จากการทดลองหาผลของค่าแรงดันและรูปแบบต่าง ๆ กันของชั้นสาร YBCO/GBCO ที่มีผลต่อลักษณะของการเกิด Step บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบและการวัดขั้วต่าง ๆ

ชั้นสาร YBCO/GBCO	$I_c$ (mA)			
	ขั้ว 2-3	ขั้ว 2-4	ขั้ว 2-5	ขั้ว 2-6
รูปแบบ 1	550	650	440	120
รูปแบบ 2	550	400	360	80
รูปแบบ 3	375	125	77	27
รูปแบบ 4	375	45	52	13

ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งของ Step ของชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ในรูปแบบและการวัดขั้วต่าง ๆ

ชั้นสาร YBCO/GBCO		1 <sup>st</sup> Step		2 <sup>nd</sup> Step	
		I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)
ขั้ว 2-3	รูปแบบ 1	1375	1.10	-	-
	รูปแบบ 2	1325	1.13	-	-
	รูปแบบ 3	1200	1.00	-	-
	รูปแบบ 4	750	0.87	-	-
ขั้ว 2-4	รูปแบบ 1	-	-	-	-
	รูปแบบ 2	1050	0.80	1325	1.00
	รูปแบบ 3	1075	4.40	1375	5.87
	รูปแบบ 4	1070	12.30	1360	16.50
ขั้ว 2-5	รูปแบบ 1	1496	2.00	-	-
	รูปแบบ 2	1110	1.80	-	-
	รูปแบบ 3	1080	12.00	1280	14.80
	รูปแบบ 4	1080	18.00	1330	22.80
ขั้ว 2-6	รูปแบบ 1	-	-	-	-
	รูปแบบ 2	730	4.80	880	5.87
	รูปแบบ 3	786	15.70	957	18.40
	รูปแบบ 4	828	22.28	928	25.00

จากผลของการวัดค่าแรงดันและรูปแบบต่าง ๆ พบว่าเมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 จะเป็นการวัดรอยต่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดที่ทำให้ตำแหน่งของ Step กระแส 1 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นการวัดค่าแรงดันของกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ 1 ครั้ง เมื่อเปลี่ยนรูปแบบจาก 1 เป็น 2, 3 และ 4 แล้วตำแหน่งของแรงดัน Step ไม่ต่างกันมาก จะต่างกันที่ตำแหน่งของกระแสเกิดลดลงเมื่อเปลี่ยนรูปร่างเป็น 2, 3 และ 4 จากการที่ค่าแรงดันของ Step มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการวัดเฉพาะขั้ว 2-3 ส่วนค่ากระแสวิกฤตในรูปแบบ 1 และ 2 มีค่าเท่ากัน ส่วนในรูปแบบ 3 และ 4 มีค่าเท่ากัน เนื่องจากในรูปแบบ 3 เป็นรูปแบบที่บังคับการไหลของกระแสให้ไหลผ่านจากชั้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดแบบ YBCO ไปชั้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดแบบ GBCO ซึ่งทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารเพิ่มขึ้นและตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดแบบ GBCO เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดที่ให้กระแสวิกฤตน้อยอยู่แล้ว ดังนั้น การวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 เป็นการกำหนดการเกิดของ Step จำนวน 1 ตำแหน่ง ด้วยค่าแรงดันของ Step ที่ค่อนข้างแน่นอน

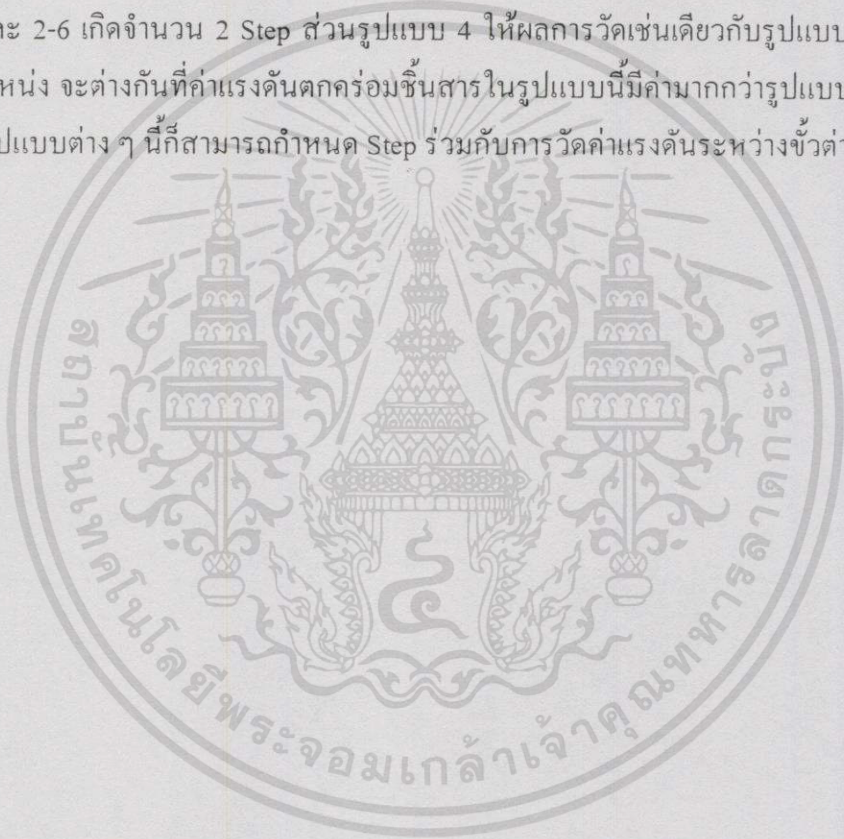
เมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ในรูปแบบ 1 จะให้ค่าแรงดันตกคร่อมน้อยสุด เนื่องจากเป็นกระแสไหลได้สะดวกที่สุด และเกิด Step ของกระแสจำนวน 2 ตำแหน่งในรูปแบบ 2, 3 และ 4 ตำแหน่งกระแสของการเกิด Step นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 รูปแบบแต่ค่าแรงดันของ Step จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากรูปแบบทั้งสามรูปแบบเป็นการกำหนดให้กระแสไหลผ่านรอยต่อต่างชนิด 2 ครั้งในเวลาเดียวกัน จึงทำให้เกิดตำแหน่ง Step เพียงสองตำแหน่งเท่านั้น รูปแบบทั้งสี่นี้มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตด้วย โดยทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลงจากรูปแบบ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สำหรับรูปแบบ 3 ค่ากระแสวิกฤตลดต่ำลงอย่างมากจากรูปแบบ 2 เนื่องจากการบังคับให้กระแสไหลผ่านจากชั้นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดแบบ YBCO ผ่านไปยังชั้นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดแบบ GBCO ดังนั้นในการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ในรูปแบบ 2, 3 และ 4 เป็นการกำหนดให้เกิด Step ของกระแสจำนวน 2 ตำแหน่ง

เมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-5 จะให้ผลคล้ายๆ กับการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 คือเกิดมี Step เกิดจำนวน 1 ตำแหน่งเช่นเดียวกันเมื่ออยู่ในรูปแบบ 1 และ 2 จะต่างกันที่ค่าแรงดันของ Step มีค่ามากกว่าและจะแบ่งกลุ่มค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างรูปแบบ 1,2 กับรูปแบบ 3, 4 อย่างชัดเจน ส่วนรูปแบบ 3 และ 4 มี Step เกิดขึ้นบนเส้นกราฟจำนวน 2 Step เมื่อขยายช่วงของแรงดัน การเพิ่มของจำนวน Step เกิดขึ้นเนื่องจากรูปแบบ 3 ระหว่างการวัดขั้ว 2-5 นั้นเป็นรูปแบบที่บังคับให้กระแสไหลผ่านรอยต่อต่างชนิด 2 ครั้ง จึงทำให้เกิดมี Step 2 ตำแหน่งเช่นเดียวกับรูปแบบ 2 และ 4 แต่ค่าแรงดันของ Step ในกรณีนี้มากกว่า ดังนั้นในการวัดระหว่างขั้ว 2-5 จากรูปแบบ 2, 3 และ 4 นี้สามารถกำหนดการเกิด Step ได้ทั้ง 1 ตำแหน่งและ 2 ตำแหน่งได้ ซึ่งเป็นรูปแบบที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

