

การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด
Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

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



วิสิฐ วังศ์สุทธิธรรม
WISIT WONGSUTTITUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-046-2

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

WISIT WONGSUTTITUM

**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**

2002

ISBN 974-324-046-2

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้า ยิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก |
| นักศึกษา | นายวิสิษฐ วงศ์สุทธิธรรม |
| รหัสประจำตัว | 42061117 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2545 |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง |

บทคัดย่อ

จากการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่อุณหภูมิ 77K พบว่ามีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance) เกิดขึ้น จากการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบและปริมาณกระแสวิกฤต ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปในกระบวนการสร้าง ในการทดลองจึงได้มีการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาทั้งหมด 4 ค่า ด้วยกันคือ 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าสูงสุดและเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้นปริมาณกระแสวิกฤตจะลดลงตามลำดับ ส่วนปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ในส่วนของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป ได้มีการเปลี่ยนค่าแรงอัดทั้งหมดจำนวน 5 ค่าด้วยกัน คือ 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ดัน ซึ่งพบว่าปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าแรงอัดที่สูงขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ขึ้น เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น และเพื่อสนับสนุนแบบจำลองโครงสร้างดังกล่าว จึงได้ทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ให้กับชิ้นสารและวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้อย่างสอดคล้อง

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Study on Negative Resistance Phenomena in Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Material |
| Student | Mr. Wisit Wongsuttitum |
| Student ID | 42061117 |
| Degree | Master of Engineering |
| Programme | Electrical Engineering |
| Year | 2002 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang |

ABSTRACT

In the experiment, the relationship between current and voltage of Gd-Ba-Cu-O superconductor was measured at 77K. It was found that negative resistance phenomena were occurred. It was also found that the factors that influenced the voltage during the negative resistance phenomena and critical current were sintering temperature and pressure used in sample forming process. First, four sintering temperatures, i.e., 930°C, 950°C, 970°C and 990°C were studied. In each, it was revealed that the temperature of 930°C showed the highest critical current. It could be concluded that the higher the temperature, the lower the critical current. The voltage during the occurrence of the negative resistance was maximized at 970°C.

The second dependent variable was the sintering pressure at 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 and 1.2 tons. It was found that the critical current and the voltage during the occurrence of the negative resistance were increased depending on the increasing of the pressure.

In this thesis, moreover the Gd-Ba-Cu-O superconductor macro model was proposed in order to explain the relationship between the current and voltage, also the negative resistance phenomena were included. Besides, to support the model the magnetic field was taken into account as an extraneous variable to the superconductor samples and the relationship between the current and voltage were measured. Apart from this, it was shown that the macro model could harmoniously explain all findings.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้ความรู้แนวทางในการแก้ไขปัญหาและช่วยสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ คุณเดชา ยศศักดิ์ศรี, คุณนพดล สิทธิพล, คุณโยธิน วงศ์ประเสริฐ และคุณถัฏดาวัลย์ สุภาดี ที่ให้การช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณศศิธร สังข์วรรณะ ที่ส่งแรงใจและเป็นกำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณน้องชายของกระผมและขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้กำเนิดและให้การสนับสนุนทั้งด้านกำลังทรัพย์และกำลังใจมาโดยตลอด

วิสิญ์ วงศ์สุทธิธรรม

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญภาพ..... | IX |
| ศัพท์เทคนิค..... | XIII |
| สัญลักษณ์..... | XIV |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 1 |
| 1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ..... | 2 |
| 1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)..... | 2 |
| 1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)..... | 3 |
| 1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)..... | 3 |
| 1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 4 |
| 1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)..... | 4 |
| 1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)..... | 5 |
| 1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)..... | 6 |
| 1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 7 |
| 1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก..... | 7 |
| 1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2..... | 7 |
| 1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)..... | 9 |
| 1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ..... | 10 |
| 1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)..... | 10 |
| 1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)..... | 10 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 1.7 ขอบเขตงานวิจัย..... | 11 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 12 |
| 2.1 บทนำ..... | 12 |
| 2.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ | 12 |
| 2.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ | 12 |
| 2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา..... | 13 |
| 2.3 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 15 |
| 2.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 16 |
| 2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก..... | 19 |
| 2.5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค..... | 19 |
| 2.5.2 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก..... | 20 |
| 2.5.2.1 การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค..... | 20 |
| 2.5.2.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลอง โครงสร้างมหภาค..... | 23 |
| บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง..... | 29 |
| 3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 29 |
| 3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 29 |
| 3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา..... | 30 |
| 3.1.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 32 |
| 3.1.3.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)..... | 32 |
| 3.1.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน..... | 33 |
| 3.2 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 34 |
| 3.2.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 34 |
| 3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 36 |
| 3.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 39 |
| 3.3.1 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 39 |
| 3.3.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเตรียมเม็ดสาร..... | 40 |
| 3.3.3 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect)..... | 40 |
| 3.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 42 |
| 3.4 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ..... | 45 |
| 3.4.1 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 45 |
| 3.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 46 |
| 3.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับกระแสวิกฤต..... | 53 |
| 3.4.2.2 ความสัมพันธ์ของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับขนาด ของความต้านทานเชิงลบที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ..... | 54 |
| 3.4.2.3 ตำแหน่งการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ..... | 55 |
| บทที่ 4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก..... | 57 |
| 4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค..... | 57 |
| 4.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ..... | 58 |
| 4.3 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 60 |
| 4.3.1 อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 60 |
| 4.3.2 อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 65 |
| 4.3.3 อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 67 |
| 4.3.4 อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 70 |
| 4.4 การทดสอบแบบจำลองโครงสร้างมหภาค โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก..... | 73 |
| 4.4.1 การทดลองและผลการทดลอง..... | 73 |
| 4.4.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก..... | 75 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.4.2.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของจีนसार ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส..... | 75 |
| 4.4.2.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของจีนसार ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส..... | 79 |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์..... | 83 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 85 |
| ภาคผนวก..... | 86 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 87 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ตารางแสดงการเผาเมี้ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 46 |
| 3.2 แสดงค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ..... | 56 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes..... | 1 |
| 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส..... | 3 |
| 1.3 ปฏิกิริยาการฉีกไหมสไนเปอร์..... | 5 |
| 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน..... | 6 |
| 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 6 |
| 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 และ ข) ประเภทที่ 2..... | 8 |
| 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ และ ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ..... | 9 |
| 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)..... | 10 |
| 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)..... | 11 |
| 2.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O..... | 14 |
| 2.2 ซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง..... | 15 |
| 2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 15 |
| 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 16 |
| 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 17 |
| 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ..... | 17 |
| 2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 19 |
| 2.8 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 19 |
| 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้าง มหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต..... | 21 |
| 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้าง มหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต..... | 22 |
| 2.11 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อ มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกว่ากระทำที่กระแสไบอัสเท่ากับหรือมากกว่ากระแสวิกฤต..... | 23 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.12 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำที่กระแสไบอัสน้อยกว่ากระแสวิกฤต..... | 24 |
| 2.13 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B = 0$) ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต..... | 25 |
| 2.14 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B1 = 4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต..... | 26 |
| 2.15 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B2 = 5.5$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต..... | 27 |
| 2.16 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B3 = 9.4$ gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต..... | 28 |
| 3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 31 |
| 3.2 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก และ ข) การดูดแม่เหล็ก..... | 32 |
| 3.3 ชี้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง..... | 33 |
| 3.4 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 33 |
| 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 34 |
| 3.6 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดในการขึ้นรูป 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน..... | 35 |
| 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัด 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน..... | 37 |
| 3.8 แสดงปริมาณกระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 38 |
| 3.9 กราฟแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ที่แรงอัดค่าต่างๆ..... | 38 |
| 3.10 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 39 |
| 3.11 กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเผาที่อุณหภูมิ 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส..... | 40 |
| 3.12 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส..... | 42 |
| 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส..... | 43 |
| 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับกระแสวิกฤต..... | 44 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ..... | 44 |
| 3.16 กระบวนการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาต่างๆ..... | 45 |
| 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัด และอุณหภูมิการเผาต่างๆ..... | 52 |
| 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป ที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส..... | 53 |
| 3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความต้านทานเชิงลบกับแรงอัด ที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส..... | 54 |
| 3.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกระแสที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ กับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส..... | 55 |
| 4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 57 |
| 4.2 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 58 |
| 4.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส..... | 59 |
| 4.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 ตัน (930 องศาเซลเซียส) เมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ กระแสวิกฤต..... | 61 |
| 4.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (930 องศาเซลเซียส)..... | 63 |
| 4.6 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (950 องศาเซลเซียส)..... | 66 |
| 4.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (970 องศาเซลเซียส)..... | 69 |
| 4.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (990 องศาเซลเซียส)..... | 72 |
| 4.9 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ..... | 74 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่แรงอัด 1.2 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 930 และ 970 องศาเซลเซียส เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ..... | 75 |
| 4.11 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของโลหะได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ (930 องศาเซลเซียส)..... | 78 |
| 4.12 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของโลหะได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ (970 องศาเซลเซียส)..... | 81 |
| 5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 84 |
| 5.2 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 84 |

ศัพท์เทคนิค

| | |
|--------------------------|----------------------------|
| กระแส | Current |
| แกดโกลิเนียมออกไซด์ | Gadolinium Oxide |
| เกาส์ | Gauss |
| ความซึมซับได้ทางแม่เหล็ก | Magnetization |
| ความซึมซับได้ในสุญญากาศ | Permeability of free space |
| ความซึมซับได้สัมพัทธ์ | Relative Permeability |
| ความต้านทาน | Resistance |
| ความต้านทานเชิงลบ | Negative Resistance |
| ความหนาแน่นกระแสวิกฤต | Critical Current Density |
| ค่าวิกฤต | Critical Values |
| คอปเปอร์ออกไซด์ | Copper Oxide |
| เครื่องบันทึกสองแกน | X-Y Recorder |
| จุดคอค | Weak Point |
| เซรามิก | Ceramic |
| เซลเซียส | Celcius |
| ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด | Superconductor |
| ไนโตรเจนเหลว | Liquid Nitrogen |
| แบเรียมคาร์บอเนต | Barium Carbonate |
| แบบจำลองโครงสร้างมหภาค | Macrostructure Model |
| ปรากฏการณ์ซิลสบี | Silsbee Effect |
| ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ | Meissner Effect |
| ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน | Zero Resistance |
| แม่เหล็กเฟอร์โร | Ferromagnetic |
| แม่เหล็กไดอา | Diamagnetic |
| แรงดันไฟฟ้า | Voltage |
| สนามแม่เหล็กวิกฤต | Critical Magnetic Field |
| สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก | Magnetic Susceptibility |
| สารแม่เหล็ก | Magnetic Substance |
| อิทเทรียมออกไซด์ | Yttrium Oxide |

สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|------------|--|-------------------|
| B | ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก | wbm^{-2} |
| B_s | ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้าที่ยาว | wbm^{-2} |
| H | ความเข้มสนามแม่เหล็ก | Am^{-1} |
| H_c | สนามแม่เหล็กวิกฤต | Am^{-1} |
| H_{c1} | สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง | Am^{-1} |
| H_{c2} | สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน | Am^{-1} |
| I | กระแส | A |
| I_c | กระแสวิกฤต | A |
| J_c | ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต | Acm^{-2} |
| M | สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก | Am^{-1} |
| R | ความต้านทาน | Ω |
| T_c | อุณหภูมิวิกฤต | K |
| χ | สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก | - |
| μ_0 | ความซึมซับได้ในสุญญากาศ | Hm^{-1} |
| μ_r | ความซึมซับได้สัมพัทธ์ | - |
| ΔV | ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า | V |

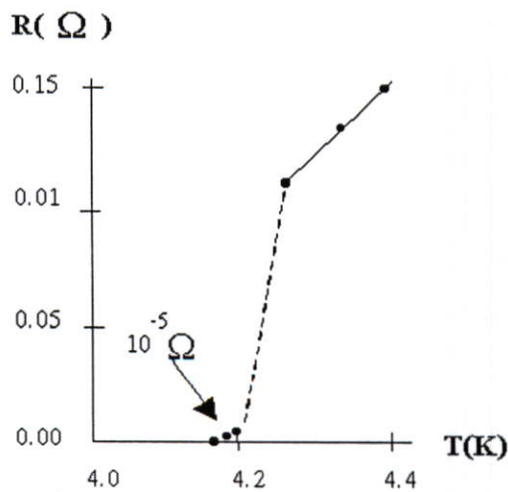
บทที่ 1

บทนำ

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

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

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

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

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

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

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

1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{3}{4} T_c$ นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น [1] ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่

อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชื้นสารนั้นจะต้องมีค่า T_c เข้าใกล้ 100 K อย่างเช่น ชื้นสารที่ใช้มีค่า $T_c \approx 95$ K ก็สามารถนำมาใช้งานได้

ถ้าเราต้องการนำชื้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ชื้นสารนั้นต้องมีอุณหภูมิ T_c มากกว่า 400 K อันเป็นสิ่งที่วงการทางวิทยาศาสตร์ต้องการและกำลังวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิรูปเทคโนโลยีอย่างแท้จริงต่อไป

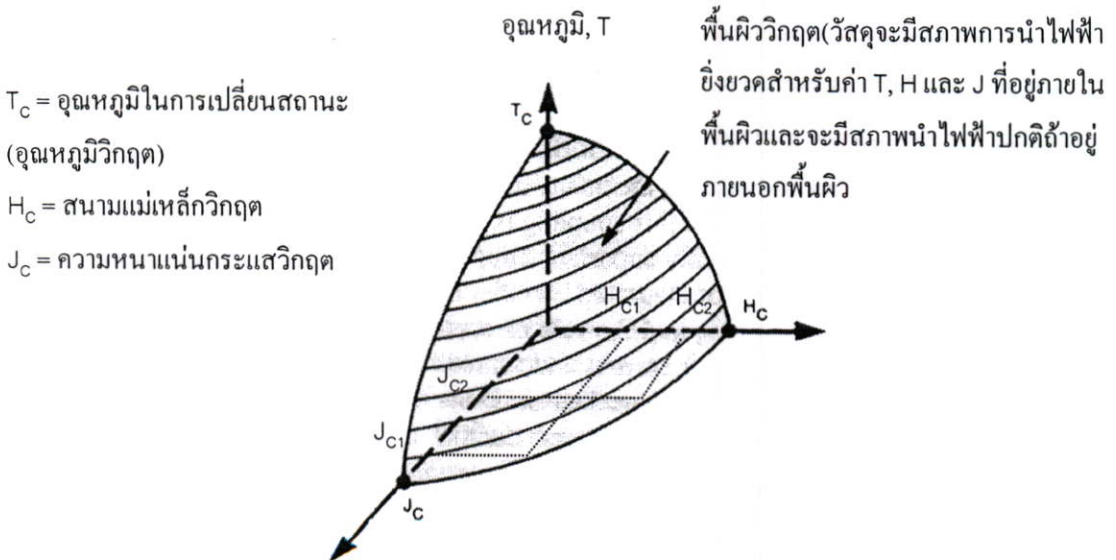
1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)

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

1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)

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

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



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

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

1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามี่ค่าเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กกล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอา (diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่จิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77 K

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

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

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

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

โดยที่ B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

M คือ สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)

χ_m คือ สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

μ_0 คือ ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)

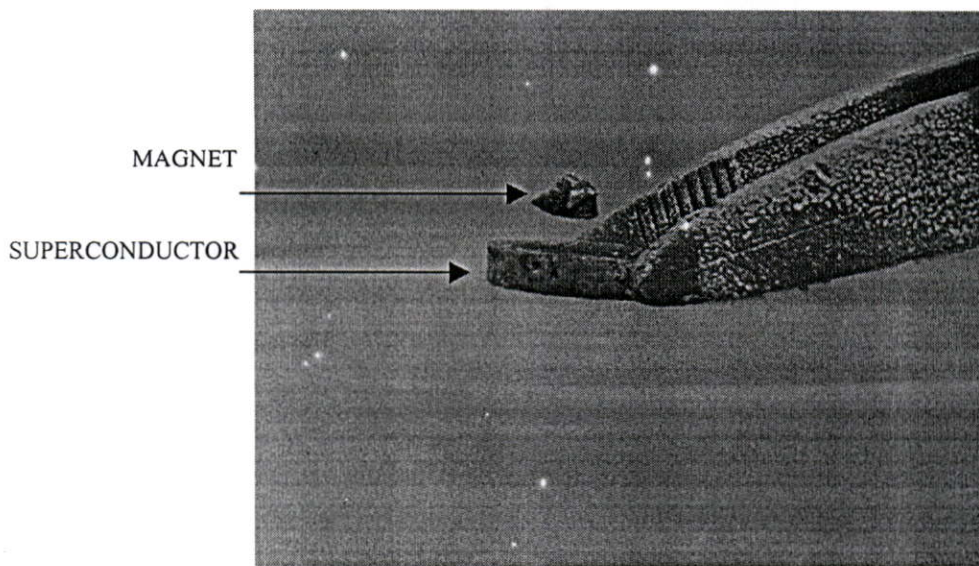
μ_r คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

เนื่องจากภายในชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้ $B = 0$ ทำให้

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

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

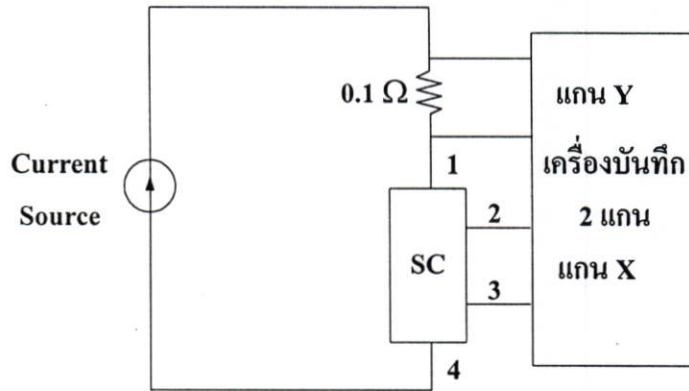
$$\mu_r = 0 \quad (1.6)$$



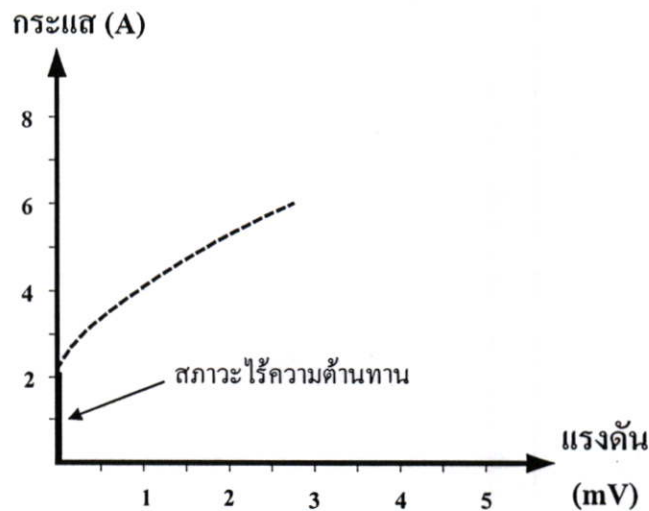
รูปที่ 1.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อวางอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ชั้นสารนั้นจะมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น นั่นคือความต้านทานภายในชั้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชั้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชั้นสารได้ถูกแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตเห็นว่ากราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน y นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2 \text{ A.}$) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นสารเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั่นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวนี้ได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก [2]

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

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

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

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

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

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

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

เมื่อ $H_C(T) =$ สนามแม่เหล็กวิกฤต

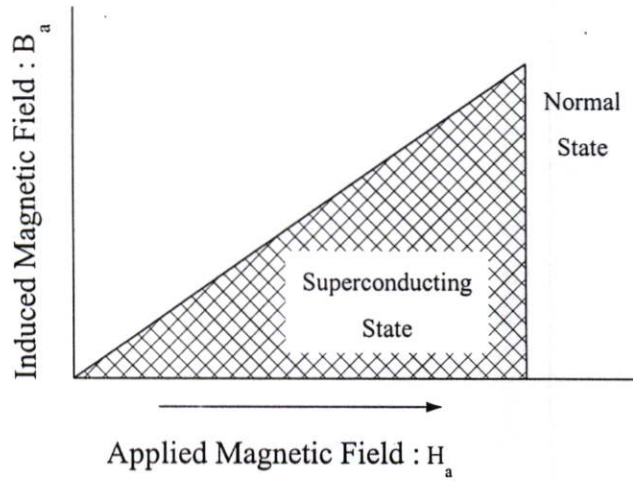
$H_C(0) =$ สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 [3]

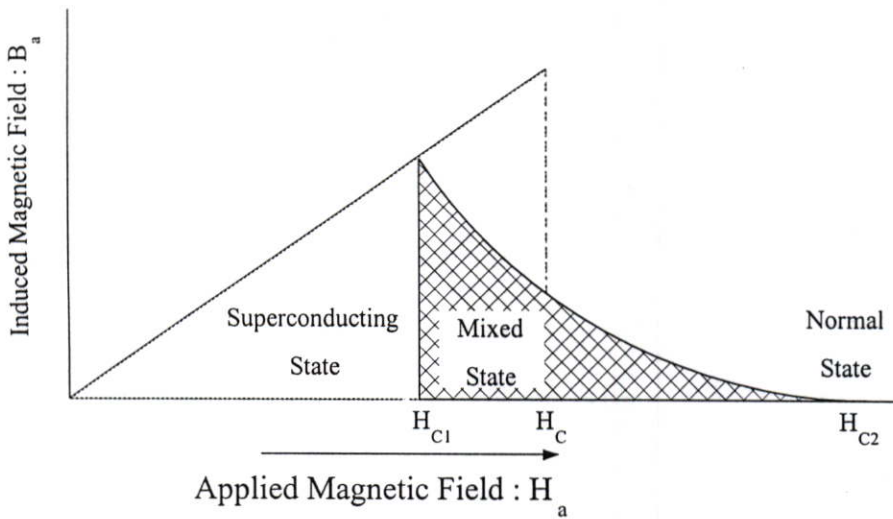
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั่นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำทำให้เกิด Magnetization ขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{M} = -\vec{H}_a$) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และมีคุณสมบัติเป็นไดอะแมกเนติกที่สมบูรณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) กาโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอัลลอย เช่น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$, $HgBa_2CuO_4$ เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างตัวนำ

ไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กับประเภทที่ 2 อยู่ที่อุณหภูมิทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมส์เนอร์นั่นเอง



ก) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1



ข) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

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

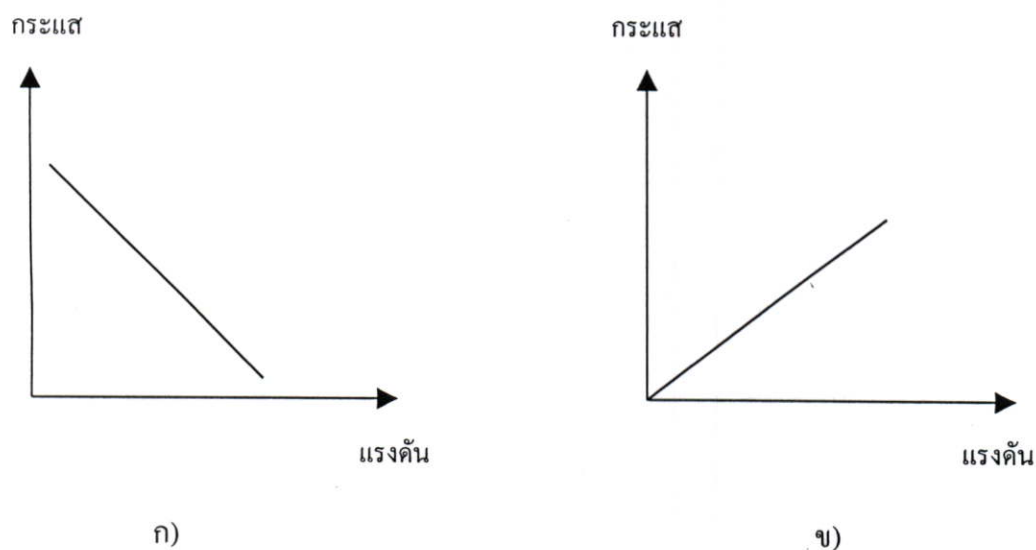
พิจารณารูปที่ 1.6 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (H_0) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วค่า Magnetization (M) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_C) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสภาวะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

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

1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

เป็นความต้านทานที่กระแสไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 1.7



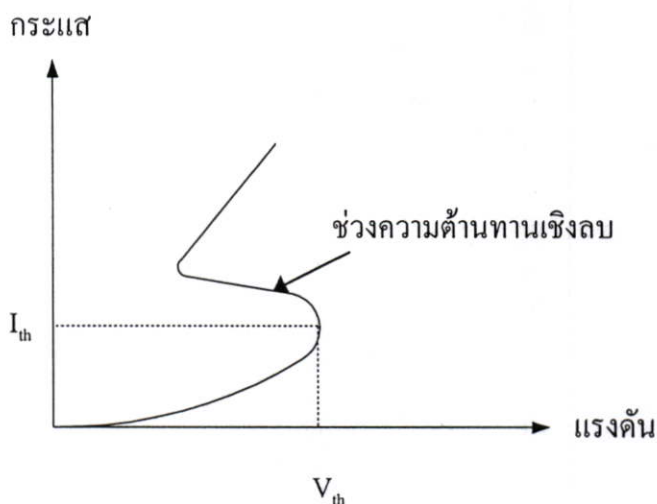
รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ

1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

ความต้านทานเชิงลบแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)

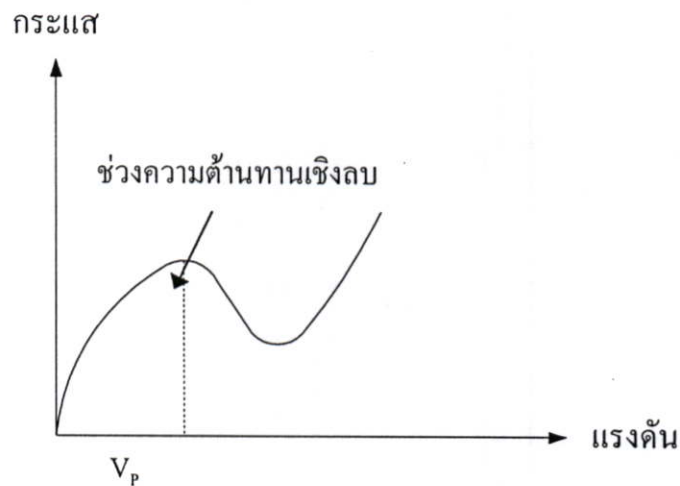
ความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษรตัว S ดังรูปที่ 1.8 ความต้านทานเชิงลบแบบ S นี้ สามารถเกิดได้โดยการควบคุมด้วยกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแสมีค่าเท่ากับกระแสวิกฤต I_{th} (Threshold current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบนี้ขึ้น จึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current controlled negative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



รูปที่ 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)

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



รูปที่ 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

1.7 ขอบเขตงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก รวมถึงการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท แก่โครงของแต่ละบทกล่าวโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันได้แก่ กระบวนการสร้างพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก รวมถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่สามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 3 เป็นการทดลองและผลการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า รวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิการเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้างต่อปริมาณกระแสวิกฤตและการเปลี่ยนแปลงขนาดของความต้านทานเชิงลบ

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O และการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ได้นำเสนอมาอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการทดลองในบทที่ 3 รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและวิจารณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 บทนำ

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

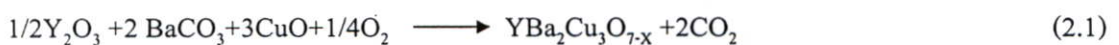
ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y-Ba-Cu-O) แบบเซรามิก ที่ได้จากระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก กลุ่มผู้วิจัยยังได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกขึ้น เพื่อนำมาอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งก็สามารถนำมาอธิบายได้อย่างสอดคล้อง

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

2.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

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

ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้



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

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

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

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

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

การคำนวณจากสมการเคมี

1) Y_2O_3 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 225.807 กรัม

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

2) $BaCO_3$ 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม

 ถ้า 2 โมล ต้องเตรียมสาร = 394.696 กรัม

3) CuO 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม

 ถ้า 3 โมล ต้องเตรียมสาร = 238.635 กรัม

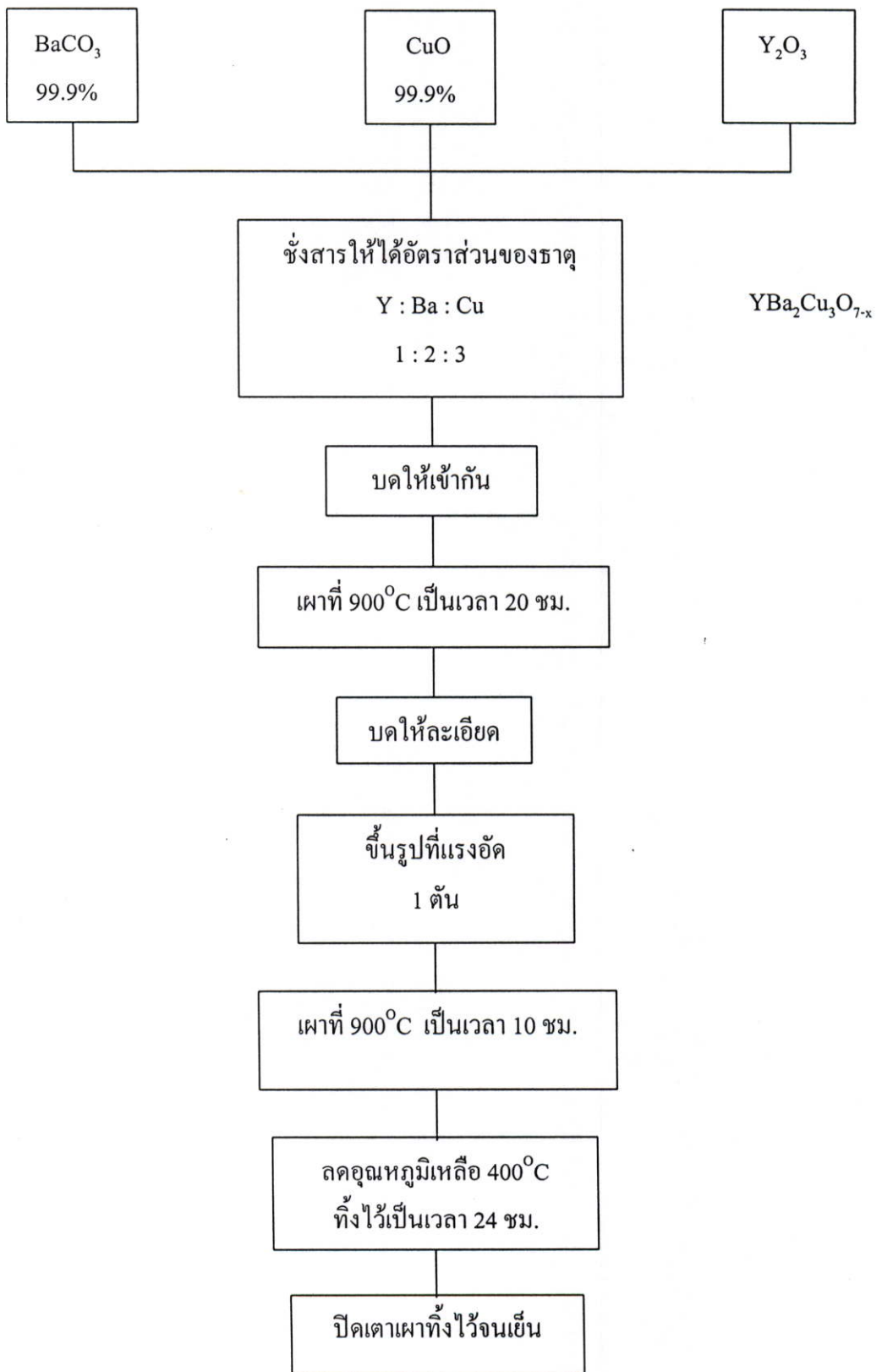
$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด} &= 112.9035 + 394.696 + 238.635 \\ &= 746.2345 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

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

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

2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

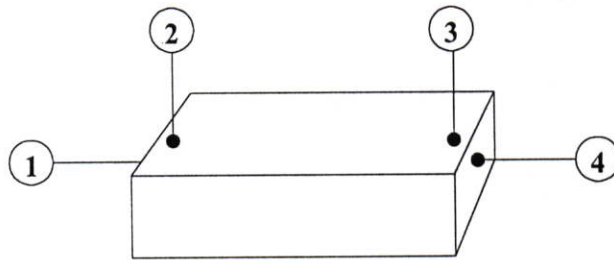
1. ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $Y : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้มาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7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



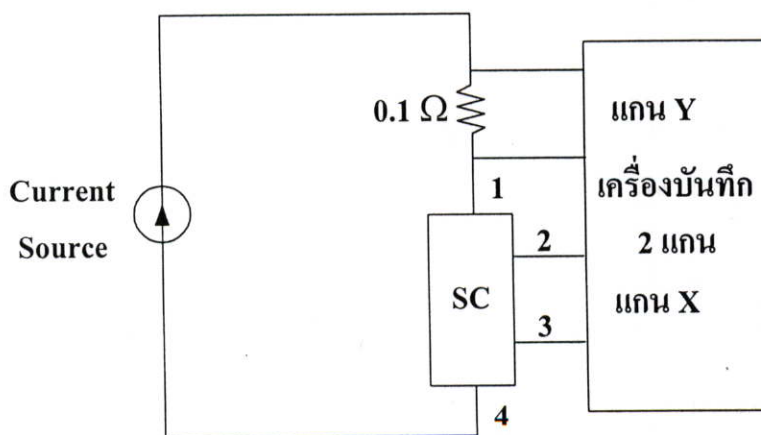
รูปที่ 2.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O

2.3 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

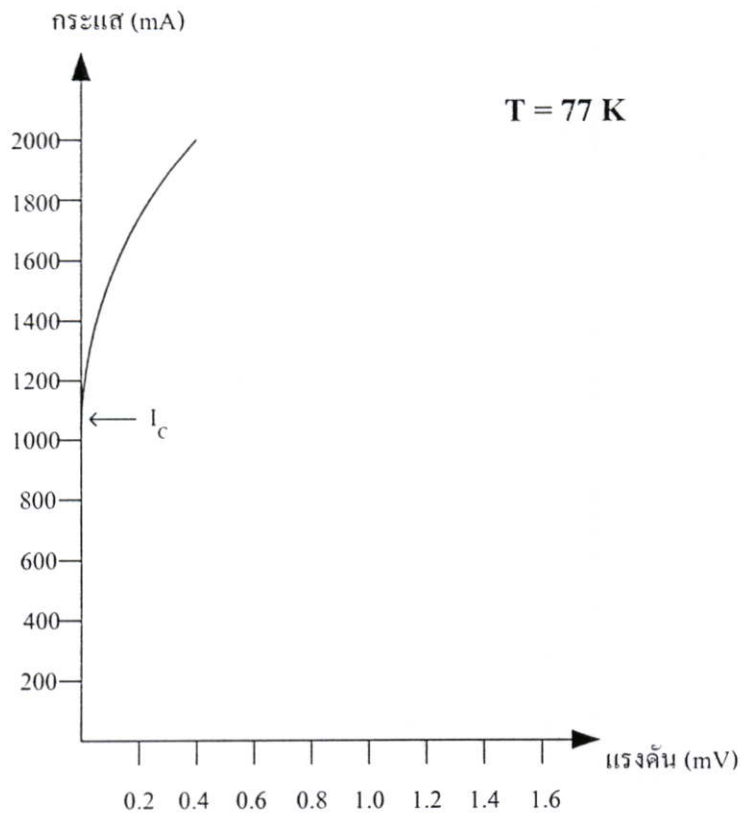
หลังจากที่ได้มีคาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว นำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรง ดังรูป 2.2 จากนั้นนำชิ้นสารไปทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 โดยที่กระแสจะไหลเข้า - ออก จากชิ้นสารที่ขั้ว 1 และ 4 ตามลำดับ และวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 2 และ 3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



รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

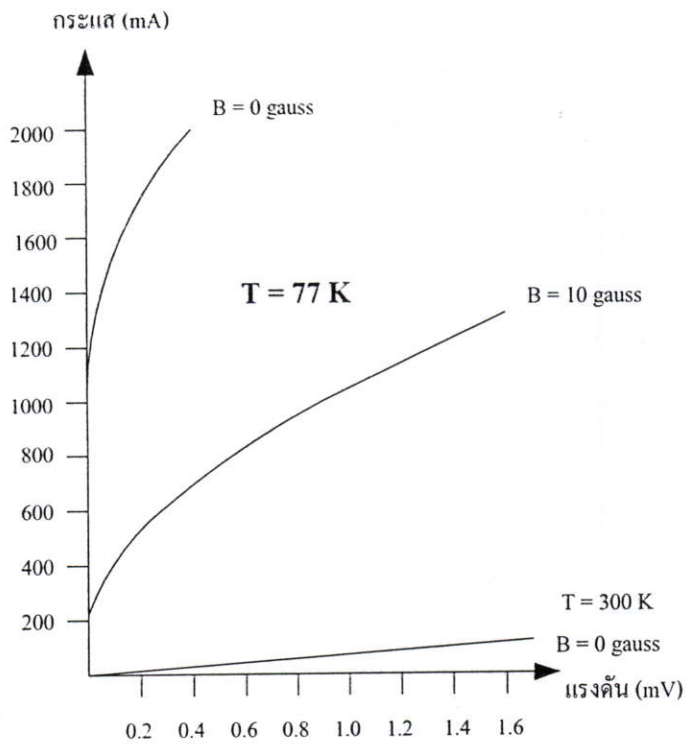
ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวามีค่าเท่ากับ 1.08 A ดังนั้นถ้าป้อนกระแสเกินกว่า 1.08 A ชิ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเกิดขึ้น

2.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

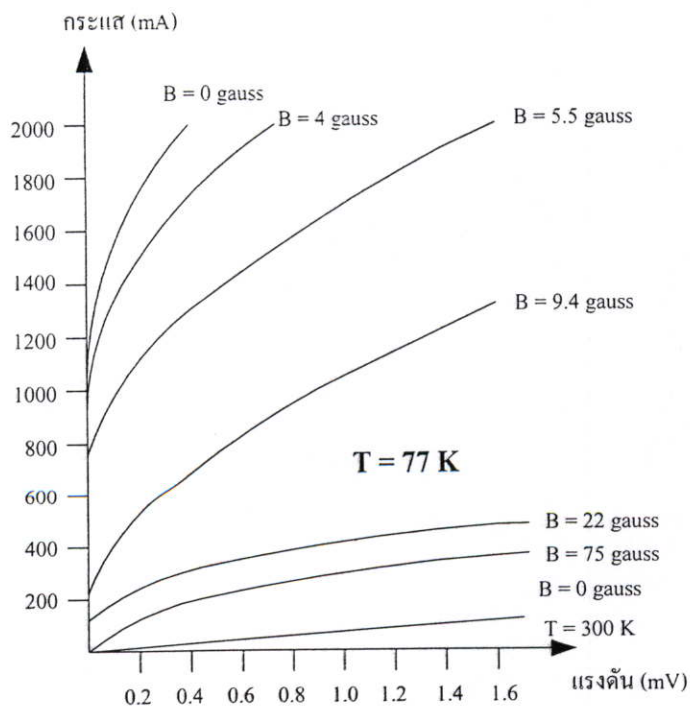
จากการสังเกตปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee effect) ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในขณะที่ชิ้นสารกำลังเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสาเหตุที่ทำให้ชิ้นสารเสียสภาพนั้นเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชิ้นสาร เป็นตัวเข้าไปทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้ชิ้นสารเสียสภาพไป จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น ซึ่งในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราจะใช้วงจรดังรูป 2.3 โดยแสดงผลการทดลองลงบนเครื่องบันทึกสองแกน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวต้านทานทั่วไป แต่เมื่อ

อยู่ที่อุณหภูมิ 77 K ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้ประมาณ 1.08 แอมแปร์ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามา 10 gauss จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเหลือประมาณ 200 มิลลิแอมป์



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่อุณหภูมิ 77 K โดยให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกันและผลที่ได้แสดงดังรูป 2.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าลดลง

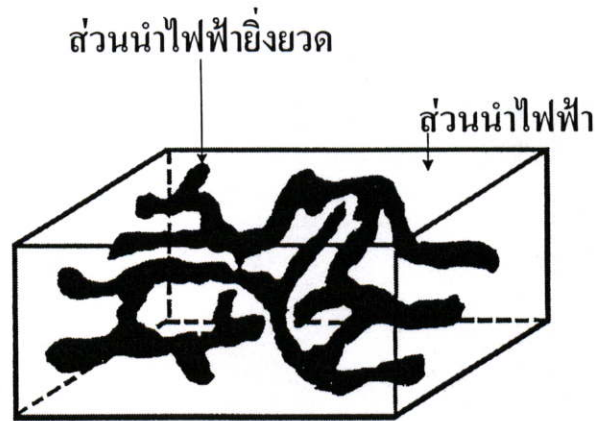
เราสามารถสรุปถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดังนี้ พิจารณาจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าชั้นสารที่อยู่ในอุณหภูมิ 300 K นั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่จะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าต่างๆเท่านั้น แต่เมื่อชั้นสารอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T_c = 92$ K) อย่างเช่นที่อุณหภูมิ 77 K ชั้นสารจะแสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในขณะที่ทำการป้อนกระแสให้กับชั้นสารต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (ต่ำกว่า 1.08 แอมป์แปร์) จะไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารเกิดขึ้น แต่เมื่อป้อนกระแสสูงกว่ากระแสวิกฤต (สูงกว่า 1.08 แอมป์แปร์) ชั้นสารจะเสียดสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้น ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชั้นสารเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนไป ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นจึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชั้นสาร

จากแนวความคิดที่ว่าสนามแม่เหล็กเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถยืนยันได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชั้นสาร ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองในรูปที่ 2.6 เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้นไปปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าลดต่ำลงตามลำดับ

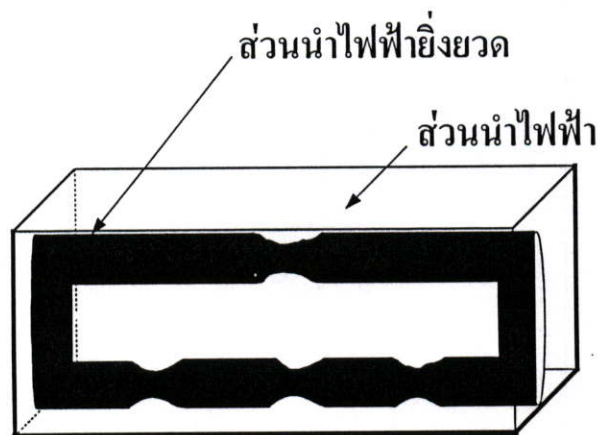
2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบ เซรามิก [5]

2.5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเนื้อสารเป็นแบบเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ซึ่งจากสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแสดงด้วยส่วนที่เป็นสีดำ โดยอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งเราพิจารณาว่าเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้แสดงในส่วนที่ไม่เป็นสีดำ ดังนั้นการที่ชั้นสารจะสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น ในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องเชื่อมต่อกันอยู่ และจากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและการเชื่อมต่อแบบหลวมๆ หรือที่เรียกว่า จุดคอด และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างมหภาค จึงพิจารณาในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่าย โดยการนำเอาส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใน



รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O



รูปที่ 2.8 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

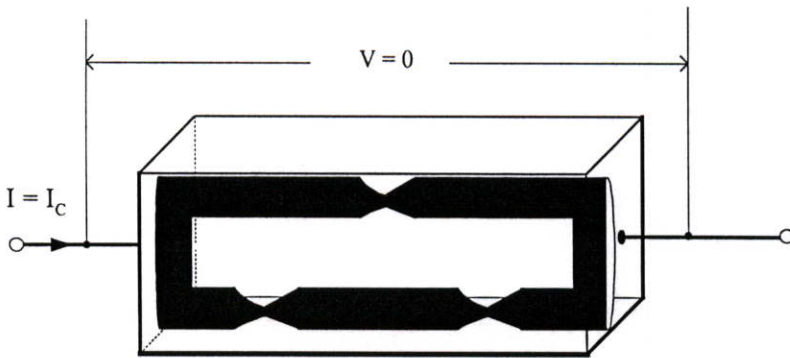
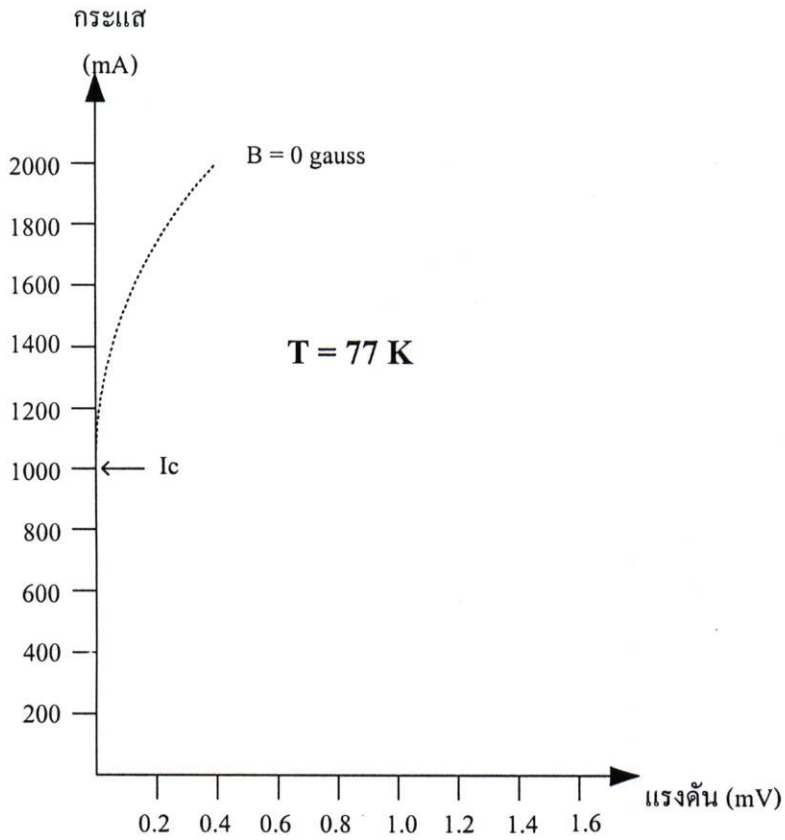
รูปที่ 2.7 มาแทนด้วยท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อกัน สำหรับท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเห็นว่ามีการเกิดจุดคอดเกิดขึ้น 1 จุด ที่บริเวณกลางท่อตัวนำด้านบนและจุดคอดอีก 3 จุดจะอยู่ในส่วนของท่อตัวนำด้านล่าง สำหรับจุดคอดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.8 นั้นมีอยู่จริงในชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพราะในขณะที่ทำการอัดเม็ดสาร เนื้อสารจะอัดตัวชิดติดกัน และเมื่อนำเม็ดสารไปทำการเผาก็จะทำให้เนื้อสารนั้นหลอมตัวชิดติดกันมากยิ่งขึ้นและกลายเป็นโครงสร้างของเซรามิกขึ้น แต่ก็ยังพบว่ายังมีบางจุดที่เนื้อสารยังไม่หลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดเป็นจุดคอดขึ้นมา

จากแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายในรูปที่ 2.8 พิจารณาได้ว่า ในขณะที่ชั้นสารยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวคนั้น ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเชื่อมต่อกันอยู่ แต่ถ้าชั้นสารเกิดการเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น ในส่วนของท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะขาดออกจากกัน ซึ่งส่วนของท่อนำบริเวณที่ขาดก่อนก็คือส่วนของจุดคอด และในหัวข้อต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Y - Ba - Cu - O$

2.5.2 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก

2.5.2.1 การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

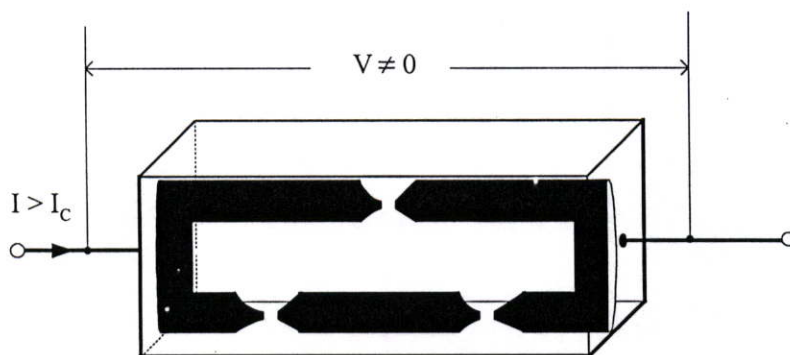
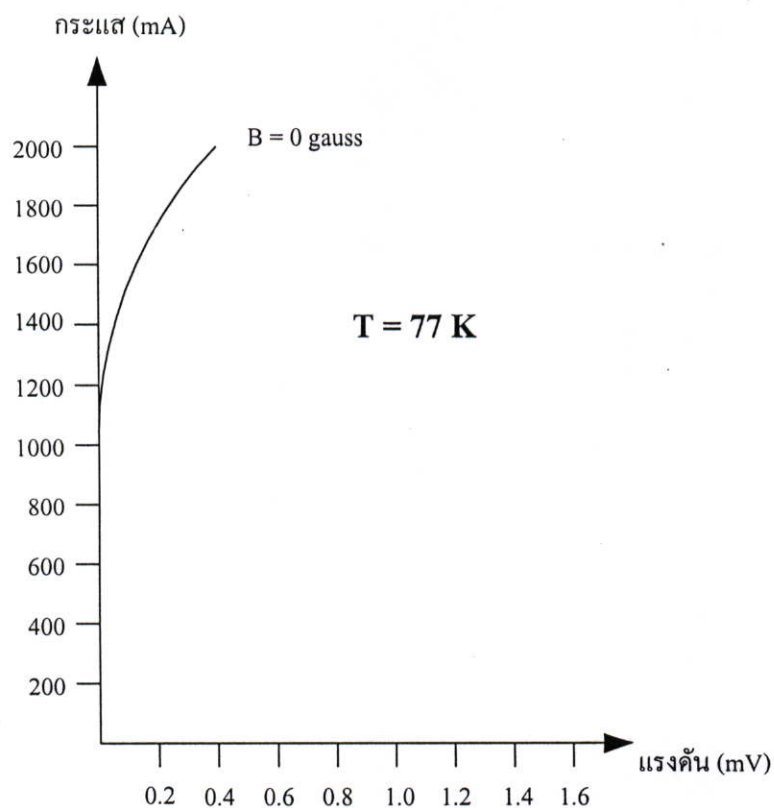
จากผลการทดลองในรูปที่ 2.4 สามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.9 จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชั้นสารน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต (I_c) ซึ่งพบว่าในขณะที่ชั้นสารยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่าท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะยังคงเชื่อมต่อกันอยู่ความต้านทานในชั้นสารจึงไม่เกิดขึ้นทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารในขณะนี้



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

พิจารณารูปที่ 2.10 เป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชิ้นสารมากกว่าค่ากระแสวิกฤต (I_c) ซึ่งในขณะนั้นชิ้นสารได้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปแล้ว จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่า ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่เป็นจุดคอดจะขาดออกจากกัน จึงมีความต้านทาน

เกิดขึ้นภายในชิ้นสารทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้นและจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแสสูงขึ้น

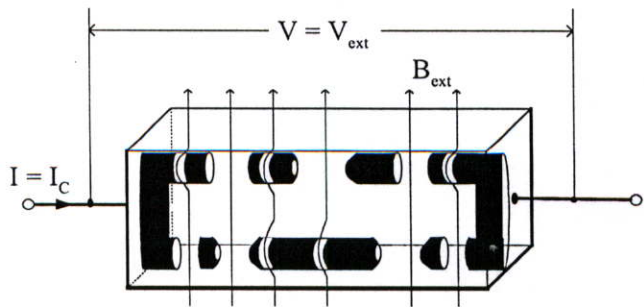
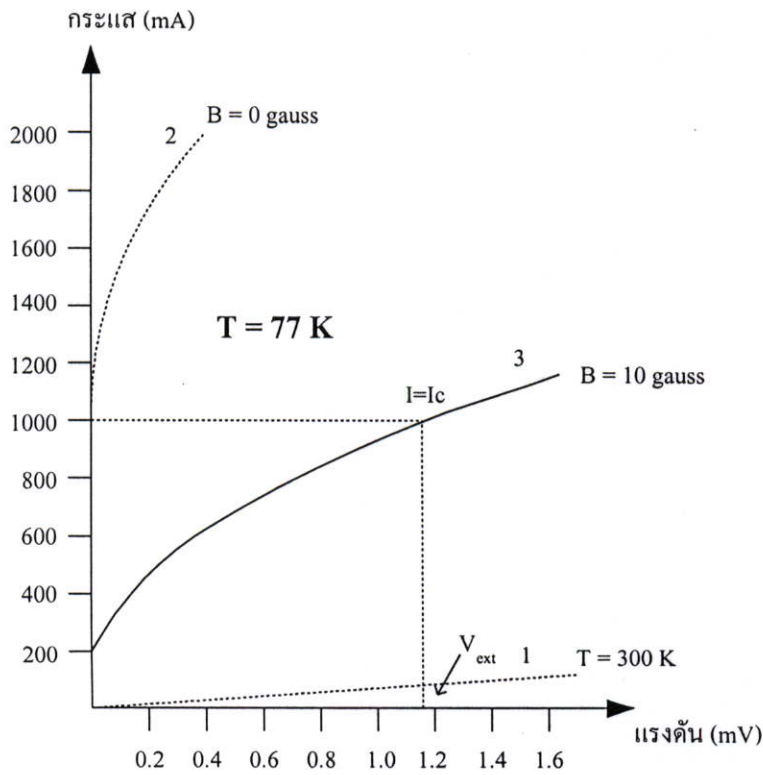


รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต

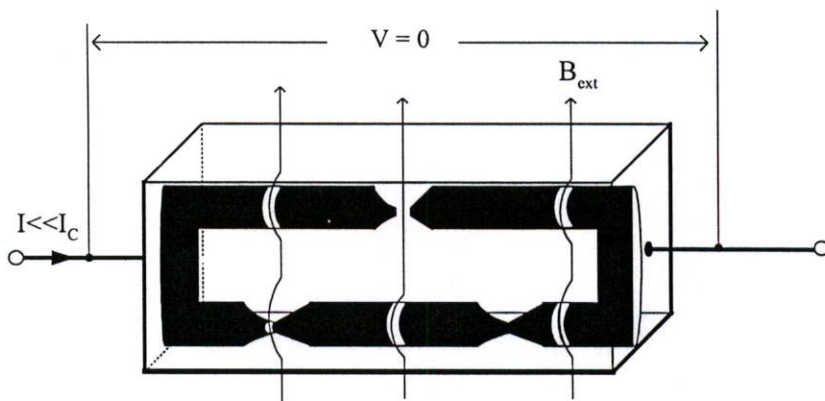
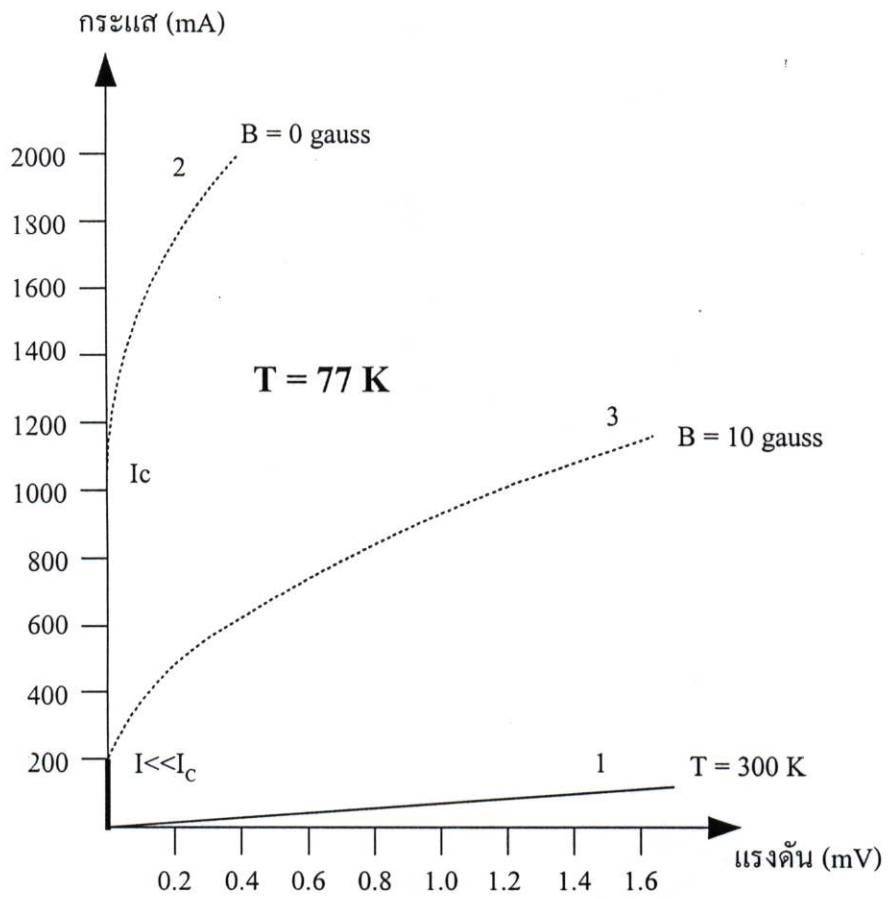
2.5.2.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆให้กับชิ้นสาร

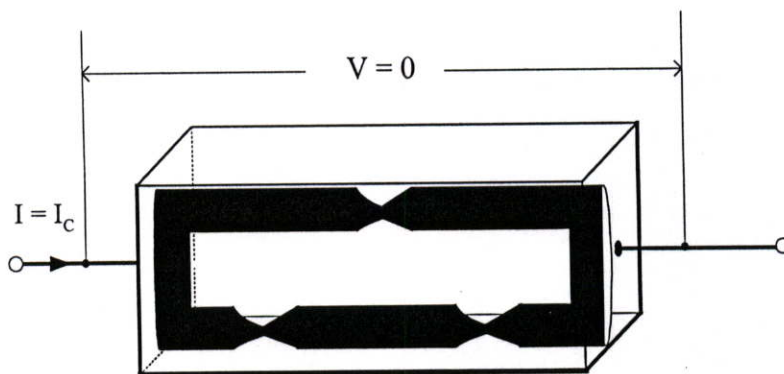
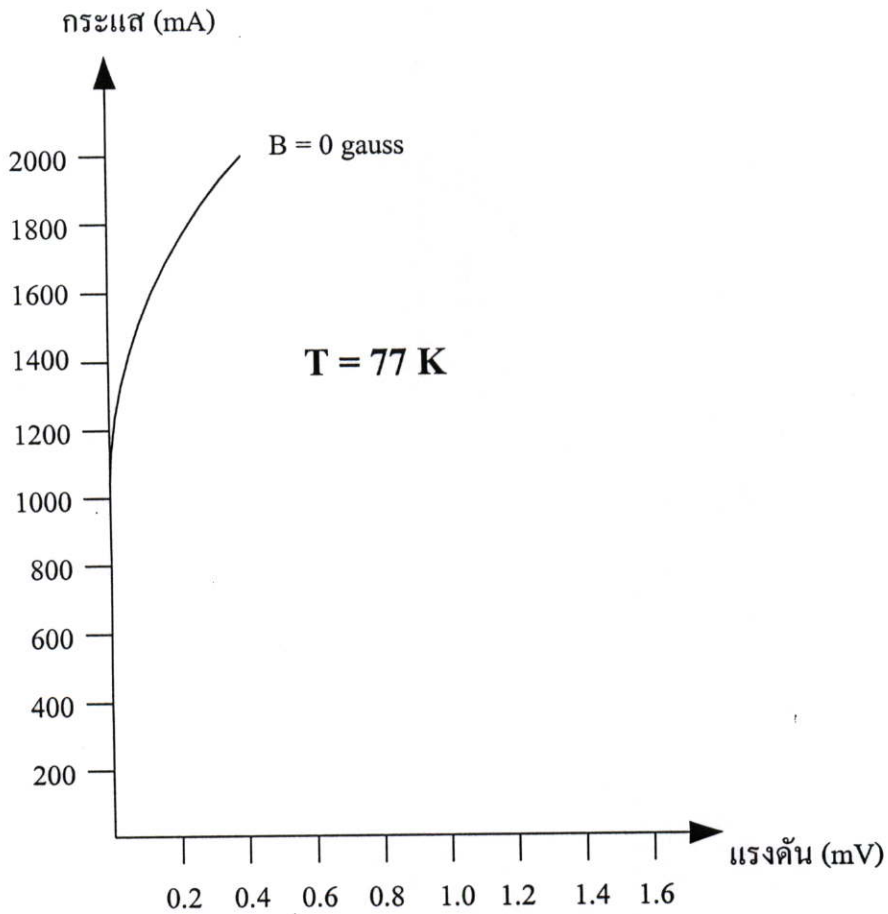
จากหัวข้อ 2.5.2.1 ได้อธิบายเกี่ยวกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเส้นที่ 2 ของรูปที่ 2.11 ไปแล้ว ต่อไปจะเป็นการพิจารณากราฟเส้นที่ 3 ของรูป 2.11 ซึ่งเป็นผลการทดลองในหัวข้อ 2.4.1 ดังนี้ เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ (10G) ให้กับชิ้นสารในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนจะถูกทำลาย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



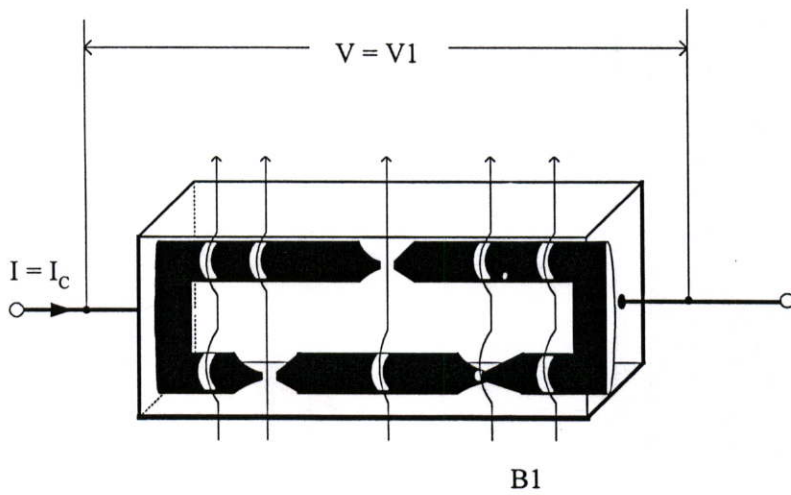
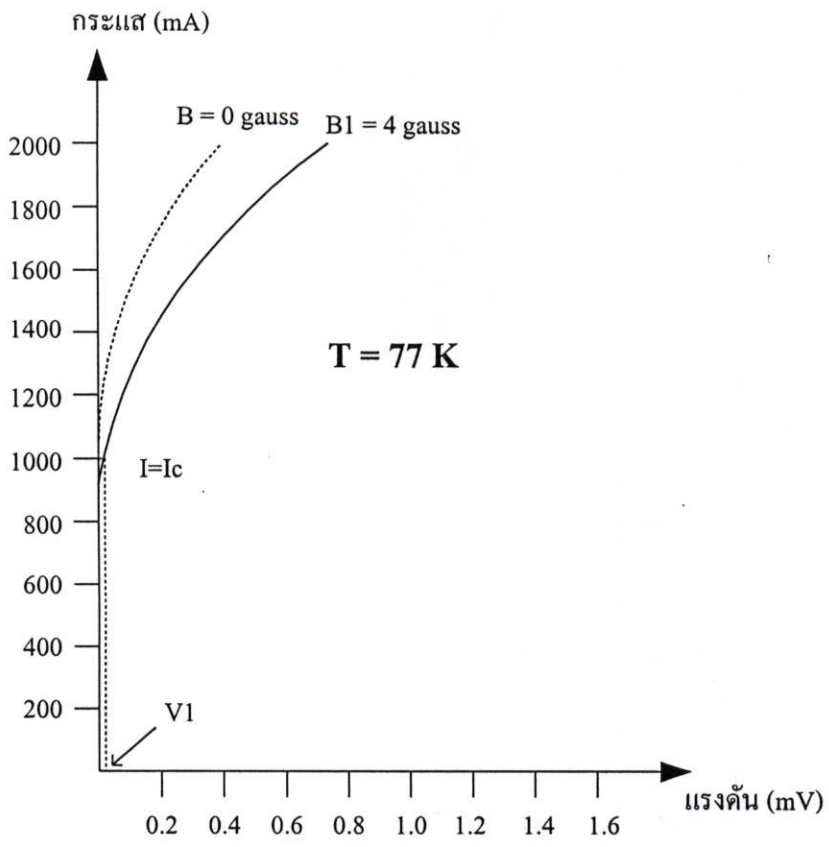
รูปที่ 2.11 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำที่กระแสไบอัสเท่ากับหรือมากกว่ากระแสวิกฤต