เมื่อวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-6 จะให้ผลคล้าย ๆ กับการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-4 ซึ่งเป็นการวัดค่าแรงดันในลักษณะเดียวกันกับขั้ว 2-4 ดังนั้นการเกิด Step ของกระแสจะมี 2 ตำแหน่ง

เห็นได้ชัดเจนจากรูปแบบ 2 ส่วนรูปแบบ 3 และ 4 ต้องขยายช่วงการวัดของค่าแรงดันจึงพบ Step จำนวน 2 ตำแหน่ง อีกทั้งในการวัดระหว่างข้อ 2-6 จะให้ค่าแรงดันตกคร่อมมากกว่าการวัดค่าแรงดันระหว่างข้อ 2-3 และข้ออื่นๆ ทั้งหมด ดังนั้นการวัดแรงดันระหว่างข้อ 2-6 ก็สามารถกำหนดการเกิด Step ของกระแสจำนวน 2 ตำแหน่งเช่นเดียวกับข้อ 2-4 เพียงแต่ค่าแรงดันมากกว่าเท่านั้น

ส่วนผลของรูปแบบที่มีต่อการเกิด Step นั้น รูปแบบ 1 สามารถกำหนด Step ได้เฉพาะข้อ 2-3 และ 2-5 เท่านั้นและค่าแรงดันของ Step ในกรณีนี้มีค่าน้อยกว่ากรณีอื่นๆ มาก ส่วนรูปแบบ 2 สามารถกำหนด Step ได้ทั้ง 1 ตำแหน่งจากการวัดระหว่างข้อ 2-3 และ 2-5 หรือ 2 ตำแหน่งจากการวัดข้อแรงดันระหว่างข้อ 2-4 และ 2-6 ค่าแรงดันของ Step ทั้งสองต่างกันมาก ในรูปแบบ 3 ก็สามารถกำหนดการเกิด Step ได้เช่นเดียวกัน โดยเกิด 1 ตำแหน่งเฉพาะในข้อ 2-3 เท่านั้น ส่วนข้อ 2-4, 2-5 และ 2-6 เกิดจำนวน 2 Step ส่วนรูปแบบ 4 ให้ผลการวัดเช่นเดียวกับรูปแบบ 2 คือเกิด 1 และ 2 ตำแหน่ง จะต่างกันที่ค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารในรูปแบบนี้มีค่ามากกว่ารูปแบบอื่นๆ ดังนั้นในการในรูปแบบต่างๆ นี้ก็สามารถกำหนด Step ร่วมกับการวัดค่าแรงดันระหว่างข้อต่างๆ กันได้



# แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ YBCO/GBCO

การนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานนั้นมีการนำไปใช้ได้ 2 แนวทางใหญ่ ๆ คือ อุปกรณ์ขนาดใหญ่และอุปกรณ์ขนาดเล็ก แต่ในแนวทางการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ไปประยุกต์ใช้นั้นจะเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็ก เนื่องจากรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO มีลักษณะของรอยต่อโจเซฟสัน ซึ่งสามารถเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันขึ้นได้ คุณสมบัติของรอยต่อโจเซฟสันส่วนมากนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมากด้วยลักษณะเด่นที่สำคัญ คือ ไม่มีความต้านทาน ไม่มีการสูญเสียพลังงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ความสำคัญของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือรอยต่อโจเซฟสันในการนำไปประยุกต์ใช้งานมีอยู่สองลักษณะ คือ

1. การเปลี่ยนสภาพจากสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นสถานะนำไฟฟ้าปกติ ซึ่งในการเปลี่ยนสภาพของสถานะจะเกิดได้เร็วมาก มีความไวอยู่ในระดับพิโค เพราะว่าแรงดันตกคร่อมในรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ ตัวอย่างของการนำไปใช้งาน ได้แก่ ตัวตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ เช่น ตัวตรวจจับสัญญาณแม่เหล็กหรือสัญญาณทางแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวตรวจจับอุณหภูมิ ตัวตรวจจับแสงในย่านสูง ๆ ซึ่งได้มีการวิจัยตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าและหัววัดสนามแม่เหล็กมาแล้ว สัญญาณที่ใช้ตรวจจับเหล่านี้สามารถนำมาตรวจจับได้ในย่านที่กว้างมาก และสามารถตรวจจับได้ทั้งสัญญาณที่มีความถี่ต่ำและสูง โดยหลักการทำงานของตัวตรวจจับนี้คือ ขณะที่ให้กระแสไบอัสค่าหนึ่งกับอุปกรณ์รอยต่อนี้ เมื่อมีสัญญาณมากระทำกับอุปกรณ์รอยต่อนี้จะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของอุปกรณ์รอยต่อเสียสภาพไป เกิดมีแรงดันตกคร่อมขึ้นหรืออยู่ในสถานะนำไฟฟ้าปกติได้ ถึงแม้ว่าสัญญาณที่มากระทำจะต่ำมาก อุปกรณ์นี้ก็สามารถตรวจจับได้

2. เมื่ออยู่ในสถานะตัวนำไฟฟ้าปกติหรือรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว หลักการทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน คือ เมื่อให้กระแสไบอัสค่าหนึ่งที่เกิดขึ้นค่ากระแสวิกฤตแล้วจะเกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นมีกระแสสลับเกิดขึ้นด้วยค่าความถี่ตามสมการของ  $V = (h\omega/2e)$  และมีกระแสตรงโจเซฟสันเกิดขึ้นและไหลผ่านรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อเฟสของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเปลี่ยนไปตามเวลา อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการนำไปใช้งาน ได้แก่ SIS Mixer แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ออสซิลเลเตอร์ และแรงดันมาตรฐาน เป็นต้น

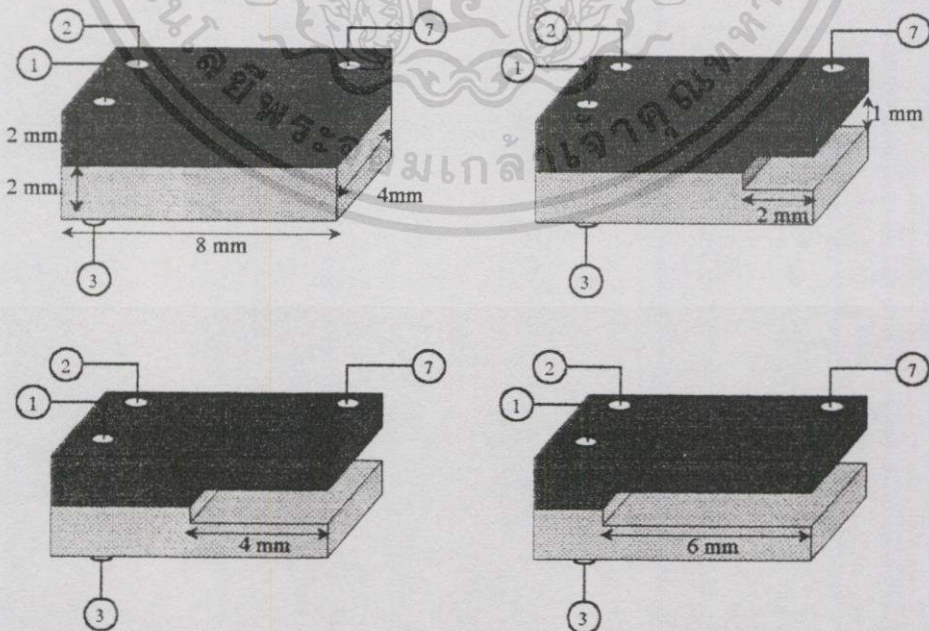
## 5.1 แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

ในการเกิด Step บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO สามารถทำการทดลองเพื่อศึกษาเป็นแนวทางในการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งาน โดยจะทำการผลของพื้นที่รอยต่อและผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะการเกิด Step โดยทำการทดลองดังต่อไปนี้

### 5.1.1 การทดลองผลของพื้นที่รอยต่อที่มีต่อลักษณะ Step ของชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

จากรูปแบบและลักษณะการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ กัน ที่มีการศึกษามาแล้วนั้นสามารถกำหนดจำนวน Step ระหว่าง 1 หรือ 2 Step ได้ และสามารถเลือกกำหนดค่าแรงดันได้ว่าต้องการค่าน้อยหรือมาก ซึ่ง Step นี้เกิดจากชั้นสารที่มีลักษณะเป็นรอยต่อต่างชนิดกันระหว่าง YBCO/GBCO ดังเช่นผลการทดลองที่ผ่านมา ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาลักษณะรอยต่อต่างชนิด YBCO/GBCO ที่มีผลต่อการเกิดของ Step บนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เราจะทำการศึกษาถึงพื้นที่ของรอยต่อดังต่อไปนี้

ในการทดลองครั้งนี้จะนำชั้นสาร YBCO/GBCO ที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วมาทำการตะไบชั้นสารและบัดกรีขั้วดังแสดงในรูปที่ 5.1 ในการตะไบพื้นที่จะตะไบออกด้านยาวครึ่งละ 2 มิลลิเมตร กว้าง 1 มิลลิเมตร เราจะตะไบเฉพาะด้านข้าง แล้วทำการวัดวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน จะให้กระแสเข้าที่ขั้ว 1-7 แล้ววัดค่าแรงดันเฉพาะขั้ว 2-3 ซึ่งการวัดระหว่างขั้ว 2-3 ทุกครั้งจะทำให้เกิด Step ของกระแสจำนวน 1 ตัวหนึ่งทุกครั้ง



รูปที่ 5.1 รูปร่างและการบัดกรีชั้นสารในรูปแบบ 4 ของชั้นสาร YBCO/GBCO เมื่อวัดผลของพื้นที่รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีต่อการเกิด Step

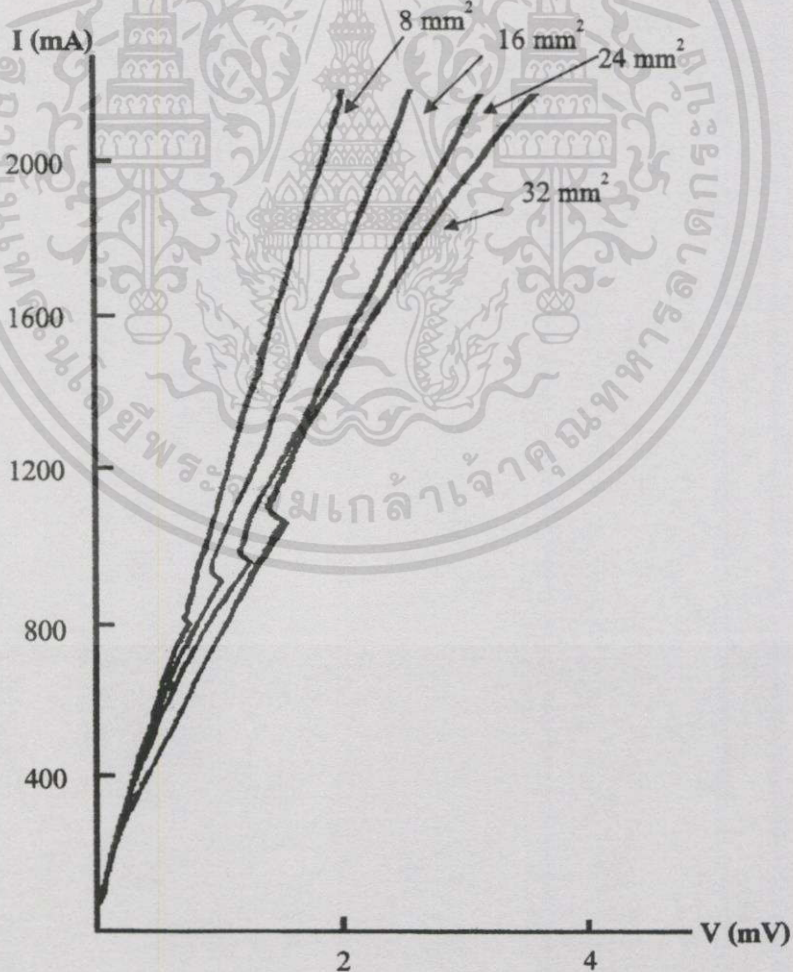
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

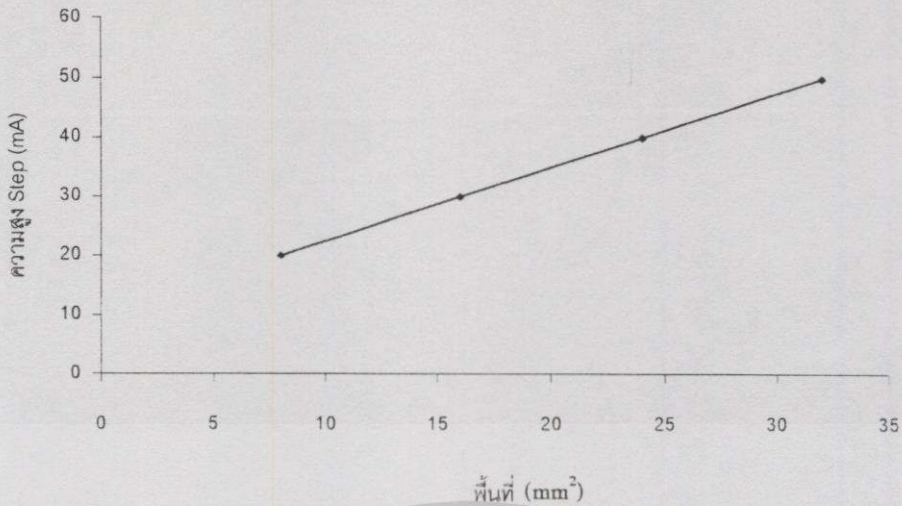
### 5.1.2 ผลของพื้นที่รอยต่อที่มีต่อลักษณะ Step ของชั้นสาร YBCO/GBCO

จากผลรูปที่ 5.2 จะได้เส้นกราฟ 4 เส้นในลักษณะใกล้เคียงกัน คือ เกิดมี 1 Step ในตำแหน่งของการเกิด Step เมื่อยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ ตำแหน่งของการเกิด Step จะอยู่ที่ค่ากระแส 1090 mA แรงดัน 1.60 mV ความสูงของ Step 50 mA เมื่อทำการตะไบพื้นที่ออกเหลือ  $24 \text{ mm}^2$  กระแสเหลือ 981 mA แรงดัน 1.29 mV ความสูงของ Step 40 mA เมื่อทำการตะไบอีก เหลือพื้นที่  $16 \text{ mm}^2$  กระแสมีค่า 936 mA แรงดัน 1.05 mV ความสูงของ Step 30 mA และเมื่อพื้นที่ลดลงเหลือ  $8 \text{ mm}^2$  กระแสเหลือ 818 mA แรงดัน 0.80 mV ความสูงของ Step ลดเหลือ 20 mA ซึ่งพื้นที่ของรอยต่อมีผลต่อความสูงของ Step ที่เกิดขึ้น โดยเมื่อพื้นที่รอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสูงของ Step เพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.3

ส่วนค่ากระแสวิกฤตที่ได้จากกราฟนั้นก็มีความเท่ากันและเมื่อทำการให้ค่ากระแสมากกว่ากระแสวิกฤตจะเกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้นในลักษณะเดียวกัน แต่ต่างจากการทดลองทั่วไปของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ ตะไบพื้นที่ของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดลดลงแล้วค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารรอยต่อจะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อพื้นที่ของรอยต่อเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของ Step กับพื้นที่รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