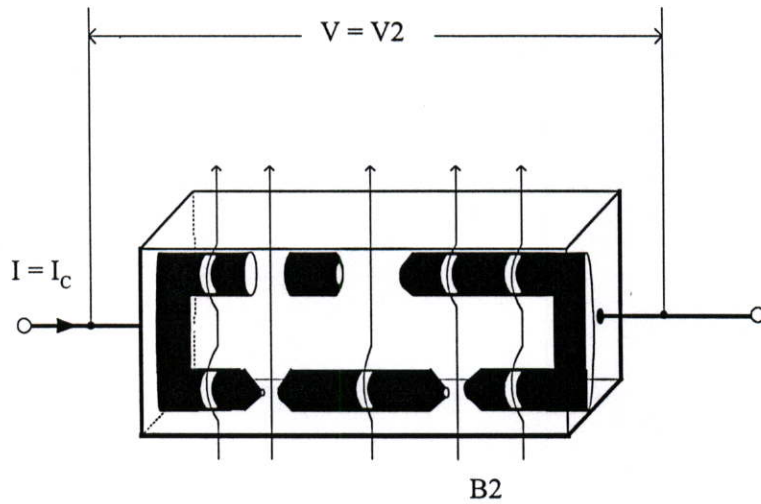
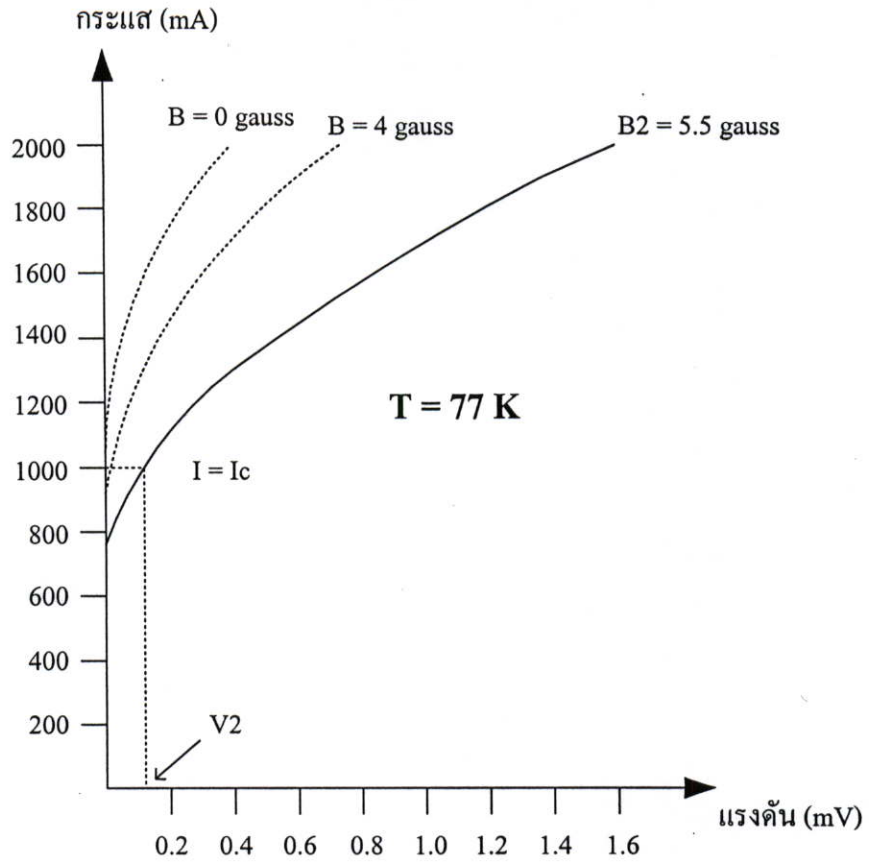
รูปที่ 2.12 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3)เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกว่าทำให้กระแสไหลน้อยกว่ากระแสวิกฤต



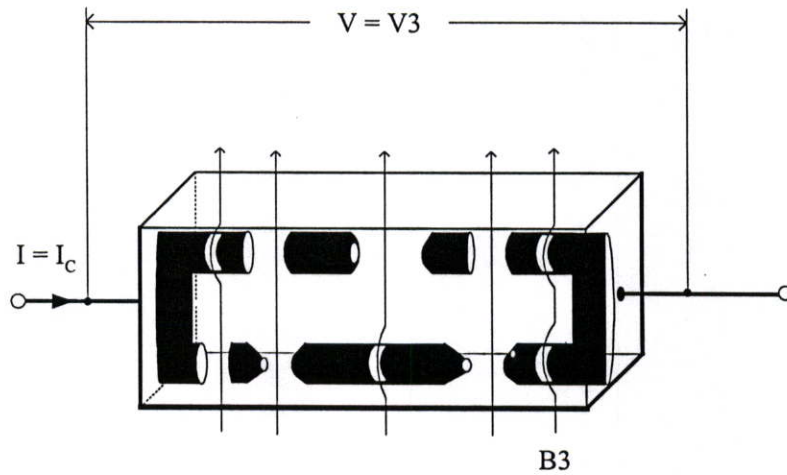
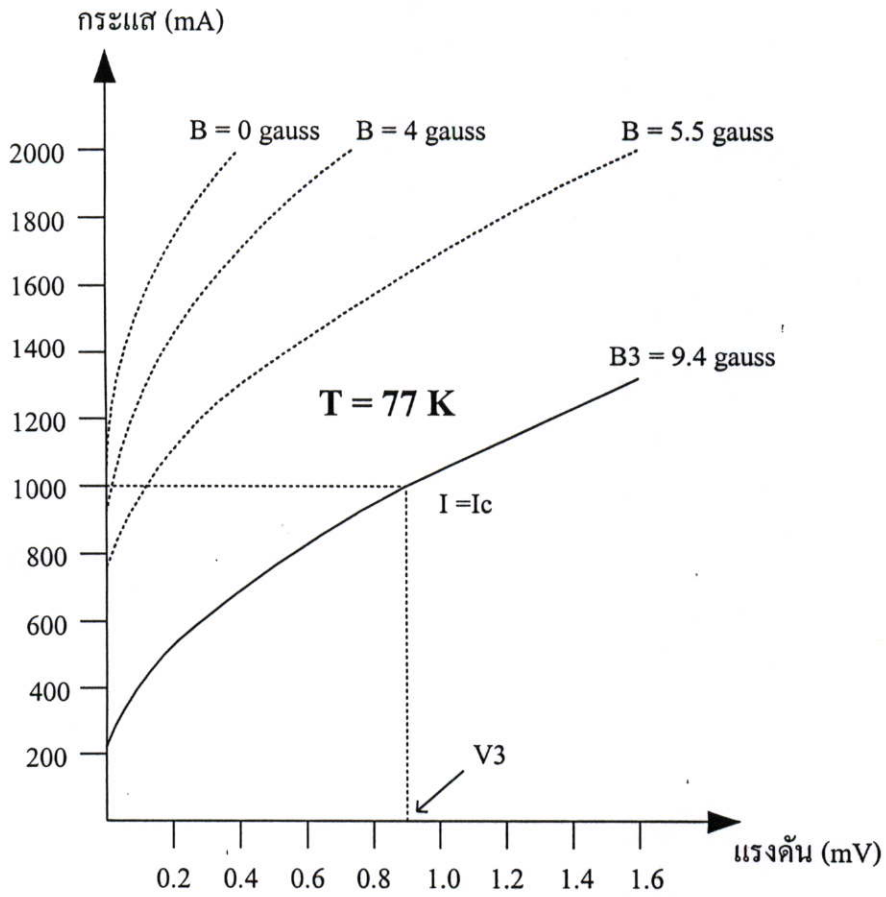
รูปที่ 2.13 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B = 0$) ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



รูปที่ 2.14 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_1 = 4 \text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



รูปที่ 2.15 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_2 = 5.5 \text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



รูปที่ 2.16 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B_3 = 9.4 \text{ gauss}$ ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต

บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ไปแล้ว สำหรับในบทนี้จะเป็นการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีกชนิดหนึ่งนั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Gd-Ba-Cu-O) ซึ่งมีเนื้อสารเป็นแบบเซรามิก โดยจะศึกษาถึงกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น ผลของอุณหภูมิในการเผาและแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีต่อปริมาณกระแสวิกฤตและขนาดของความต้านทานเชิงลบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ในบทต่อไป

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

3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

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



จากสมการที่ 3.1 พบว่า อัตราส่วนโดยอะตอมของสารประกอบจะได้ $Gd : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3 จากตารางธาตุ จะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆดังนี้ $Gd = 157.26$ กรัม , $Ba = 137.34$ กรัม , $Cu = 63.54$ กรัม , $O = 15.99$ กรัม

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

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

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

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

การคำนวณจากสมการเคมี

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

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

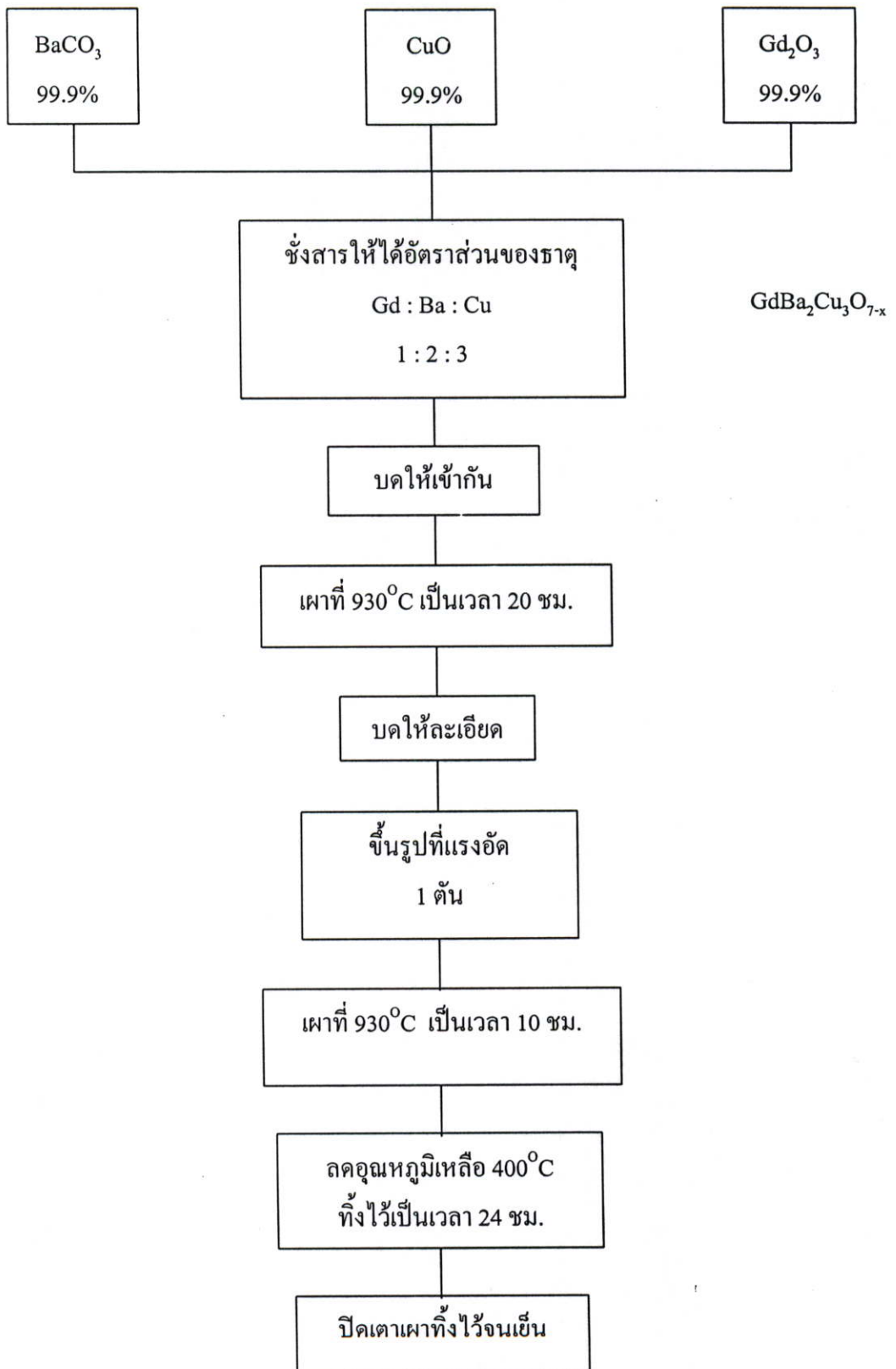
ซึ่งหมายความว่าจะได้สาร $GdBa_2Cu_3O_{7-x} = 814.576$ กรัม

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

3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

ในขั้นตอนกระบวนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการเผามาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

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



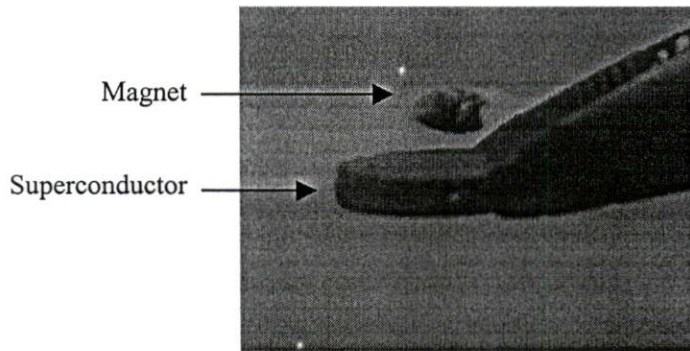
รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

3.1.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

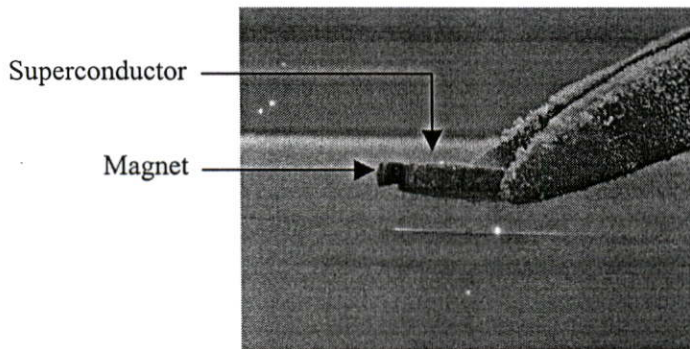
หลังจากที่ได้เม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.1 มาแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดสารเพื่อแสดงว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สมบูรณ์ดังนี้

3.1.3.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)

เป็นวิธีการทดสอบเม็ดสารว่าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว ถ้าเม็ดสารมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ขึ้น โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสารจากการทดสอบพบว่า



ก) การผลักแม่เหล็ก



ข) การดูดแม่เหล็ก

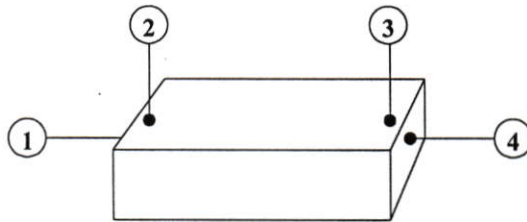
รูปที่ 3.2 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

เมื่อดสารมีการผลึกแม่เหล็กให้ลอยขึ้น ดังรูปที่ 3.2 ก) และที่น่าสนใจก็คือบริเวณขอบของเมื่อดสาร บางส่วนมีการดูดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.2 ข) การที่บางส่วนของเมื่อดสารมีการดูดแม่เหล็ก น่าจะมีสาเหตุมาจากสารแกลโคลิเนียมที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก [9]

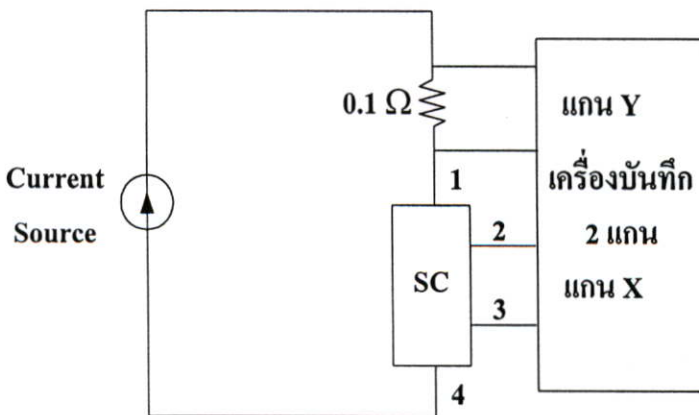
3.1.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

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

สำหรับเมื่อดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเมื่อดสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.3

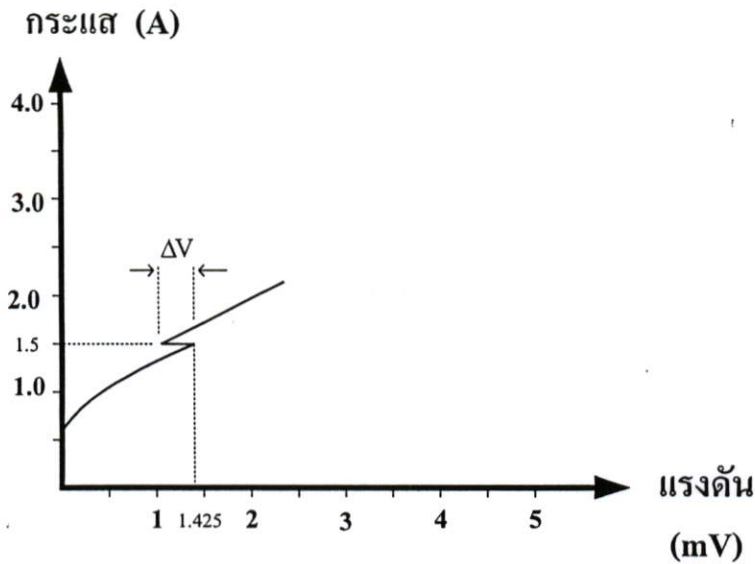


รูปที่ 3.3 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 3.4 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

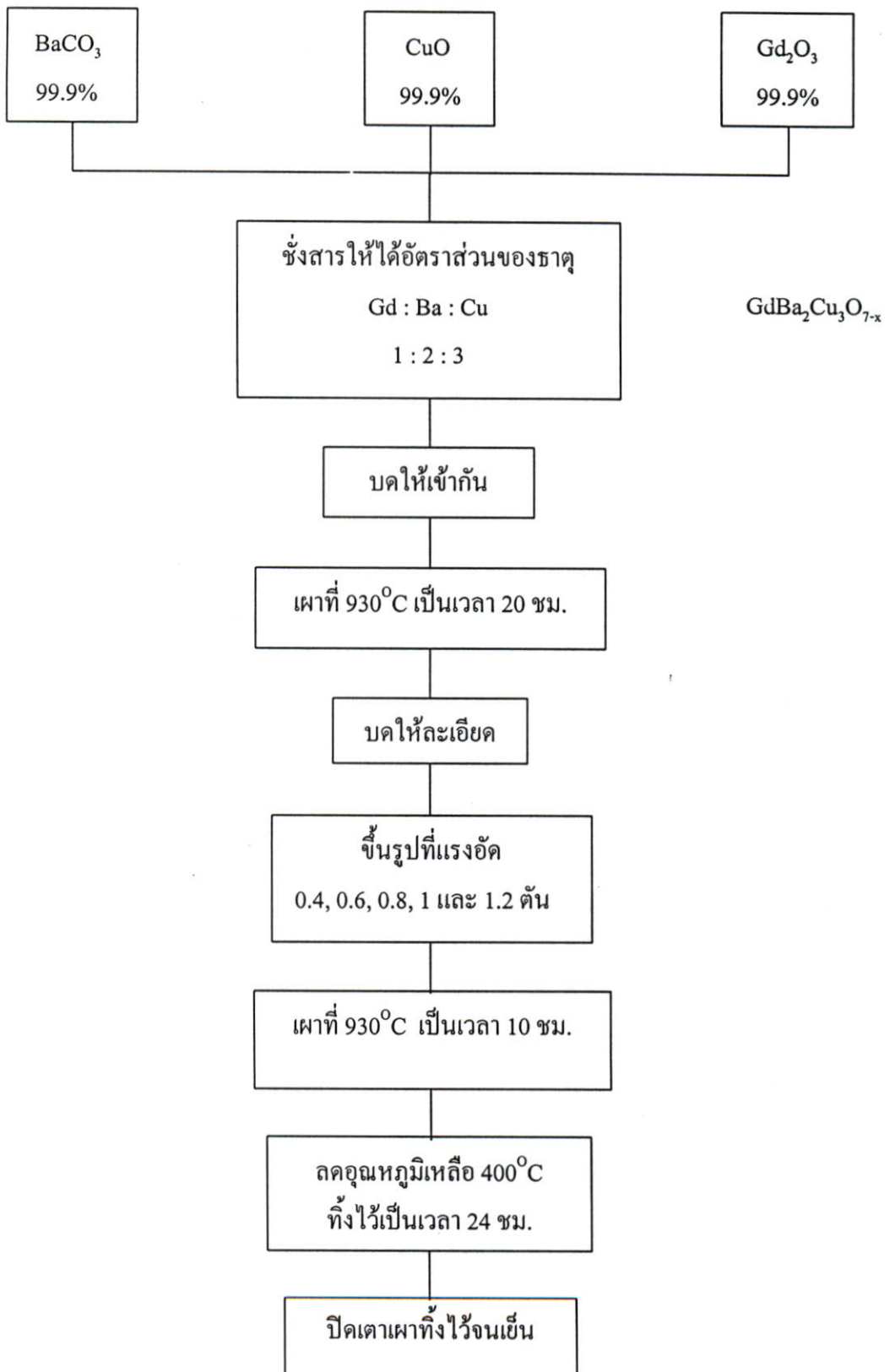
ในรูปที่ 3.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นซึ่งมีความแตกต่างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ ความต้านทานเชิงลบที่วัดได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกระแส เท่ากับ 1.5 A และที่แรงดันเท่ากับ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

3.2 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น

3.2.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่แรงอัดค่าต่างๆ

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

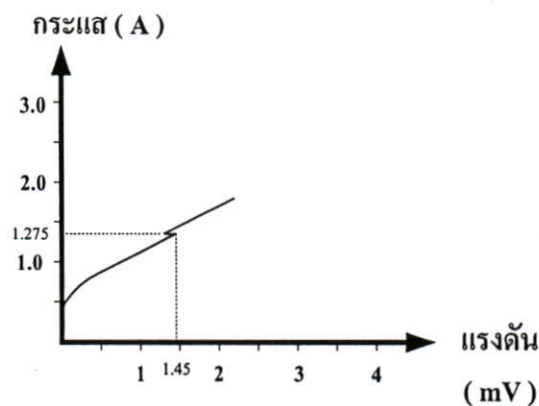


รูปที่ 3.6 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดในการขึ้นรูป 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน

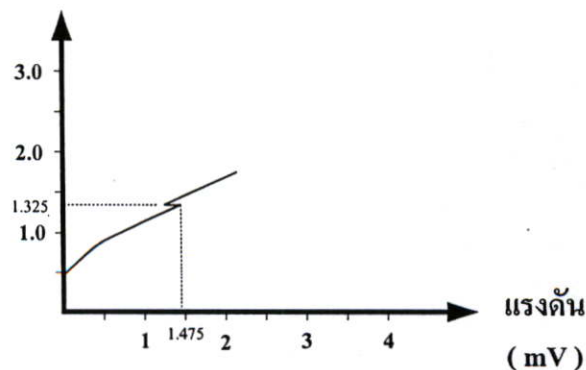
จากกระบวนการสร้างในรูปที่ 3.6 ในขั้นตอนแรกจะเป็นการนำเอาสาร $BaCO_3$, CuO และ Gd_2O_3 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:2:3 นำมาบดให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง นำสารที่ผ่านการเผามาบดให้ละเอียดเป็นผง จากนั้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำผงสารมาอัดขึ้นรูปให้เป็นเม็ด โดยเราจะแบ่งเม็ดสารที่ได้ออกเป็นกลุ่มตามแรงอัดในการขึ้นรูป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