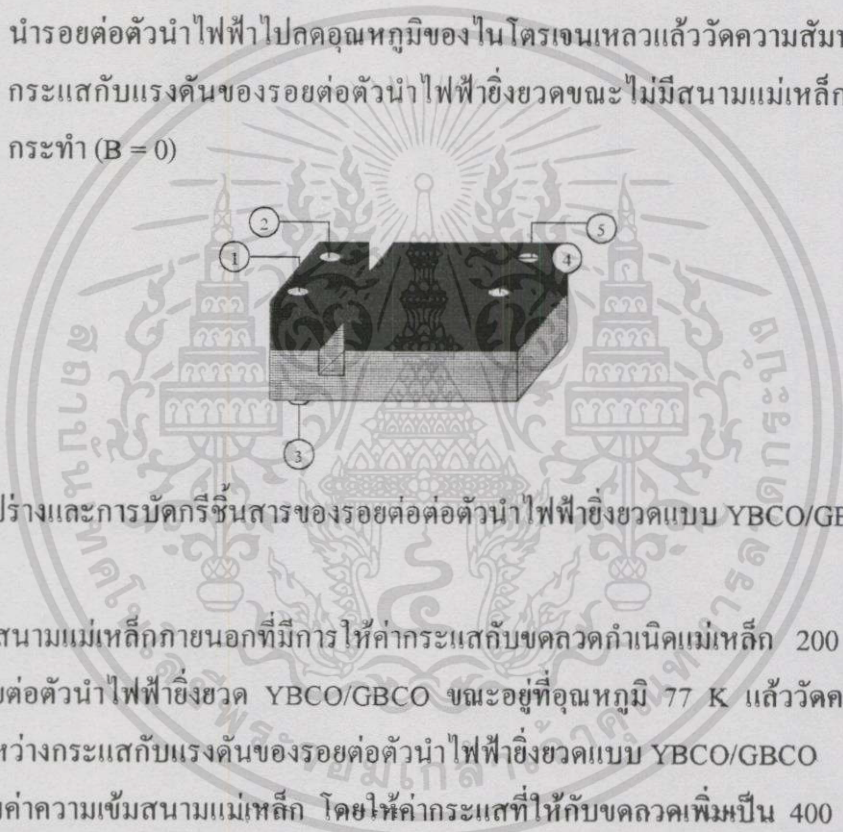
คุณสมบัติที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ คุณสมบัติทางแม่เหล็ก จึงได้ทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงลักษณะของ Step ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับชิ้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของความเข้มของสนามแม่เหล็ก

การเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กให้กับรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้นจนเกินค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต จะเป็นการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทำให้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเกิดขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะเกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นในเนื้อสารเมื่อมีสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ค่าแรงดันที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดลองดังกล่าวนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะการเกิดของ Step จากรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ตามรูปแบบที่กำหนด ขณะที่มอทธิพลของสนามแม่เหล็ก เพื่อเป็นใช้เป็นแนวทางในการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

### 5.1.3 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะการเกิดของ Step

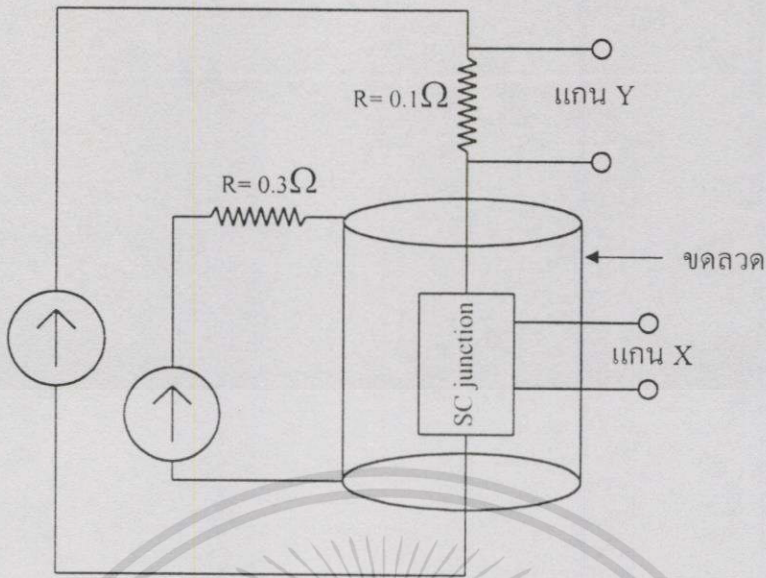
การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการเกิด 1 และ 2 Step โดยศึกษาดังต่อไปนี้

1. เตรียมชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ตามกระบวนการสร้าง พร้อมกับทำการทดสอบคุณสมบัติของความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อผ่านกระบวนการเผาแล้วนำมาขึ้นรูปชั้นสารพร้อมบัคกรีซั้วดังรูปที่ 5.4
2. เตรียมวงจรดังในรูปที่ 5.5 ทำการให้กระแสเข้าที่ขั้ว 1 และ 5 ของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO แล้ววัดค่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ YBCO/GBCO ที่ขั้ว 2-3
3. วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 ของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้อง
4. นำรอยต่อตัวนำไฟฟ้าไปทดสอบอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวแล้ววัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขณะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ ( $B = 0$ )



รูปที่ 5.4 รูปร่างและการบัคกรีซั้วของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

5. ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีการให้ค่ากระแสกับขดลวดค่าเน็คแม่เหล็ก 200 mA กับรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBCO/GBCO ขณะอยู่ที่อุณหภูมิ 77 K แล้ววัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO
6. เพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยให้ค่ากระแสที่ให้กับขดลวดเพิ่มเป็น 400 mA แล้วทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 จากรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
7. ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในชั้นสารเดียวกัน แต่เปลี่ยนขั้วการวัดจากขั้ว 2-3 เป็นขั้ว 2-4 โดยทำการวัดในลักษณะเดียวกันกับการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3



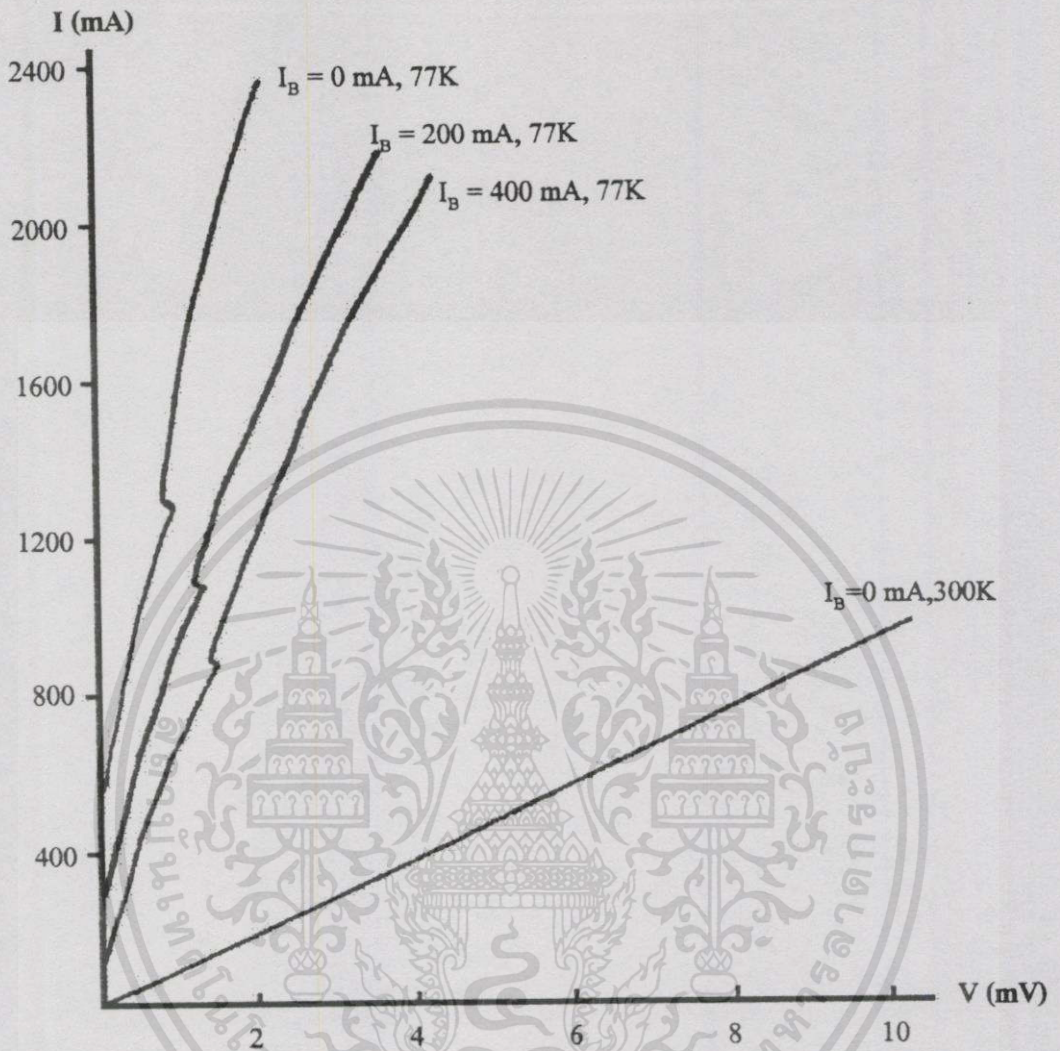
รูปที่ 5.5 วงจรวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก  
มากระทำกับรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

#### 5.1.4 ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะการเกิดของ Step

จากรูปที่ 5.6 เมื่อวัดรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องจะได้กราฟเส้นตรงในลักษณะของตัวนำไฟฟ้าปกติ และเมื่อนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปลดอุณหภูมิด้วยไนโตรเจนเหลวจะทำให้รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเกิดจำนวน 2 Step โดยตำแหน่งของ Step ตัวแรกอยู่ที่ค่ากระแส 1043 mA แรงดัน 1.21 mV ส่วนตำแหน่งตัวที่สองของ Step อยู่ที่กระแส 1356 mA แรงดัน 1.7 mV เมื่อทำการให้สนามแม่เหล็กด้วยการป้อนกระแส 200 mA จะทำให้ค่ากระแสสวิกหลุดลดลงและตำแหน่งทั้งสอง Step ลดลงด้วย ตำแหน่งของ Step ตัวแรกอยู่ที่ 940 mA แรงดัน 1.91 mV และ Step ตัวที่สองอยู่ที่ค่ากระแส 1217 mA แรงดัน 2.78 mV และเมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากระแสสวิกหลุดต่ำลงพร้อมกับ Step ลดต่ำลงด้วย Step ตัวแรกอยู่ที่ค่ากระแส 940 mA แรงดัน 3.47 mV ตัวที่สองอยู่ที่ค่ากระแส 1200 mA แรงดัน 4.82 mV

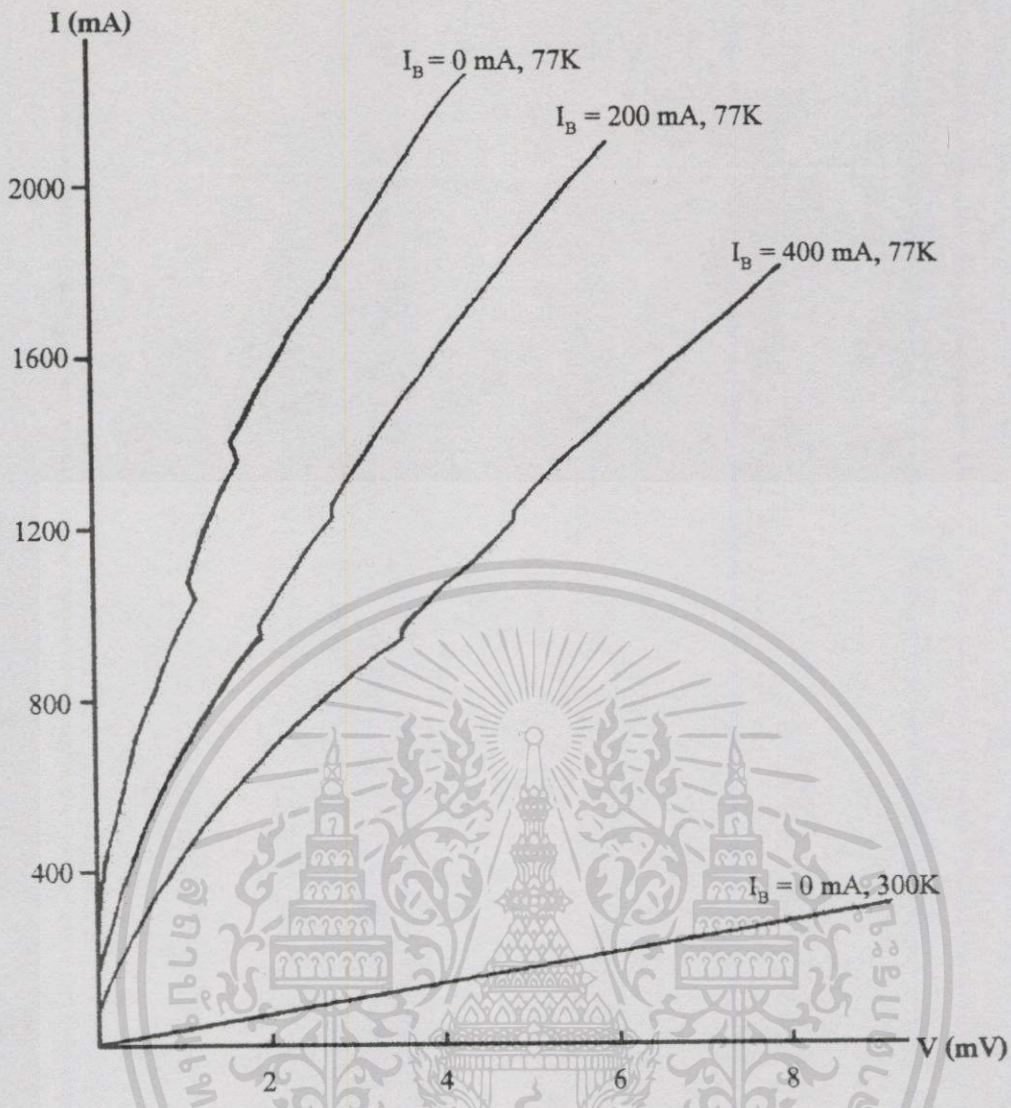
จากรูปที่ 5.7 พบว่าเมื่อวัดรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องจะได้กราฟเส้นตรงในลักษณะของตัวนำไฟฟ้าปกติ และเมื่อนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปลดอุณหภูมิจะทำให้รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเกิดจำนวน 2 Step โดยตำแหน่งของ Step ตัวแรกอยู่ที่ค่ากระแส 1043 mA แรงดัน 1.21 mV ส่วนตำแหน่ง ตัวที่สองของ Step อยู่ที่กระแส 1356 mA แรงดัน 1.7 mV เมื่อทำการให้สนามแม่เหล็กด้วยการป้อนกระแส 200 mA จะทำให้ค่ากระแสสวิกหลุดลดลงและตำแหน่งทั้งสอง Step ลดลงด้วย ตำแหน่งของ Step ตัวแรกอยู่ที่ 940 mA แรงดัน 1.91 mV และ Step ตัวที่สองอยู่ที่ค่ากระแส 1217 mA แรงดัน 2.78 mV และเมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็ก

เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดต่ำลงพร้อมกับ Step ลดต่ำลงด้วย Step ตัวแรกอยู่ที่ค่ากระแส 940 mA แรงดัน 3.47 mV ตัวที่สองอยู่ที่ค่ากระแส 1200 mA แรงดัน 4.82 mV



รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของการเกิด 1 Step จากชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เมื่อมีและไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ

เมื่อวัดรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ขณะอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ค่าสภาพต้านทานของชั้นสารเมื่อวัดระหว่างช่วง 2-3 หรือการเกิด 1 Step จะมีค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารหรือสภาพต้านทานน้อยกว่าการเกิด 2 Step ส่วนเมื่อรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO มีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วลักษณะของ Step ที่เกิดขึ้นทั้ง 1 และ 2 Step จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีค่าสนามแม่เหล็กกระทำและเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีผลทำให้รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO มีค่าแรงดันเพิ่มมากขึ้นหรือสภาพต้านทานในชั้นสารเพิ่มมากขึ้น



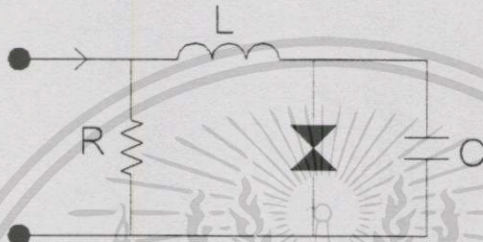
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของการเกิด 2 Step จากชั้นสารรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เมื่อมีและไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำ

5.2 สรุปและวิเคราะห์แนวทางการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งาน

จากการที่พื้นที่ของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีผลต่อความสูงของ Step โดยพื้นที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้ความสูงของ Step เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพื้นที่เพิ่มมากขึ้นค่าของแรงดันตกคร่อมชั้นสารกลับมีค่าน้อยลงหรือกระแสไหลได้มากขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้จากวงจรเสมือนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปแบบวงจลิ่งค์ที่เป็นรอยต่อโจเซฟสันชนิด Josephson Tunneling Junction โดยเป็นวงจรเสมือนทางไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นตัวที่กำหนดการไหลของกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ วงจรเสมือนนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการนำไปอธิบายถึงผลของลักษณะการเกิด Step คือ ผลของพื้นที่รอยต่อที่มีต่อลักษณะการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดของ Step และกระแสที่ไหลผ่านในรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO นี้ โดยเมื่อกระแสไหลผ่านรอยต่อจะเกิดมีการสะสมและคายประจุขึ้นที่บริเวณรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น เมื่อทำการตะไบลดพื้นที่แล้วจะทำให้พื้นที่ที่เกิดการสะสมของประจุมีค่าลดลง จึงทำให้กระแสไหลผ่านรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้มากขึ้น ส่วนผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการเกิด Step ก็สามารถอธิบายได้ด้วยวงจรเสมือนนี้เช่นเดียวกัน โดยอธิบายในส่วนของวงจรลดความเหนี่ยวนำ โดยฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กมีผลทำให้ค่าความต้านทานในรอยต่อมีค่ามากขึ้น กระแสไหลน้อยลง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรเสมือนทางไฟฟ้านี้



รูปที่ 5.8 วงจรเสมือนทางไฟฟ้าของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO

ดังนั้นแนวทางการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยถ้าต้องการขยายความสูงของ Step ก็ทำการเพิ่มพื้นที่ของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นตามต้องการ และการให้สนามแม่เหล็กก็สามารถทำให้ตำแหน่งของ Step เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการกำหนดรูปแบบของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังนั้นถ้าต้องการควบคุม Step ก็สามารถควบคุมได้ทั้งรูปแบบและสนามแม่เหล็กภายนอกกับรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ตามต้องการ คุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้มีความสำคัญต่อการนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ต่อไปได้ เช่น อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เป็นต้น

## บทที่ 6

# สรุปและวิจารณ์

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบใหม่คือ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  เพื่อนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบนี้ไปพัฒนาร่วมกับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ซึ่งได้มีการศึกษาและพัฒนาอยู่แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้เงื่อนไขที่หา คือ อุณหภูมิในการเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมและสะดวกต่อกระบวนการสร้าง คือ อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤติและอุณหภูมิวิกฤตได้ดีที่สุด กระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO แสดงแผนผังดังรูปที่ 6.1

เมื่อได้สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองแบบแล้วจึงได้มีแนวคิดถึงการนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองแบบที่สร้างขึ้นได้นี้มาพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะของรอยต่อเช่นเดียวกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด หรือทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางรอยต่อที่สามารถให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้มากมาย ดังนั้นจึงได้นำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO มาทำการศึกษาและพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางรอยต่อ เริ่มจากการหาเงื่อนไขของอุณหภูมิการเผาของรอยต่อ ซึ่งขั้นตอนการเผาสารแบบ YBCO และ GBCO เริ่มต้นจะใช้สามกระบวนการสร้างมาตรฐานของแต่ละแบบ ส่วนการเผาเมื่อเป็นรอยต่อแล้วจะใช้อุณหภูมิการเผาของ GBCO คือ 930 องศาเซลเซียส กระบวนการสร้างรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO แสดงดังรูปที่ 6.2

รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ที่สร้างได้แบ่งชั้นกันอย่างชัดเจน โดยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO มีสีดำเข้มมากกว่าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO

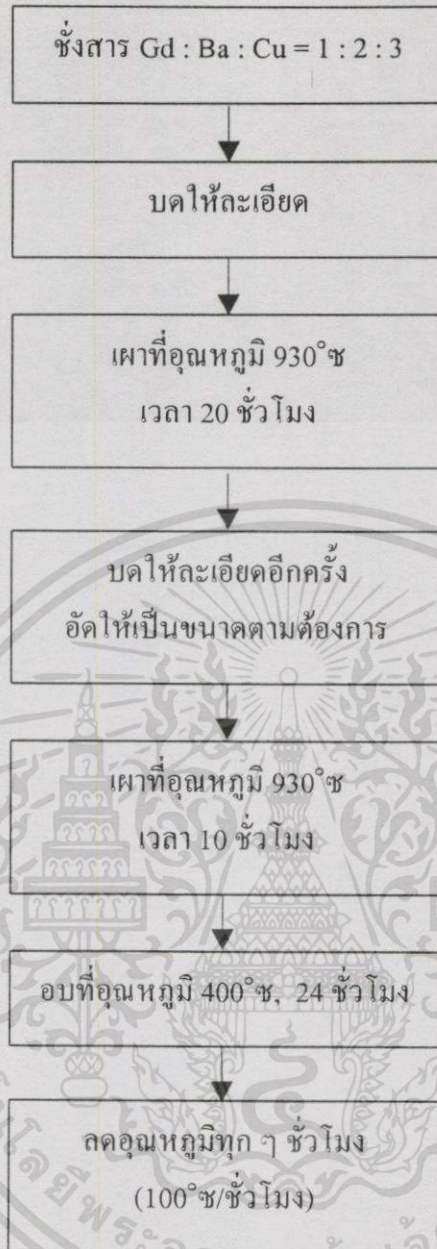
ส่วนลักษณะความเป็นรอยต่อของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ยืนยันได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO เมื่อเทียบกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO ที่ไม่มีลักษณะของรอยต่อ ในการทดลองจะกำหนดเพียง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบ 1 เป็นรูปแบบปกติ ส่วนรูปแบบ 2 เป็นการกำหนดให้กระแสไหลผ่านรอยต่อสองครั้งและการวัดแรงดันระหว่างขั้ว 2 ลักษณะคือ ระหว่างขั้ว 2-3 ซึ่งเป็นการวัดค่าแรงดันที่กระแสไหลผ่านรอยต่อครั้งเดียวหรือเป็นการวัดแรงดันระหว่างชั้นสารและ ขั้ว 2-6 ถ้าเป็นรูปแบบ 1 เป็นค่าแรงดันของกระแสไหลผ่านผิวชั้นบน (GBCO) แต่รูปแบบ 2 เป็นค่าแรงดันของกระแสที่บังคับให้ไหลผ่านรอยต่อสองครั้ง จากผลการทดลองสามารถแสดงได้ว่ารอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBCO/GBCO มีลักษณะของรอยต่อโดยแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ นั่นคือ การเกิด Step ของกระแสชั้นบนกราฟ ซึ่งในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO และ GBCO ไม่เกิดขึ้น ในการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-3 จะเกิด 1 Step เกิดได้ทั้งรูปแบบ และ 2