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัดค่าต่างๆ

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

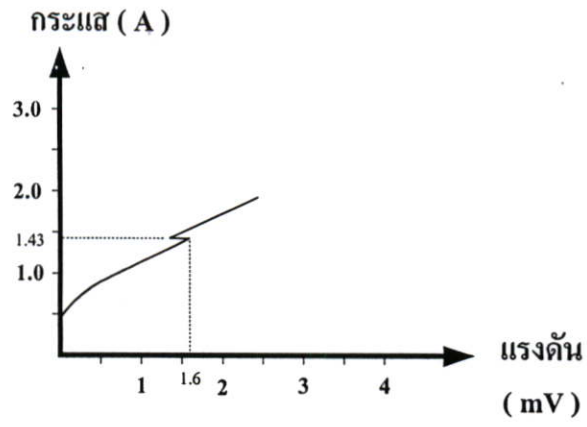


ก) แรงอัด 0.4 ตัน

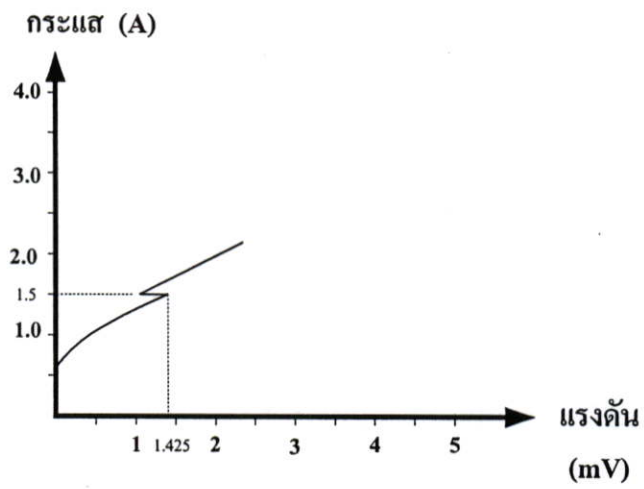


ข) แรงอัด 0.6 ตัน

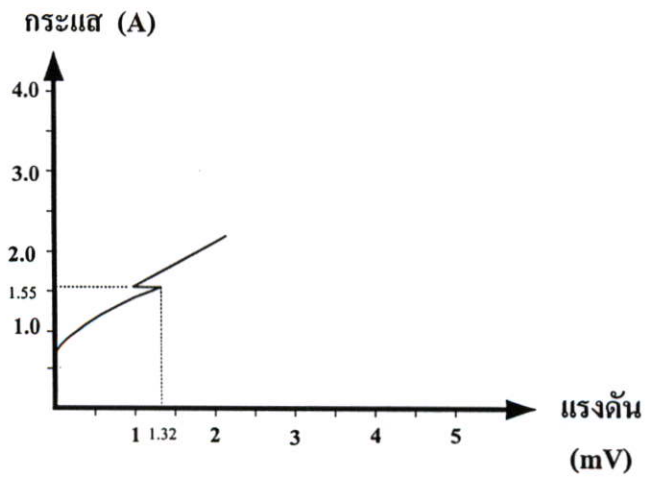
รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัด 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน



ค) แรงอัด 0.8 ตัน

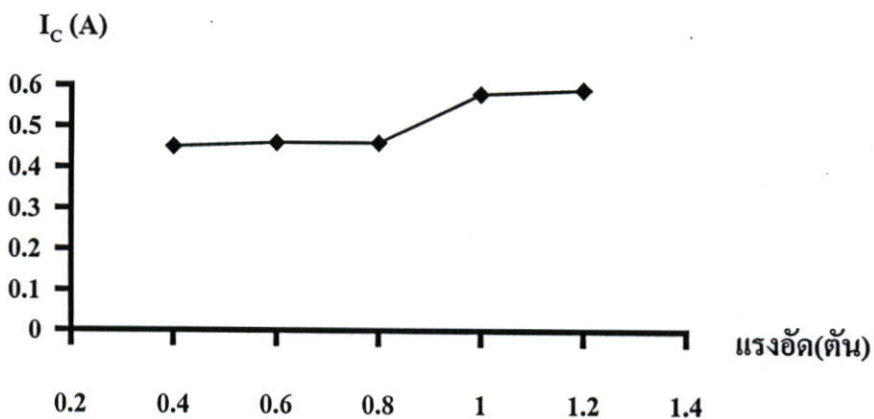


ง) แรงอัด 1.0 ตัน

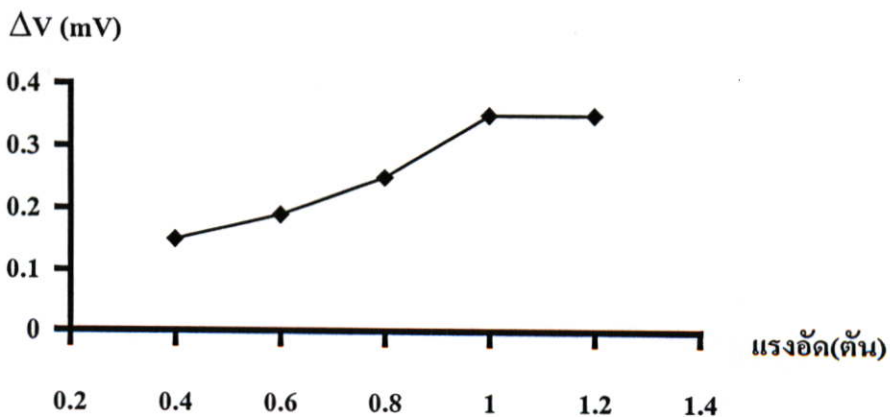


จ) แรงอัด 1.2 ตัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.7 ก)-จ) แสดงให้เห็นว่า ที่แรงอัดค่าต่ำสุดคือ 0.4 ตันจะมีปริมาณกระแสวิกฤตที่ต่ำสุดและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ (ΔV) จะน้อย เมื่อให้แรงอัดสูงขึ้นปริมาณกระแสวิกฤตจะสูงขึ้นและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔV) มีขนาดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับปริมาณกระแสวิกฤตแสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ (ΔV) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งพบว่าที่แรงอัด 1.2 ตัน ปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบเริ่มจะคงที่เมื่อเทียบกับแรงอัด 1 ตัน



รูปที่ 3.8 ปริมาณกระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ



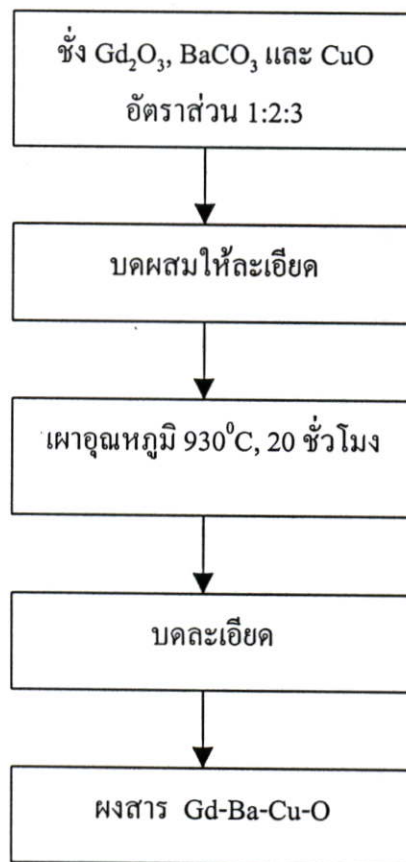
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบที่แรงอัดค่าต่างๆ

3.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่มีต่อคุณสมบัติความต้านทานระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า และปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น

3.3.1 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะเป็นการเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.10

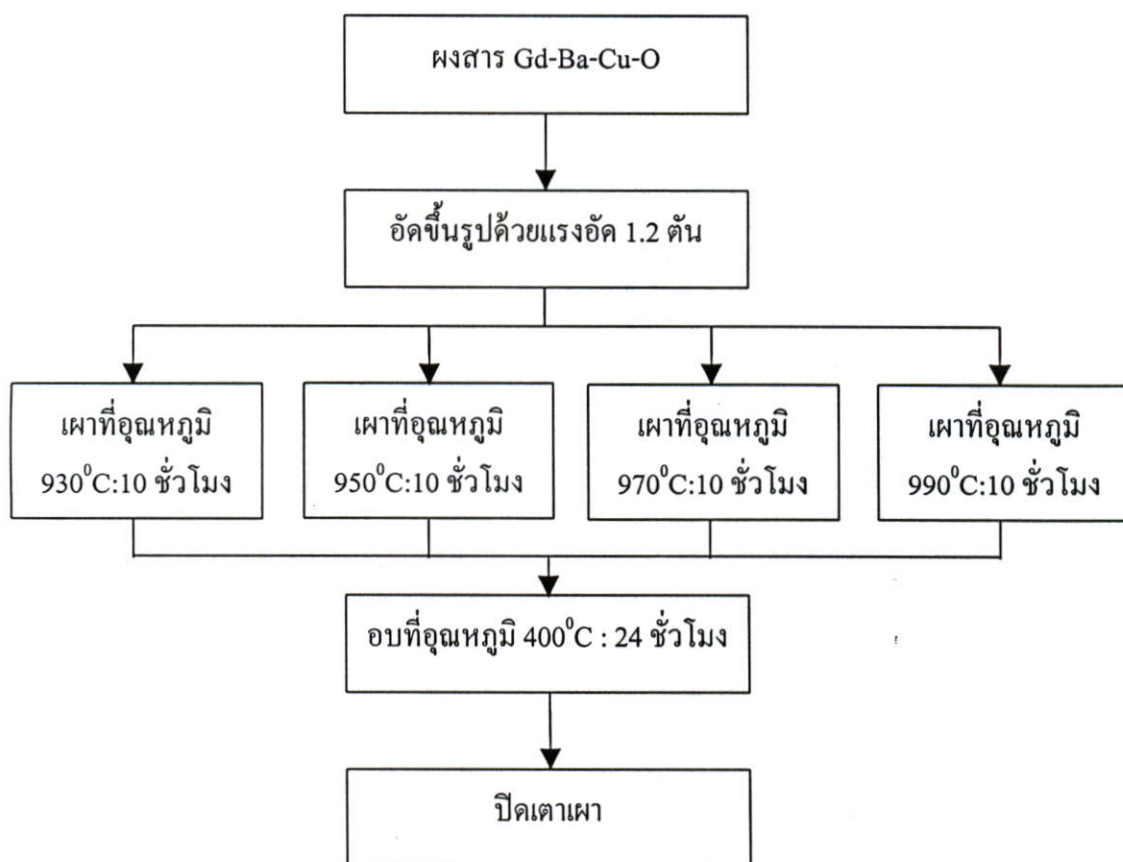


รูปที่ 3.10 การเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เริ่มจากนำผงสาร Gd_2O_3 , $BaCO_3$, และ CuO ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มาผสมกันในอัตราส่วน 1:2:3 นำผงสารมาบดผสมให้เข้ากันจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ $930^{\circ}C$ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการแยกเอาส่วน Non-Superconductor ซึ่งมีสีเขียวทิ้งไป แล้วนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียด จะได้ผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ออกมา

3.3.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเตรียมเม็ดสาร

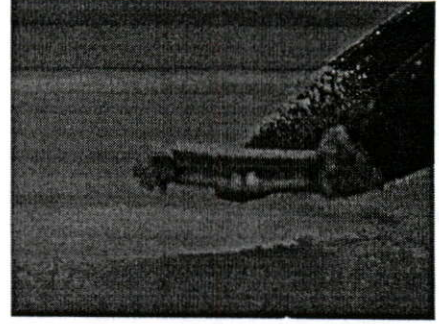
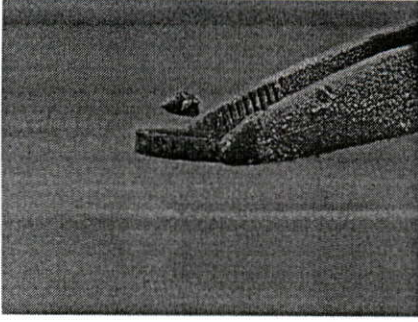
ในการอัดขึ้นรูปและการเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.11 เริ่มโดยการนำผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้จากขั้นตอนในรูปที่ 3.10 มาอัดขึ้นรูปที่แรงอัด 1.2 ตัน (ที่ใช้แรงอัด 1.2 ตัน เนื่องจากให้ปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีค่ามากที่สุด)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



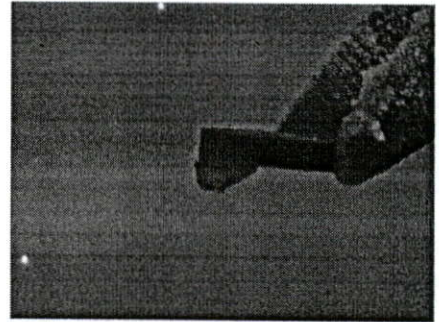
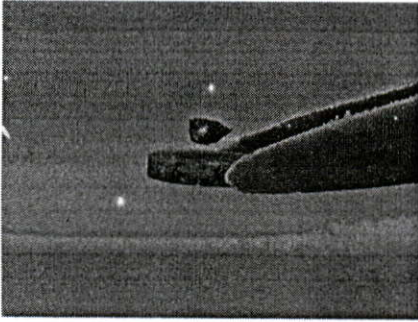
รูปที่ 3.11 กระบวนการอัดขึ้นรูปและการเผาที่อุณหภูมิ 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

3.3.3 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect)

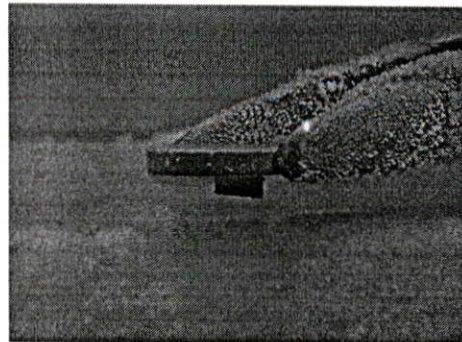
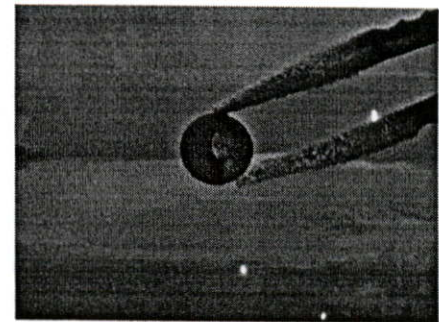
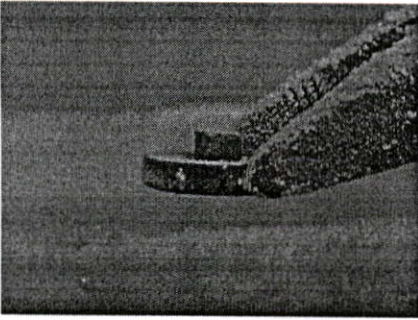
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดขึ้นรูป 1.2 ตัน มาทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.12



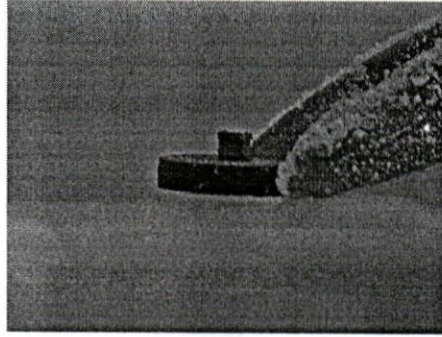
ก) อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส



ข) อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



ค) อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส



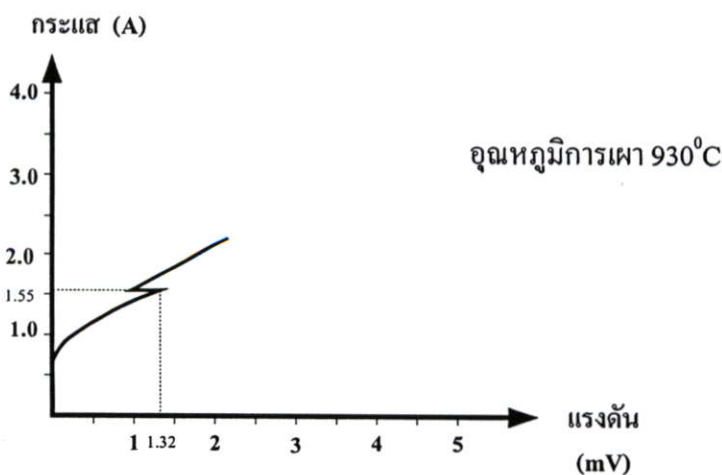
ง) อุณหภูมิ 990 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.12 ปραกฏการณ์ไมสเนอร์ที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

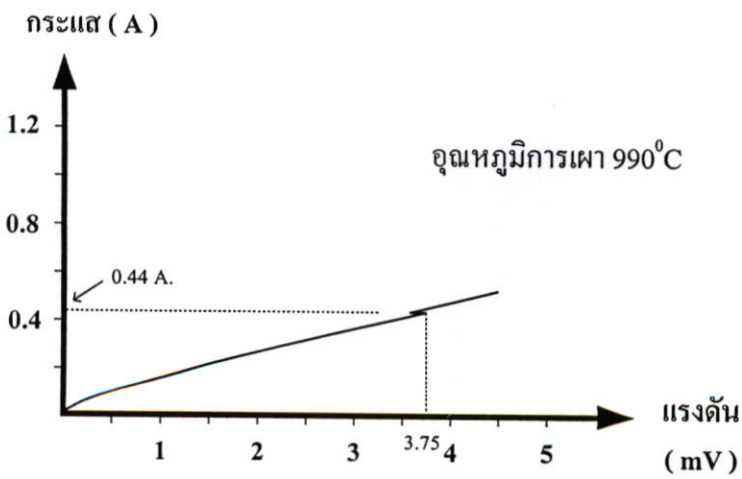
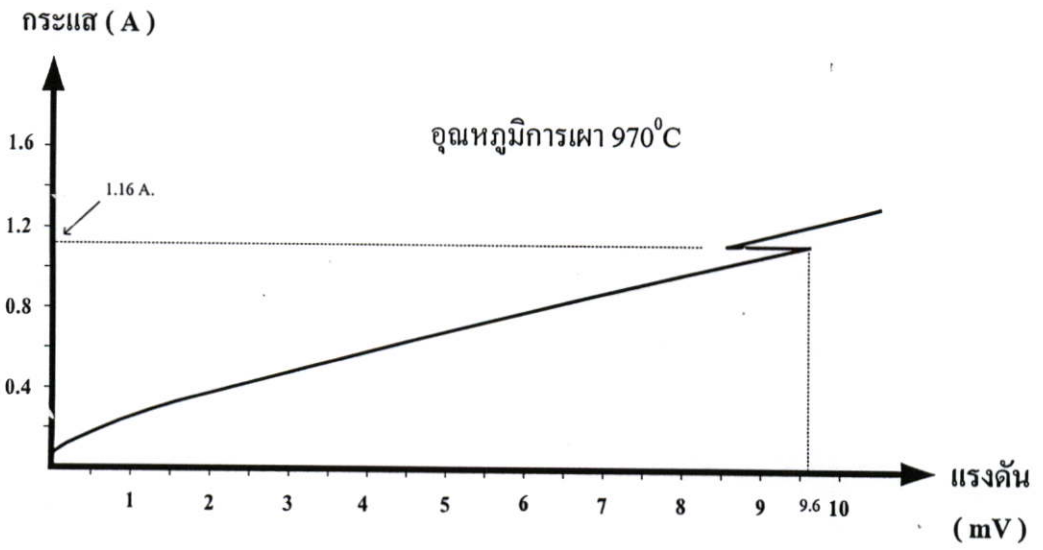
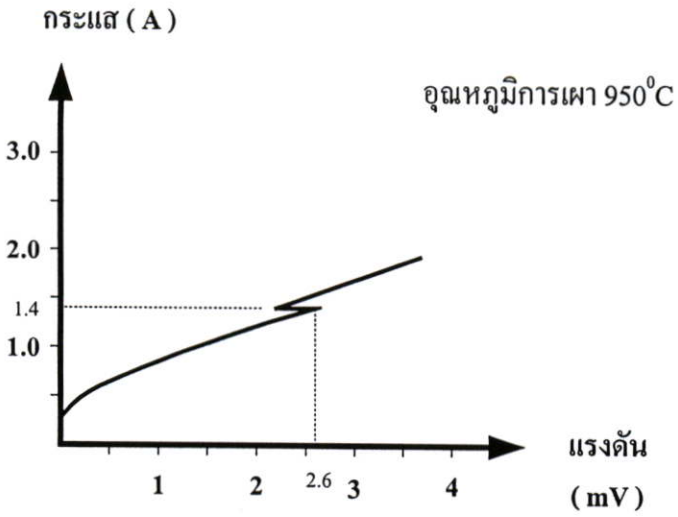
จากรูปที่ 3.12 พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะมีการหลีกแม่เหล็กได้สูงสุด และจะมีเพียงส่วนขอบของเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดบางส่วนเท่านั้นที่สามารถดูดแม่เหล็กได้ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ระยะในการหลีกแม่เหล็กจะต่ำลงและจะมีบริเวณที่สามารถดูดแม่เหล็กได้มากขึ้น ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส นั้น ระยะในการหลีกแม่เหล็กจะต่ำมาก แต่ส่วนที่สามารถดูดแม่เหล็กจะมีมากและมีแรงในการดูดแม่เหล็กมากกว่าอุณหภูมิการเผาอื่น ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส แทบจะไม่มีมีการหลีกแม่เหล็กเลยและการดูดแม่เหล็กมีน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเผาอื่น

3.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

หลังจากนำเม็ดสารมาทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดมาตัดแต่งรูปทรง จากนั้นนำชิ้นสารทั้งหมดมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.13

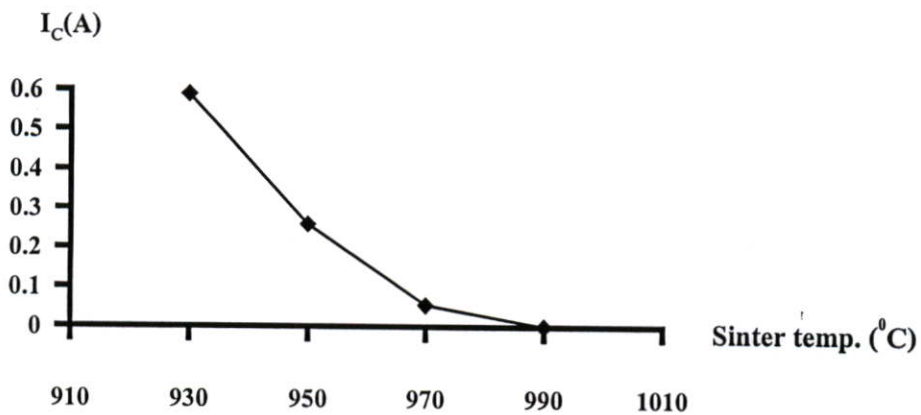


รูปที่3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส

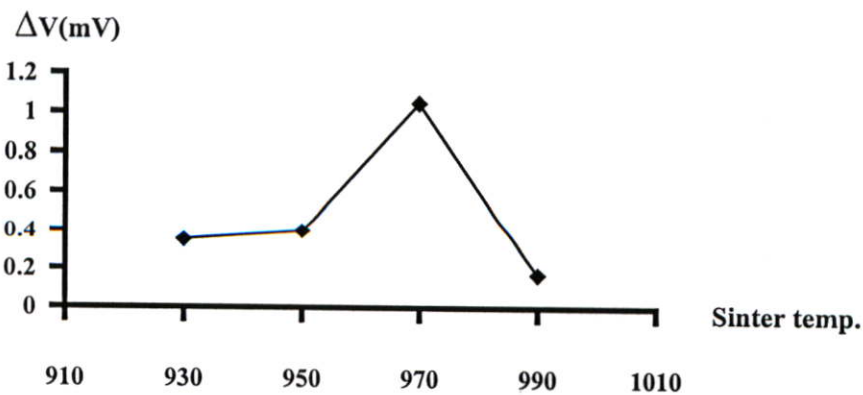


รูปที่ 3.13 (ต่อ)

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบดังนี้ พิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณกระแสวิกฤตที่สูงสุด เท่ากับ 0.59 A แต่จะมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔV) ขณะเกิดความต้านทานเชิงลบน้อยที่สุด เท่ากับ 0.35 mV แต่เมื่อให้อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 950 องศาเซลเซียส กระแสวิกฤตจะลดลงเหลือ 0.26 A ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าเท่ากับ 0.4 mV ซึ่งเพิ่มมากขึ้น และเมื่อให้อุณหภูมิการเผาเป็น 970 องศาเซลเซียส กระแสวิกฤตจะลดลงเหลือ 0.05 A. แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่ามากที่สุดคือ 1.05 mV และเมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 990 องศาเซลเซียส นั้นกระแสวิกฤตจะมีค่าต่ำที่สุดคือน้อยกว่า 0.1 mA และปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าเท่ากับ 0.17 mV ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเผาอื่น และเมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับกระแสวิกฤต และอุณหภูมิการเผากับปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ (ΔV) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับกระแส



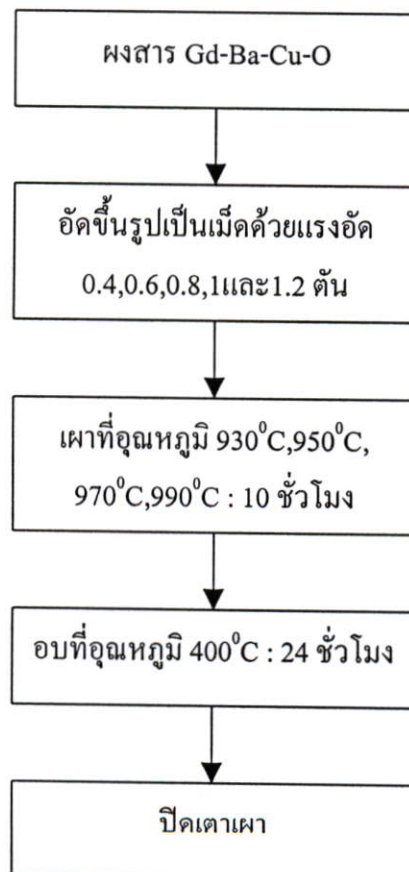
รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผากับปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ

3.4 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส ที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

3.4.1 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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



รูปที่ 3.16 กระบวนการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

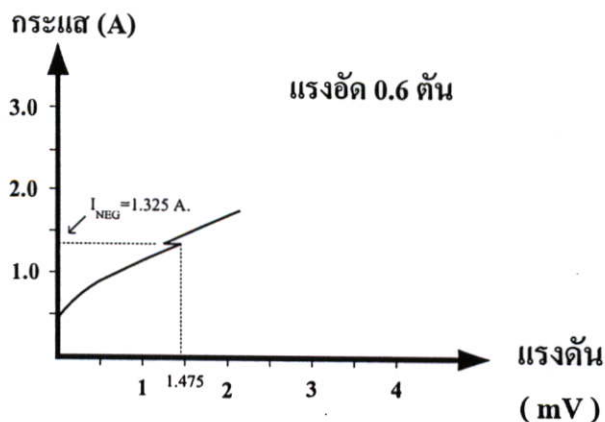
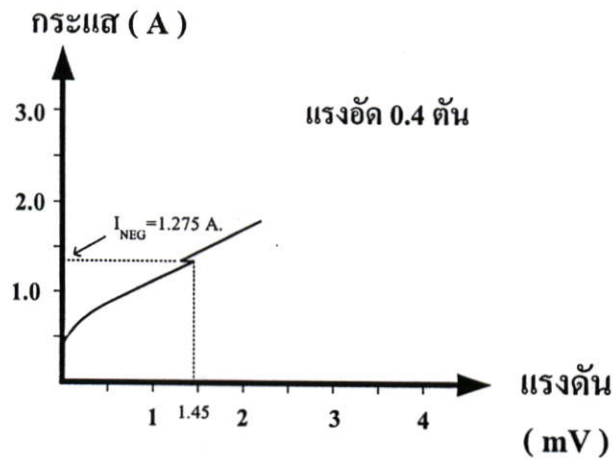
จากกระบวนการสร้างในรูปที่ 3.16 สามารถสรุปเป็นตารางแสดงการเผาเม็ดสารที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงการเผาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

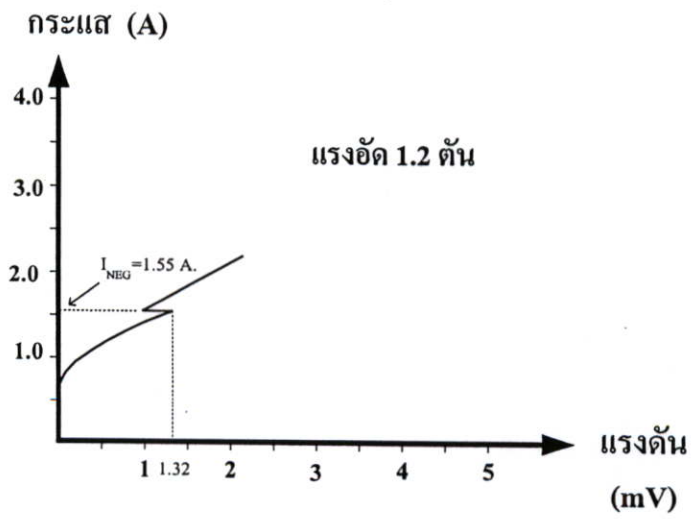
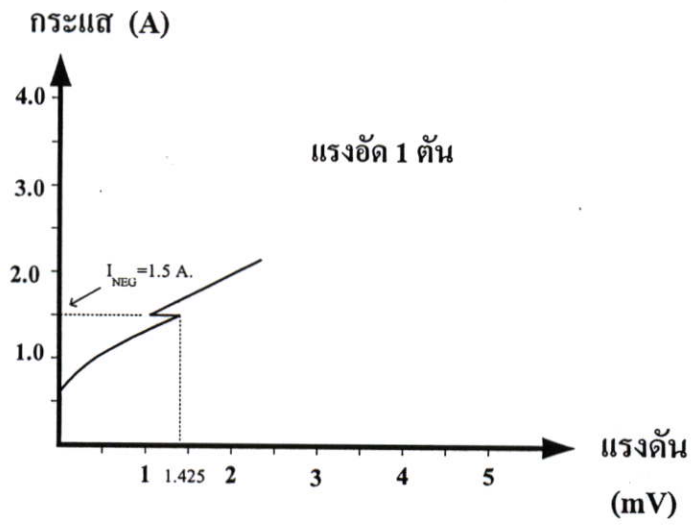
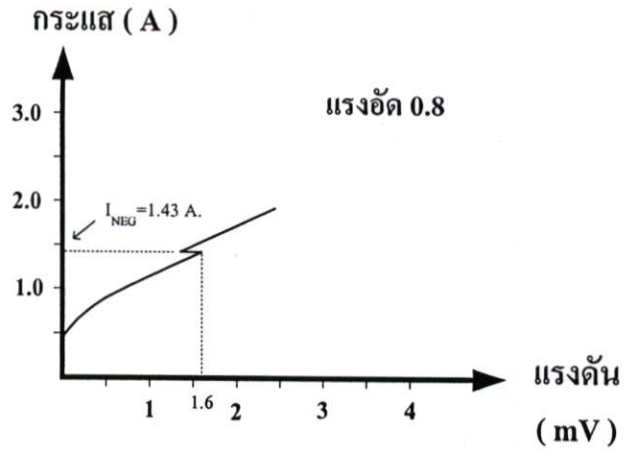
| อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส) | แรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูป (ตัน) | | | | |
|----------------------------------|--------------------------------|---------|---------|-------|---------|
| | 0.4 ตัน | 0.6 ตัน | 0.8 ตัน | 1 ตัน | 1.2 ตัน |
| 930 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 950 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 970 | ✓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

3.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

หลังจากที่ได้เม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.16 แล้ว ต่อไปจะเป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.17 ก)-ง)

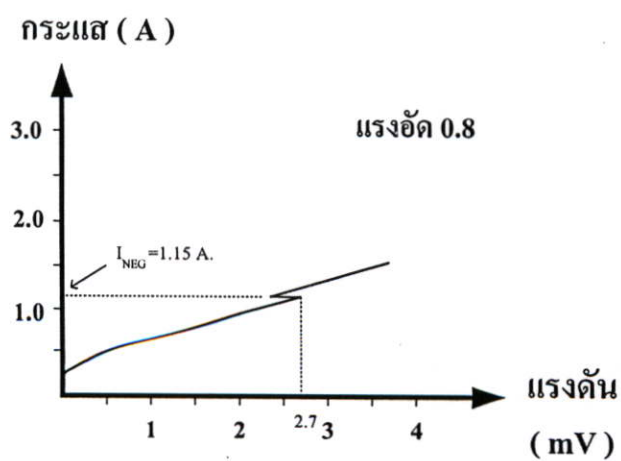
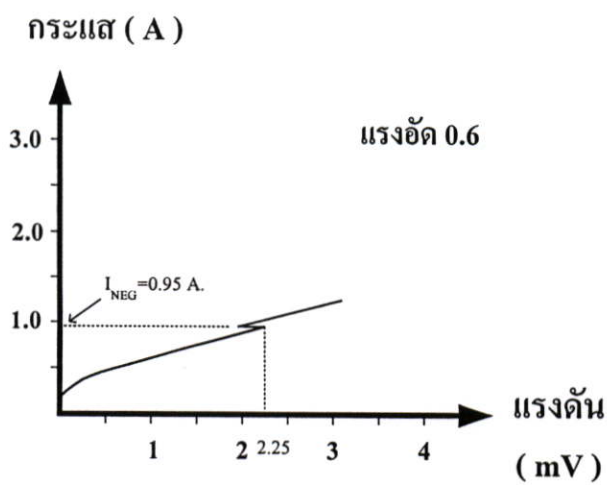
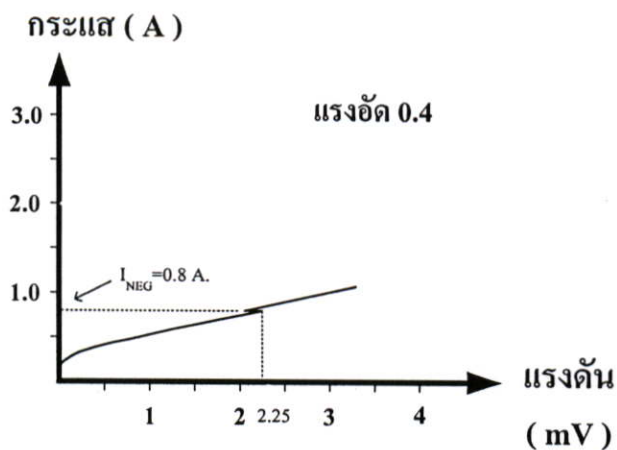


รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

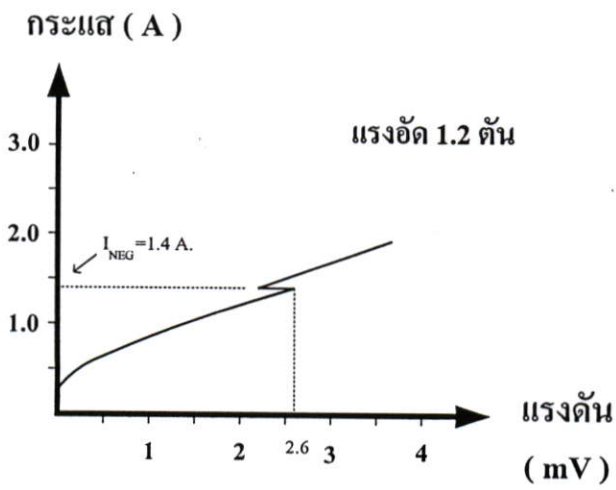
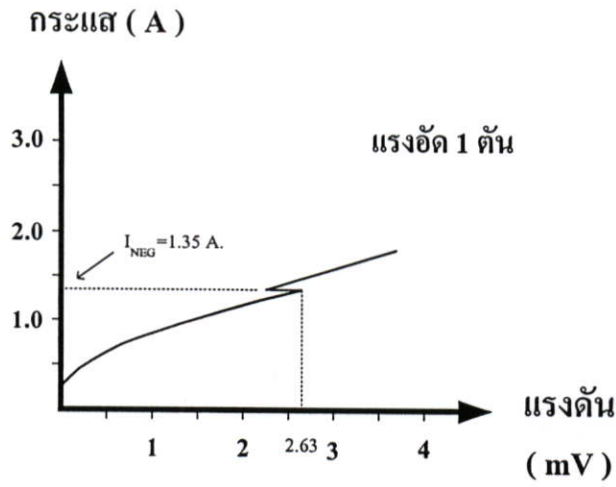


ก) อุณหภูมิการเผา 930°C

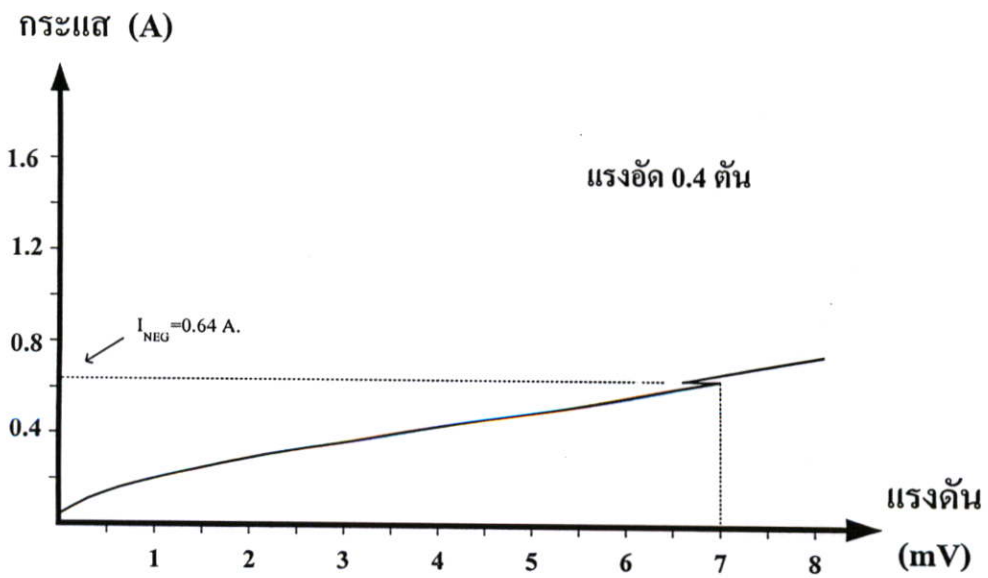
รูปที่ 3.17 (ต่อ)



รูปที่ 3.17 (ต่อ)

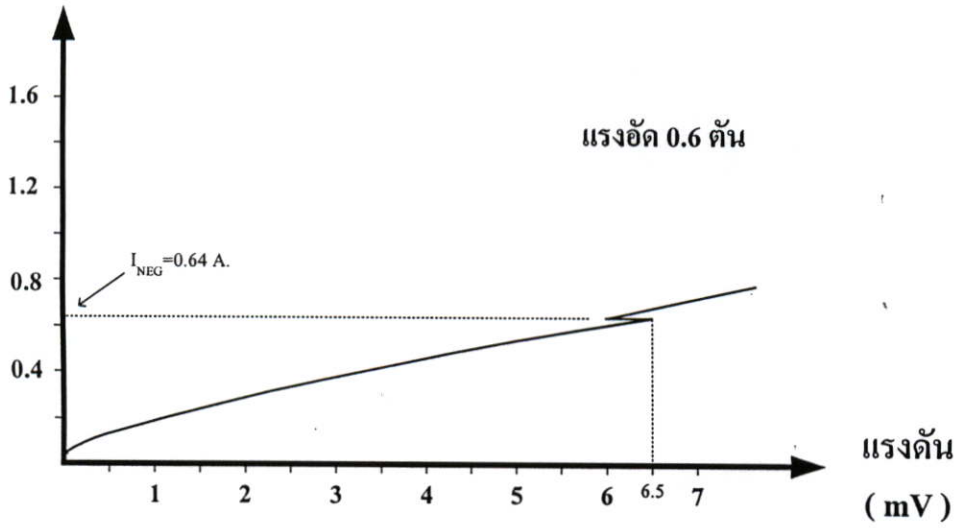


ข) อุณหภูมิการเผา 950°C

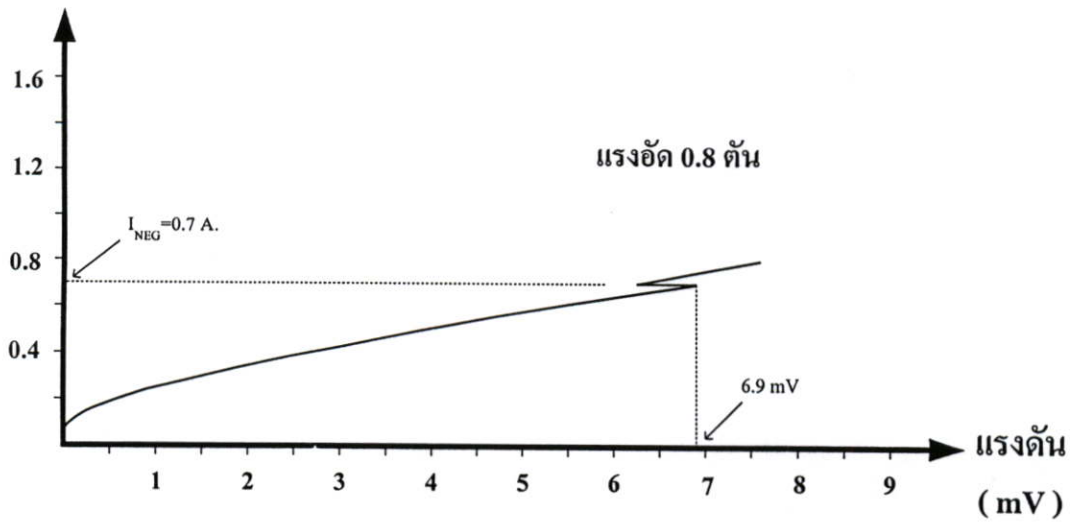


รูปที่ 3.17 (ต่อ)

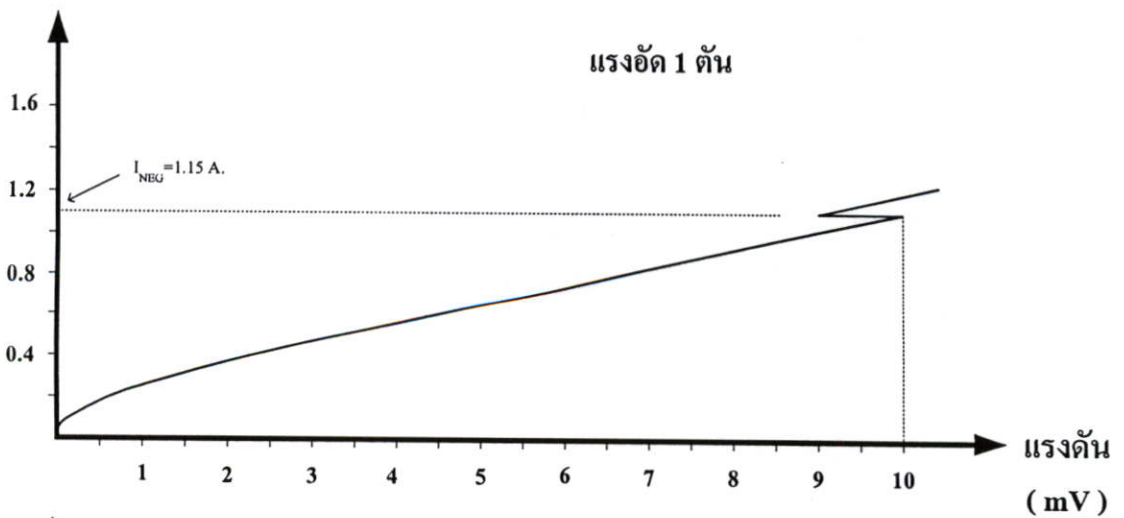
กระแส (A)