ดังนั้น รูปแบบขึ้นสารจึงไม่มีผลต่อการเกิด Step ส่วนการวัดระหว่างขั้ว 2-6 จะเกิด 2 Step เฉพาะรูปแบบ 2 ดังนั้นในการวัดระหว่างขั้ว 2-6 รูปแบบของขึ้นสารจะมีผลต่อการเกิด Step

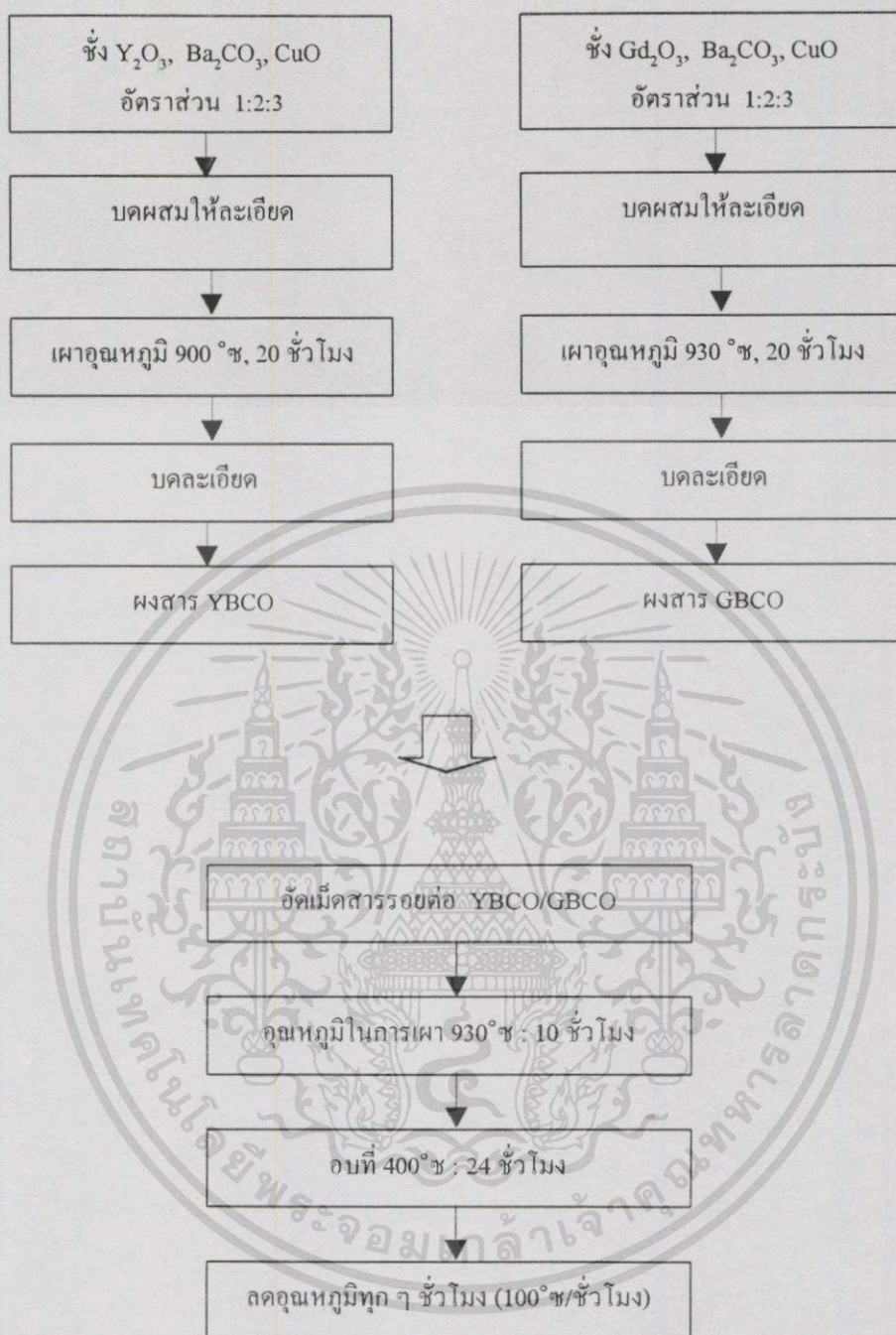
การเกิด Step บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีรูปแบบและการวัดแรงดันระหว่างขั้วตามที่กำหนด จึงได้ทำการศึกษาต่อไปถึงรูปแบบต่าง ๆ คือ รูปแบบ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งเป็นการบังคับให้กระแสไหลผ่านรอยต่อมากขึ้น ส่วนตำแหน่งของการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วต่าง ๆ กัน คือ 2-3, 2-4, 2-5 และ 2-6 ลักษณะของขั้ว 2-4 จะคล้ายกับขั้ว 2-6 และ ขั้ว 2-5 จะคล้ายกับขั้ว 2-3 ซึ่งผลที่ได้ก็ให้ผลในลักษณะเดียวกัน ขั้ว 2-3 และ 2-5 เป็นการวัดระหว่างขึ้นสารหรือค่าแรงดันระหว่าง 1 รอยต่อ ทั้งสองขั้วจะทำให้เกิด 1 Step เช่นเดียวกัน ต่างกันที่ค่าแรงดันของ Step ของขั้ว 2-5 จะให้ค่าแรงดันมากกว่า อีกทั้งรูปแบบ 1, 2, 3 และ 4 ไม่มีผลต่อลักษณะการเกิดของ Step เมื่อวัดระหว่างขั้ว 2-3 แต่ขั้ว 2-5 จะมีตำแหน่งเปลี่ยนไปมากเมื่อเป็นรูปแบบ 3 โดยแรงดันมีค่ามากขึ้น ส่วนขั้ว 2-4 จะให้ 2 Step ตั้งแต่รูปแบบ 2, 3 และ 4 ค่าของแรงดัน Step ที่ต่างกัน เช่นเดียวกับขั้ว 2-6 สามารถเกิด 2 Step ในรูปแบบ 2 และ 3 จากผลของขั้ว 2-4 จึงทำให้คาดเดาได้ว่ารูปแบบ 3 และ 4 จะเกิด 2 Step ด้วยเช่นกัน เกิดในค่าแรงดันที่มากกว่านี้ ดังนั้น การวัดค่าแรงดันในตำแหน่งต่างๆ และรูปแบบจึงมีความสำคัญต่อจำนวนและลักษณะของการเกิด Step จึงสามารถกำหนดได้

เนื่องจากสามารถกำหนดจำนวนและลักษณะของการเกิด Step บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันได้ ต่อไปจึงทำการศึกษาถึงพื้นที่ของรอยต่อที่มีผลต่อการเกิด Step ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ของรอยต่อมีผลต่อลักษณะการเกิดของ Step ด้วย ถ้าพื้นที่ของรอยต่อมากจะทำให้ความสูงของ Step เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่นในอุปกรณ์รักษาแรงดันให้คงที่หรือแรงดันมาตรฐาน เป็นต้น โดยความสูงของ Step ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ช่วงการทำงานของค่ากระแสกว้างมากขึ้น เป็นต้น แต่ลักษณะการเกิดของ Step จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำได้โดยทำให้ค่ากระแสลดลงและค่าแรงดันเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งก็เป็นแนวทางที่จะสามารถนำรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สามารถกำหนดการเกิด Step ได้มาพัฒนาเป็นอุปกรณ์ตัวตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ หรืออุปกรณ์รักษาแรงดันให้คงที่ต่อไปได้

จากผลของข้อมูลทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษามาแล้วนั้น สามารถนำไปพัฒนาเป็นแนวทางเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบในกระบวนการสร้างรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ ข้อจำกัดของอุณหภูมิในการทำงานและกำลังที่ได้จากอุปกรณ์ที่สร้างจากรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าน้อย แต่ถ้าสามารถพัฒนาให้รอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถนำมาใช้ได้ที่อุณหภูมิห้องได้ ซึ่งจะพบว่ารอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการนำไปใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์แทนสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.1 แผนผังกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานของห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

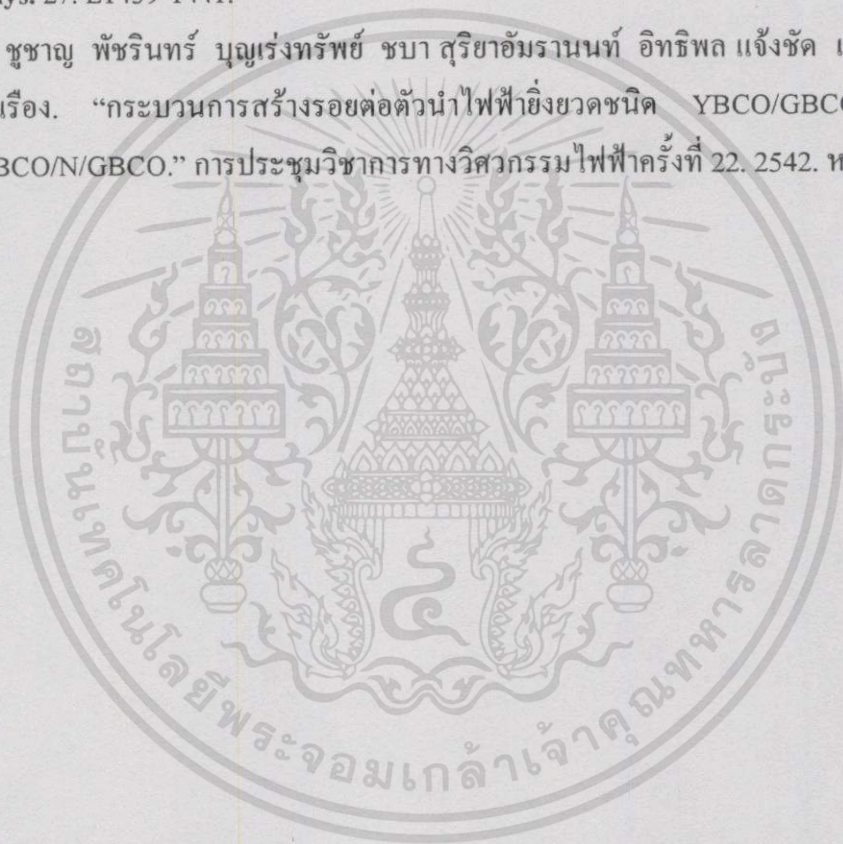


รูปที่ 6.2 แผนผังกระบวนการสร้างรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานของห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

## เอกสารอ้างอิง

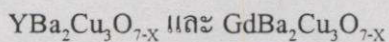
- [1] Jha A.R. 1998. **Superconductor Technology**. New York : John Wiley & Sons.
- [2] Kresin V.Z. and Wolf S.A. 1990. **Fundamentals of Superconductivity**. New York : Plenum Plenum Press.
- [3] Tilley D. R. and Tilley J. 1986. **Superfluidity and Superconductivity**. Bristol and Boston : Adam Hilger Ltd.
- [4] Subramanyam S.V. and Gopal E.S.R. 1989. **High Temperature Superconductors**. New Delhi : Wiley Eastern Limited.
- [5] Rose- Innes A.C. and Rhoderick E.H. 1978. **Introduction to Superconductivity**. New York : Pergamon Press Ltd.
- [6] เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. 2539. วัสดุอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สกายบุ๊กส์.
- [7] คูสิต เครื่องงาม. 2535. โพลีเมตทฟิสิกส์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [8] Crangle J. 1991. **Solid State Magnetism**. London : Edmondsbury Press Ltd.
- [9] Gregory W.D., Mathews W.N. and Edelsack E.A. 1973. **The Science and Technology of Superconductivity**. New York : Plenum Press.
- [10] Orlando T.P. and Delin K.A. 1991. **Foundations of Applied Superconductivity**. New York : Addison-Wesley Publishing Company.
- [11] Shinde S.L. and Rudman D.A. 1994. **Interfaces in High  $T_c$  Superconducting Systems**. New York : Springer-Verlag.
- [12] Singh J. 1999. **Modern Physics for Engineers**. New York : John Wiley & Sons.
- [13] Zhou S.A. 1991. **Electrodynamic Theory of Superconductors**. London : Peter Peregrinus.
- [14] คลยวัจน์ จอมแสง. “การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยุณหภูมิสูงแบบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [15] สมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร พัทธรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์ สัญญา คุณขาว วิศุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง และสมเกียรติ ศุกเดช. “การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แม่กนิโตรชิติฟชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยวดยุ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.

- [16] สมชาติ พนาเกษม พชรินทร์ บุญเร่่งทรัพย์ เดชา ยศศักดิ์ศรี และวิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “การหาเงื่อนไขอุณหภูมิของการเผาต่อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด  $\text{GBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 37. 2542. หน้า 378-383.
- [17] Matsuda M., Kikuchi A., Maeda T., Ishii M., Iwai Y., Takata M. and Yamashita T. 1988. “Observation of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ceramic microstructure.” **Jpn. J. Appl. Phys.** 27. L529-530.
- [18] Matsuda M., Kikuchi A., Ishii M., Takata M, Yamashita T. and Okamoto S. 1988. “Processing and Superconducting Properties of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ceramics.” **Jpn. J. Appl. Phys.** 27. L1439-1441.
- [19] นเรศ ชูชาญ พชรินทร์ บุญเร่่งทรัพย์ ชบา สุริยาอัมรานนท์ อธิพิล แจ่มชัด และวิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “กระบวนการสร้างรอยต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO/GBCO และชนิด YBCO/N/GBCO.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22. 2542. หน้า 311-314.



## ภาคผนวก

ตาราง ก คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด



ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (°ซ)	จุดเดือด (°ซ)
Y	88.905	1,509	2,927
Gd	157.25	$1,312 \pm 15$	3,270
Ba	137.34	$725 \pm 5$	1,637
Cu	63.546	1,083	2,538
O	15.999	-218.8	-183
C	12.011	3,827	3,727



ตาราง ข ค่าแรงดันออกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของเทอร์โมคัปเปิล (สายสีฟ้า-ขาว) ซึ่งใช้ใน ชุดควบคุม  
อุณหภูมิเตาเผา

T °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.891	-6.035	-6.158	-6.262	-6.344	-6.404	-6.441	-6.458		
-100	-3.533	-3.852	-4.138	-4.410	-4.669	-4.912	-5.141	-5.354	-5.550	-5.730
(-)0	0.00	-0.392	-0.777	-1.516	-1.527	-1.889	-2.243	-2.586	-2.920	-3.242
(+)0	.000	0.973	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.805	3.266	3.681
100	4.096	4.508	4.919	5.227	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.314	9.745	10.151	10.560	10.969	11.381	11.793
300	12.207	12.623	13.093	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.974
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.066	21.493	2.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.227	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.866
800	33.277	33.686	34.095	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.225	37.724	38.122	38.519	38.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.879
1000	41.269	41.675	42.045	42.433	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.228	46.612	46.985	47.456	47.726	48.095	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.045
1300	52.398	52.747	53.093	53.439	53.782	54.125	54.466	54.807		

หมายเหตุ แสดงค่าแรงดันมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2539