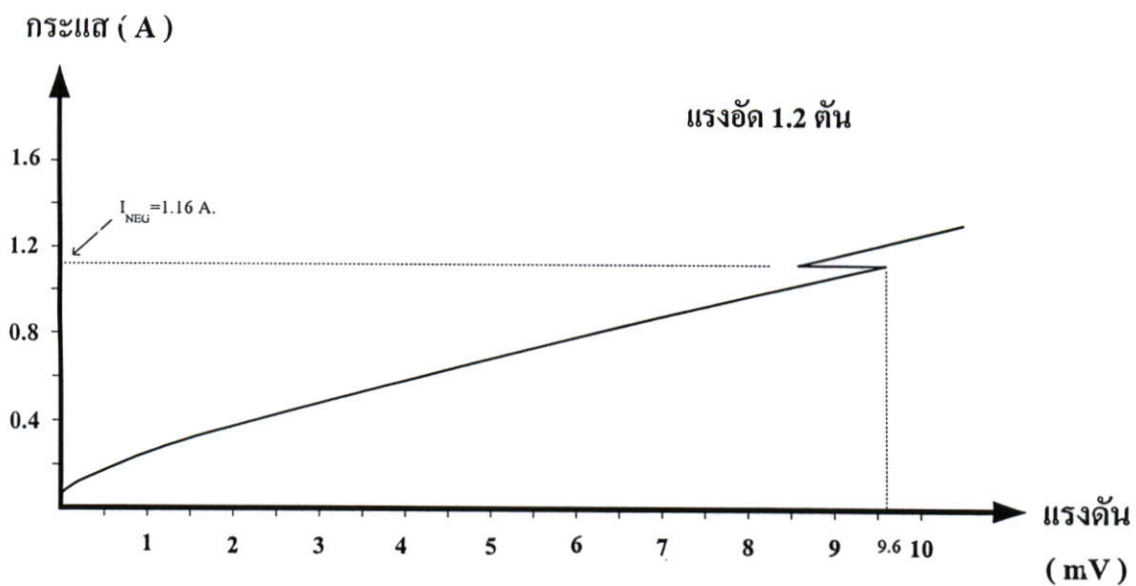
กระแส (A)



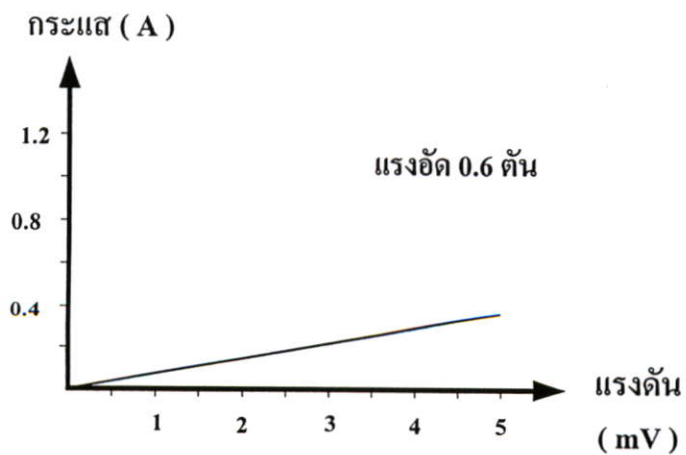
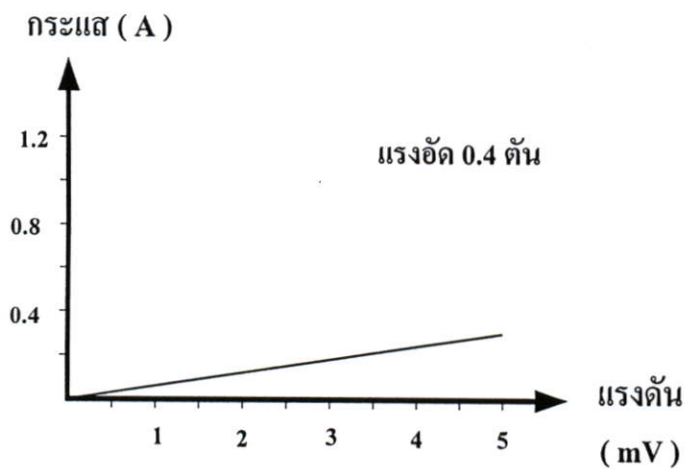
กระแส (A)



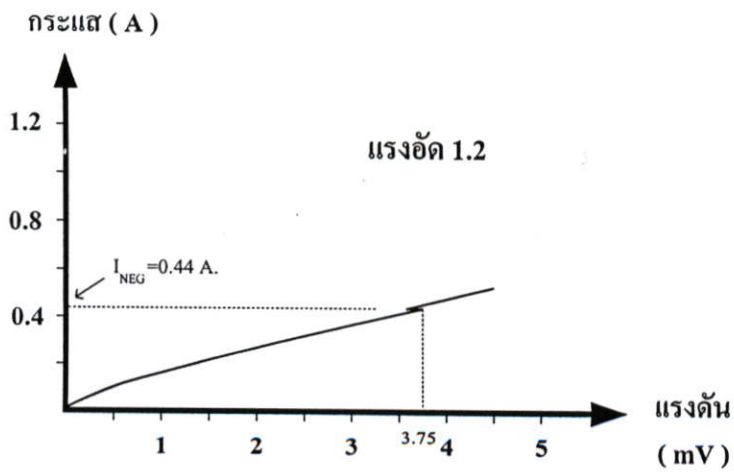
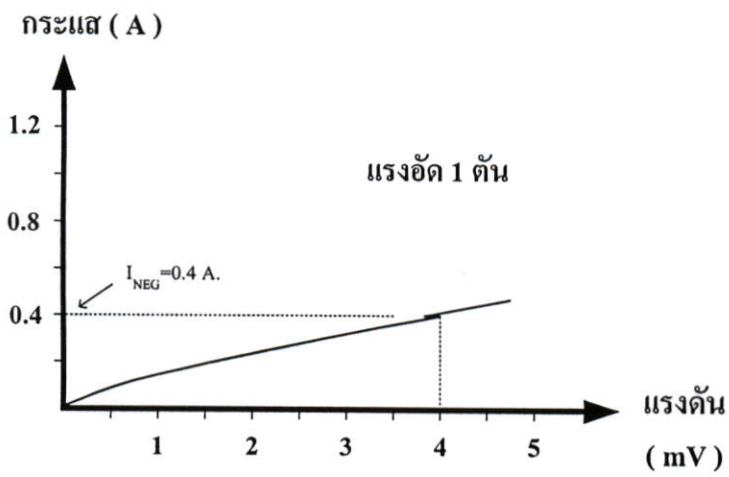
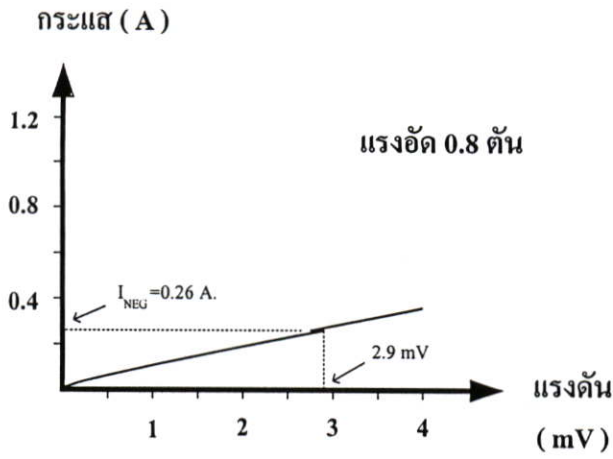
รูปที่ 3.17 (ต่อ)



ค) อุณหภูมิการเผา 970°C



รูปที่ 3.17 (ต่อ)

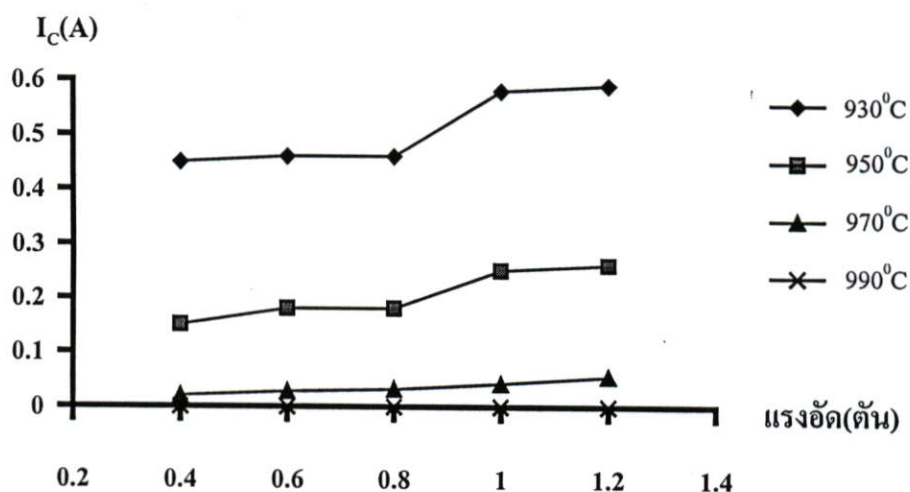


ง) อุณหภูมิการเผา 990°C

รูปที่ 3.17 (ต่อ)

3.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับกระแสวิกฤต

พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 3.17 ก)-ง) สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับปริมาณกระแสวิกฤตที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

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

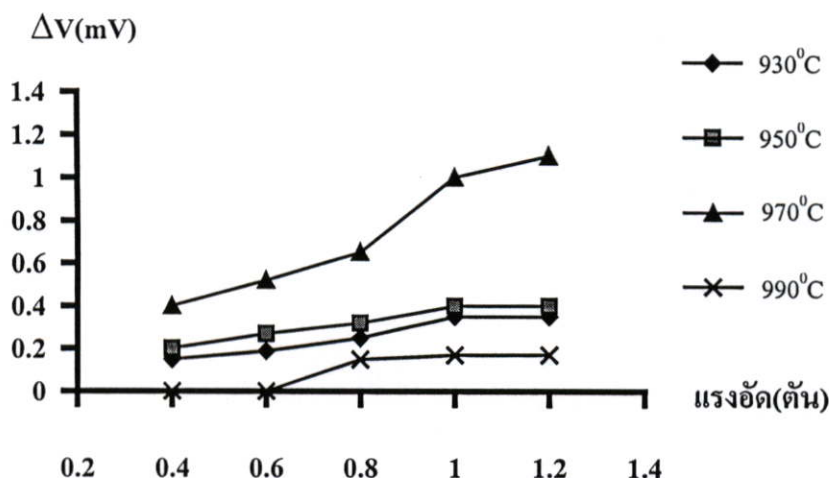
พิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส กระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ จะมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส กล่าวคือที่แรงอัดต่ำสุด 0.4 ตัน จะได้ปริมาณกระแสวิกฤต 0.15 A และเมื่อให้แรงอัดเพิ่มมากขึ้น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

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

ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าต่ำมาก คือต่ำกว่า 1 mA นั้นแสดงว่าชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการเสถียรภาพได้ง่าย

3.4.2.2 ความสัมพันธ์ของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปกับขนาดของความต้านทานเชิงลบที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

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



รูปที่ 3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความต้านทานเชิงลบกับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

จากกราฟในรูปที่ 3.19 แสดงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อขนาดของความต้านทานเชิงลบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า

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

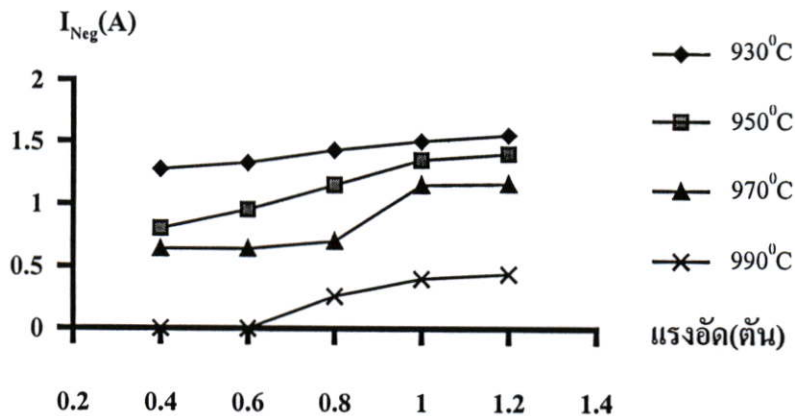
พิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าขนาดของความต้านทานเชิงลบ (ΔV) จะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาดของความต้านทานเชิงลบ (ΔV) ที่แรงอัดค่าต่างๆก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส กล่าวคือที่แรงอัดค่าสุด 0.4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

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

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

3.4.2.3 ตำแหน่งการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.17 เราจะมาพิจารณาถึงตำแหน่งของการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่ตำแหน่งกระแส (I_{Neg}) ค่าต่างๆ ซึ่งเราสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของกระแสที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ (I_{Neg}) กับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกระแสที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบกับแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970, 990 องศาเซลเซียส

จากกราฟ ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ (I_{Neg}) จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิการเผาอื่น พิจารณาที่แรงอัดค่าต่ำสุดคือ 0.4 ตัน ตำแหน่งกระแส (I_{Neg}) มีค่าเท่ากับ 1.275 A. ที่แรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 ตัน ตำแหน่งกระแสก็จะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 1.325, 1.43, 1.5, 1.55 A ตามลำดับ

ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นตามแรงอัดที่เพิ่มมากขึ้น อย่างเช่น ที่แรงอัด 0.4 ตัน ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) มีค่าเท่ากับ 0.8 A. และที่แรงอัดสูงสุด 1.2 ตัน ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) จะเพิ่มขึ้นเป็น 1.4 A.

ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) จะมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 และ 950 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ที่แรงอัด 0.4 ตัน ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) จะอยู่ที่ 0.64 A. พิจารณาที่แรงอัดสูงสุด 1.2 ตัน ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) จะเพิ่มขึ้นเป็น 1.16 A.

ที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส จากกราฟจะเห็นได้ว่า แรงอัดที่ 0.4 และ 0.6 ตัน จะไม่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบขึ้น แต่ที่แรงอัด 0.8 ตัน จะเกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้นที่ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) เท่ากับ 0.26 A และที่แรงอัด 1.2 ตัน ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) จะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.44 A

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ

| อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส) | ความต้านทาน ณ ตำแหน่งเริ่มเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ (mΩ) | | | | |
|----------------------------------|---|---------|---------|---------|---------|
| | 0.4 ตัน | 0.6 ตัน | 0.8 ตัน | 1.0 ตัน | 1.2 ตัน |
| 930 | 1.14 | 1.11 | 1.11 | 0.95 | 0.85 |
| 950 | 2.81 | 2.37 | 2.35 | 1.95 | 1.86 |
| 970 | 10.94 | 10.16 | 9.86 | 8.7 | 8.28 |
| 990 | - | - | 11.15 | 10 | 8.52 |

จากตารางที่ 3.1 เป็นตารางที่บอกค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ที่แรงอัด 0.4 ตัน การหาค่าความต้านทานเราจะพิจารณาในขณะที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบขึ้น คือที่ตำแหน่งกระแส (I_{Neq}) เท่ากับ 1.275 A. ที่แรงดัน 1.45 mV ดังนั้นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนี้มีค่าเท่ากับ 1.14 mΩ. ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ตำแหน่งของการเกิดความต้านทานเชิงลบจะมีค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุด ส่วนผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปจะเห็นว่าถ้าแรงอัดที่ใช้มีค่าสูงขึ้น ค่าความต้านทานจะลดต่ำลง ตามลำดับ ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น เป็น 950, 970, 990 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่แรงอัด ณ อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานจะลดน้อยลงเมื่อแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 4

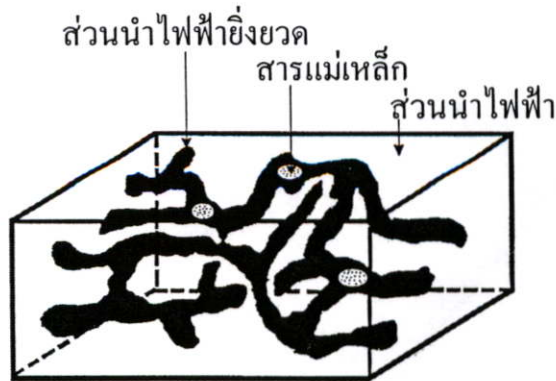
แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

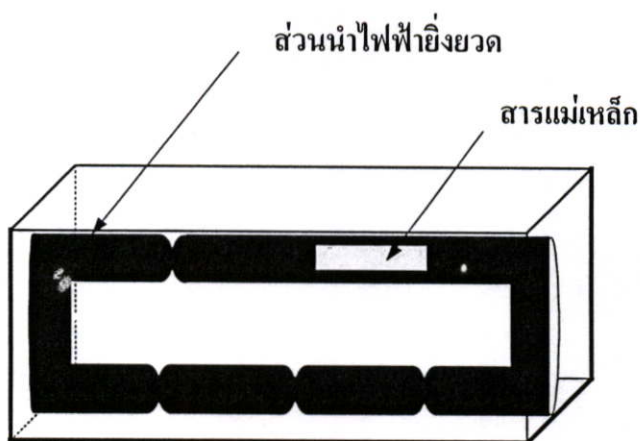
4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค [10]

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้น มีลักษณะเนื้อสารเป็นเซรามิก และจากการทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ทำให้เราได้ทราบว่า มีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในเนื้อสาร ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแกดโกลิเนียม จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O พิจารณาได้ว่า ในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นนั้น ประกอบด้วยส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การที่เม็ดสารสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น หมายความว่า จะต้องมีการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและต่อกันอยู่อย่างต่อเนื่อง แต่ลักษณะการเชื่อมต่อจะไม่สม่ำเสมอ คือมีการเชื่อมต่ออย่างแข็งและการเชื่อมต่ออย่างหลวม หรือที่เรียกว่า จุดคอด ซึ่งเกิดจากการอัดผงสารเข้าด้วยกัน จึงทำให้สารเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ยังมีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในอีกด้วย ดังรูปที่ 4.1

แต่เพื่อให้เข้าใจต่อความเข้าใจ ในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ จะถูกแทนด้วยท่อนำกระแสไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งในส่วนของท่อด้านล่าง จะมีบริเวณจุดคอด 3 จุด ส่วนท่อบนมีบริเวณจุดคอด 1 จุดและมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในท่อทางด้านขวา ดังรูปที่ 4.2 ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า การที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเสียดสภาพได้นั้น เกิดจากส่วนที่เป็นท่อดำนำไฟฟ้ายิ่งยวดขาดออก และบริเวณที่ขาดง่ายที่สุดคือ บริเวณส่วนของจุดคอด ในส่วนของท่อดำนำไฟฟ้ายิ่งยวด บริเวณที่มีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นปริมาณมากพอ ในส่วนนี้ก็จะขาดออกและขาดเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากสารแม่เหล็กที่อยู่ภายในท่อดำมีขนาดใหญ่



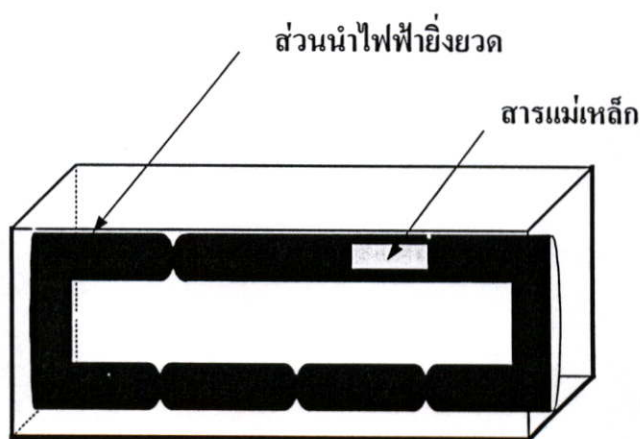
รูปที่ 4.1 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O



รูปที่ 4.2 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

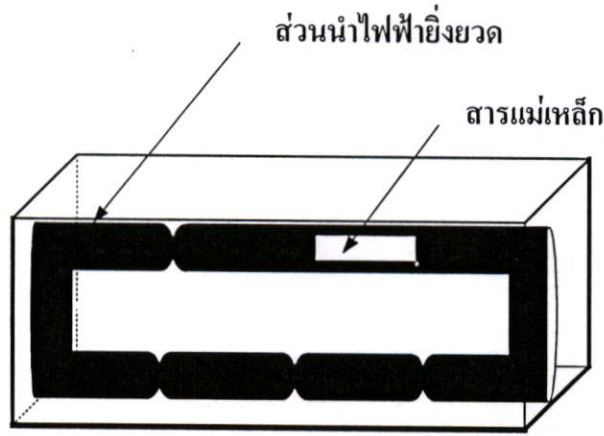
4.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.3.3 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส นั้น มีผลต่อปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.14 ดังนั้นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O จึงมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผา ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.3 ก)-ง)

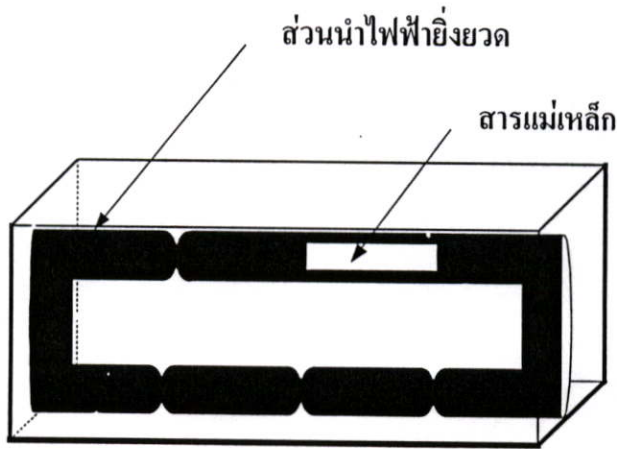


ก) อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส

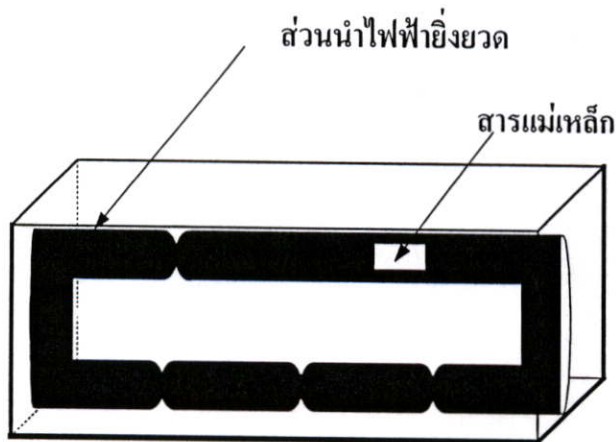
รูปที่ 4.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิการเผา 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส



ข) อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส



ค) อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส



ง) อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส

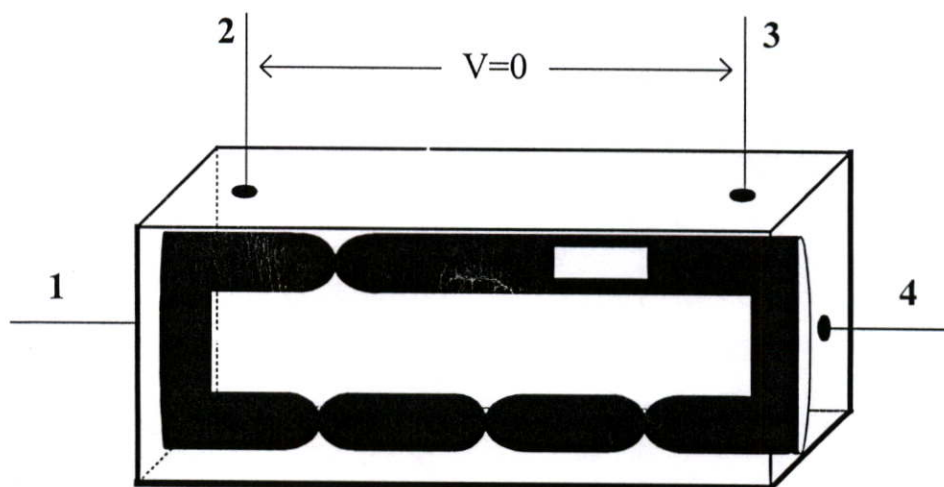
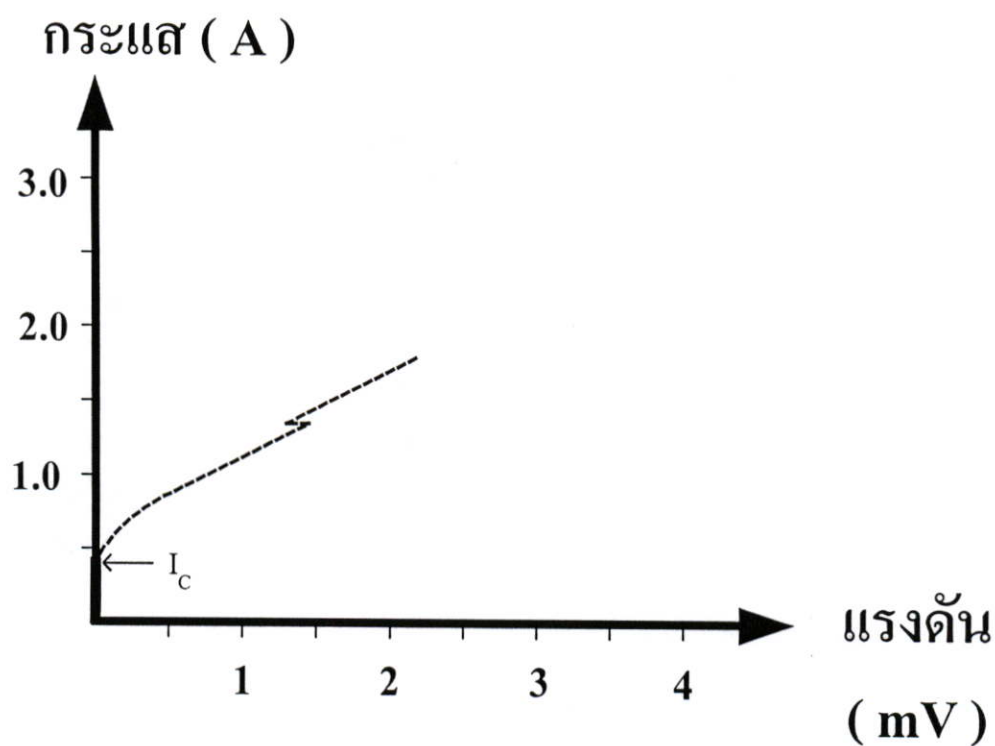
ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จากการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์พบว่า เม็ดสารมีจุดที่ดูดแม่เหล็กน้อยมาก แต่จะมีการผลึกเม็ดแม่เหล็กเป็นส่วนใหญ่ นั้นแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของสารแม่เหล็กในเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่อนข้างน้อย ดังนั้นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูป 4.3ก) ซึ่งจะเห็นว่าส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กจะมีขนาดค่อนข้างเล็ก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 950 องศาเซลเซียส เม็ดสารจะมีบริเวณที่ดูดแม่เหล็กได้เพิ่มมากขึ้นและความสูงในการผลึกแม่เหล็กจะลดลง แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ได้จึงเป็นดังรูปที่ 4.3ข) ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีจุดที่สามารถดูดแม่เหล็กได้หลายจุดและแรงในการดูดแม่เหล็กมีมากกว่าอุณหภูมิการเผาอื่น ส่วนบริเวณที่มีการผลึกแม่เหล็กจะน้อยและความสูงในการผลึกแม่เหล็กจะต่ำกว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 และ 950 องศาเซลเซียส นั้นแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของสารแม่เหล็กในเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีมาก แบบจำลองโครงสร้างมหภาคจึงมีบริเวณสารแม่เหล็กค่อนข้างใหญ่ ดังรูปที่ 4.3ค) ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส เม็ดสารแทบจะเสียดสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งแสดงได้จากปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยที่เม็ดสารแทบจะไม่ผลึกแม่เหล็กเลยและแรงในการดูดแม่เหล็กน้อยมาก ดังนั้นจากแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กจึงมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเผาอื่น ดังรูปที่ 4.3ง)

4.3 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมานอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

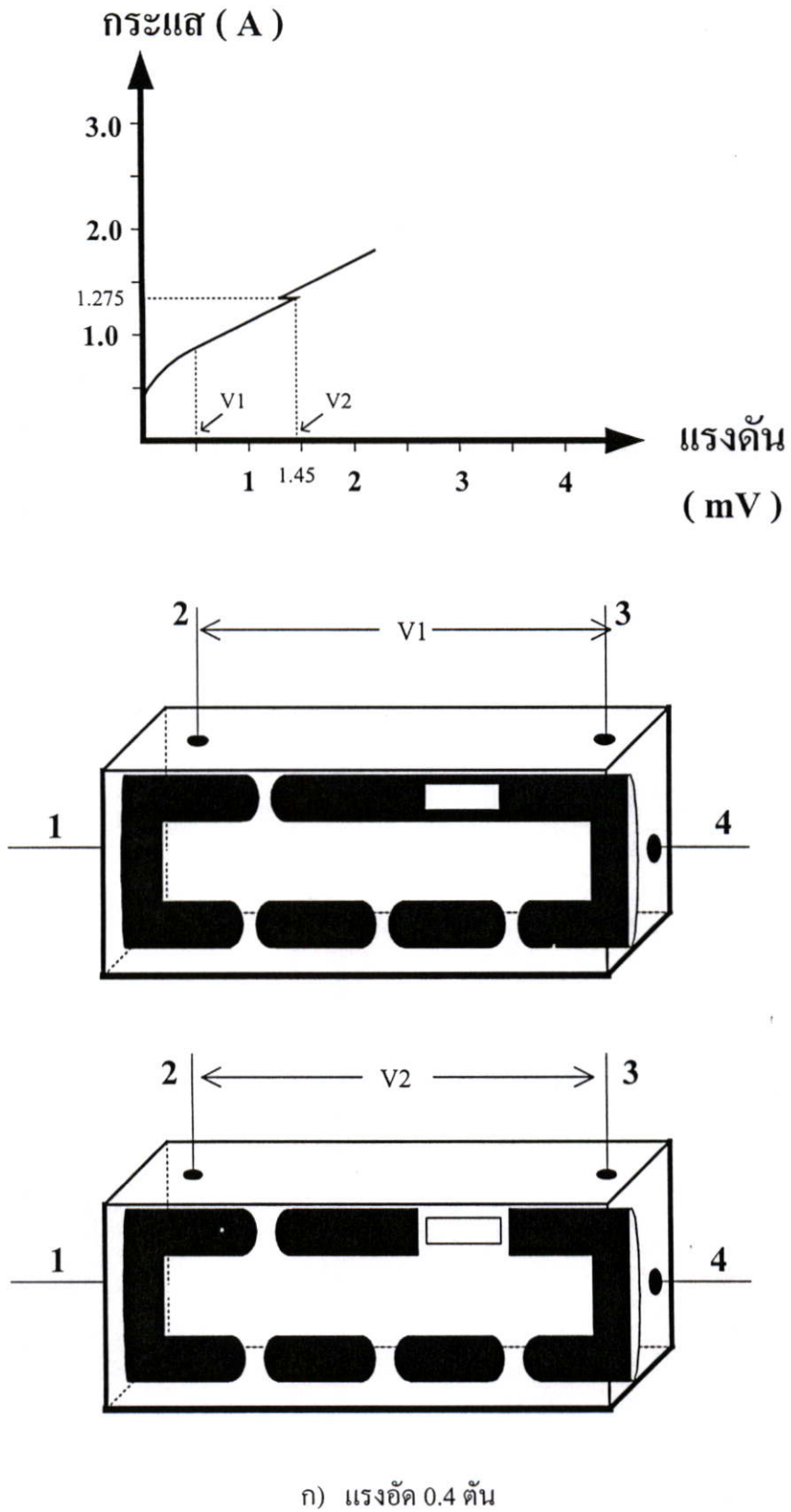
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่ได้นำเสนอมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.4 ดังนี้

4.3.1 อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

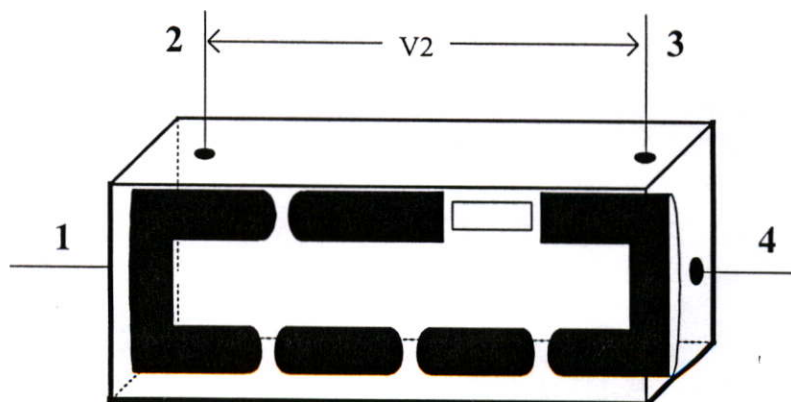
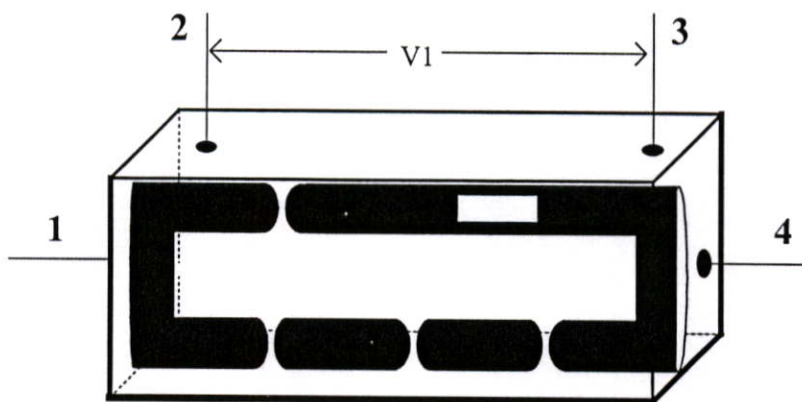
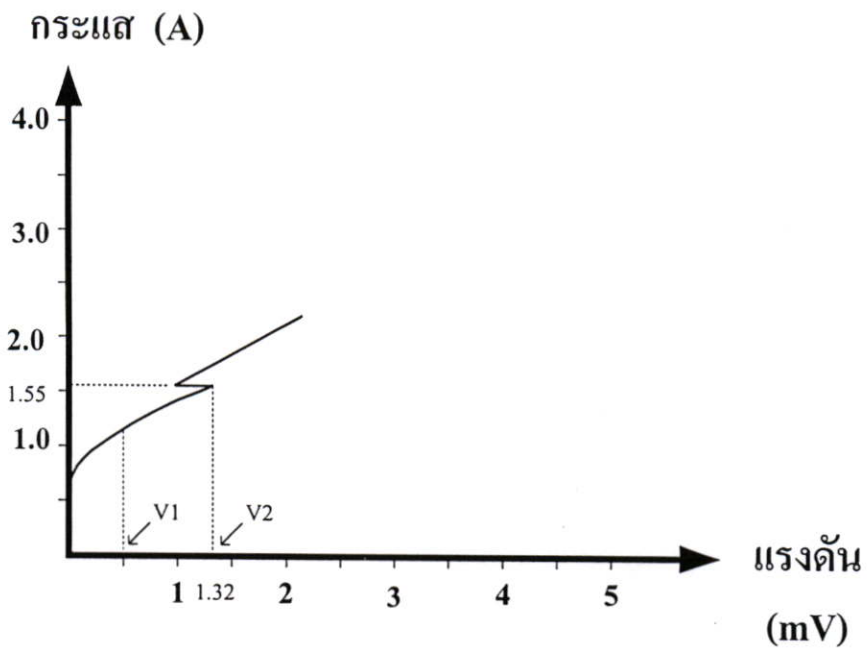
จากผลการทดลองที่ 3.19ก) พบว่า ที่อุณหภูมิการเผา 930°C ที่แรงอัดต่ำสุด 0.4 ตัน ปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจะน้อยที่สุด และเมื่อเพิ่มแรงอัดให้มากขึ้นเป็น 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 ตัน จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันของความต้านทานเชิงลบจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเพื่อให้สอดคล้องความเข้าใจในการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมานอธิบาย จึงเปรียบเทียบเฉพาะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แรงอัด 0.4 กับ 1.2 ตัน ดังรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 ก)-ข)



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



รูปที่ 4.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (930 องศาเซลเซียส) เมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต



ข) แรงอัด 1.2 ตัน

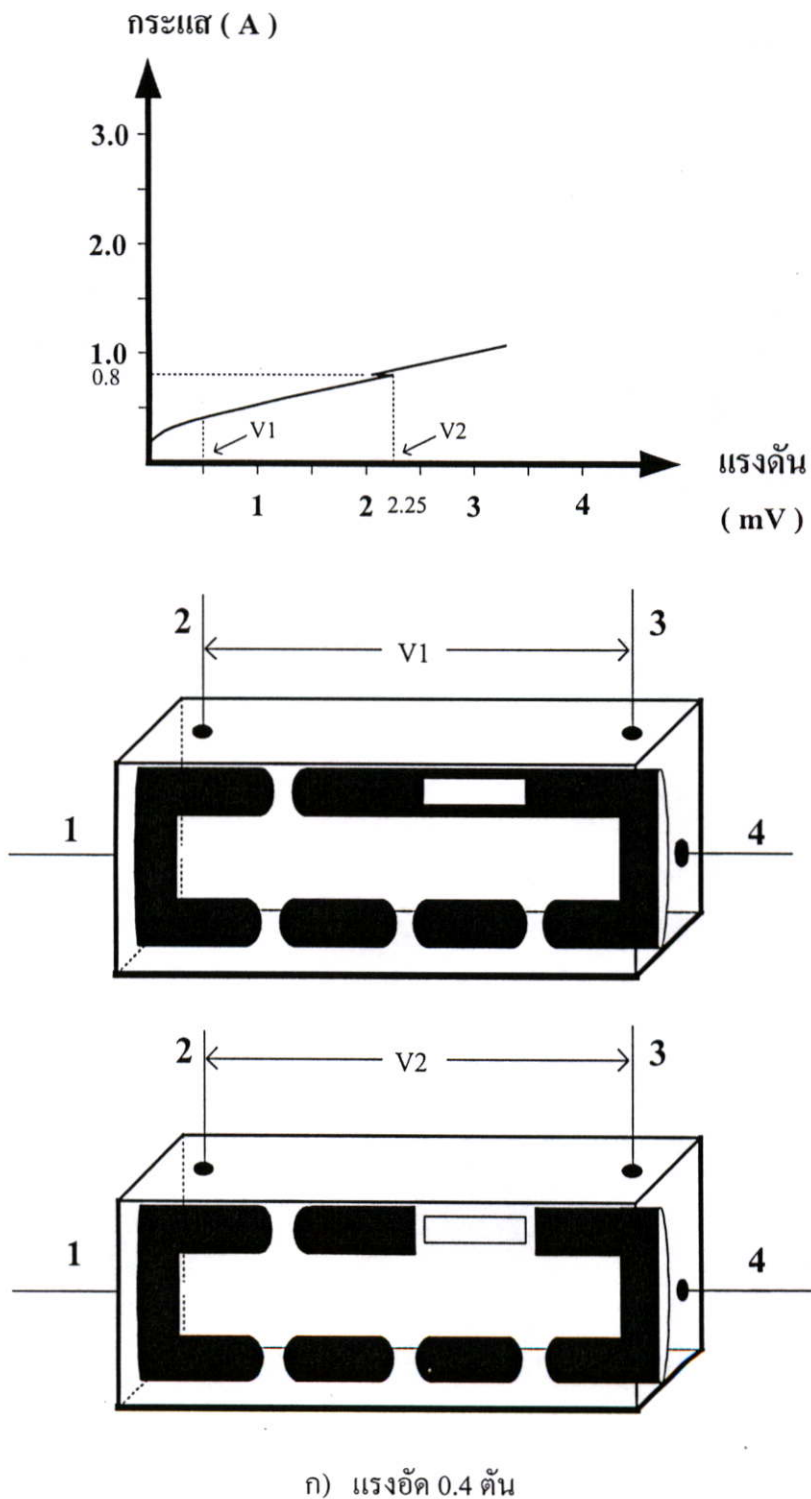
รูปที่ 4.5 (ต่อ)

จากกราฟในรูปที่ 4.4 และ 4.5ก) เป็นการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งที่แรงอัด 0.4 ดัน จากกราฟพบว่ากระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.45 A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขณะที่กระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งปริมาณน้อยกว่า 0.45 A บริเวณจุดคอดทั้งหมดยังเชื่อมต่อกันอยู่ จึงไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร แต่เมื่อกระแสไหลผ่านเกินกว่า 0.45 A จะทำให้จุดคอดขาดออกจากกันทั้งหมด สาเหตุที่ทำให้จุดคอดขาดออกจากกัน เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความต้านทานขึ้นบริเวณจุดขาดและมีแรงดันตกคร่อมขึ้นสารขึ้น แต่เนื่องจากส่วนของจุดคอดด้านบนขาดเป็นปริมาณน้อยกว่าส่วนขาดของจุดคอดด้านล่างมาก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดในขณะนี้ไหลผ่านท่อด้านล่าง ในสภาวะนี้เราจะพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารเฉพาะที่เกิดจากท่อด้านล่างเป็นหลักและเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ มีผลทำให้จุดขาดทั้งด้านบนและล่างขยายตัวมากขึ้นแรงดันจึงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อเราป้อนกระแสถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง (ตำแหน่ง V2) จะทำให้ท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งในส่วนที่มีสารแม่เหล็กขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้างเมื่อเทียบกับจุดคอด ทำให้ความต้านทานที่ท่อด้านล่างมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามายังขึ้นสารจึงเปลี่ยนทิศทางมาไหลที่ท่อตัวนำด้านล่างซึ่งมีความต้านทานต่ำกว่า ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารลดลงอย่างรวดเร็วถึงค่าหนึ่งจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ” แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันของความต้านทานเชิงลบที่ได้มีขนาดเล็กเนื่องจากความแตกต่างของแรงดันระหว่างท่อบนและล่างมีไม่มาก เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอีก แรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากจุดขาดขยายตัวนั่นเอง

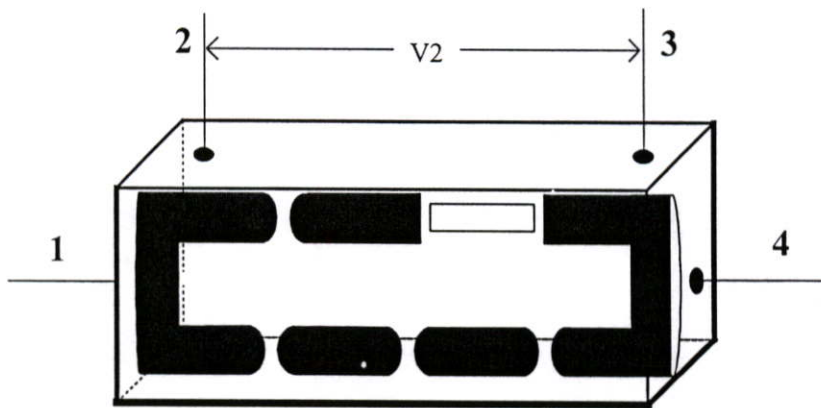
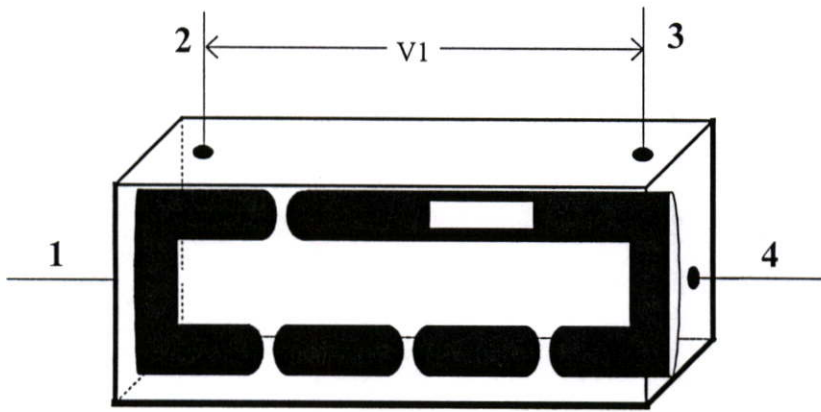
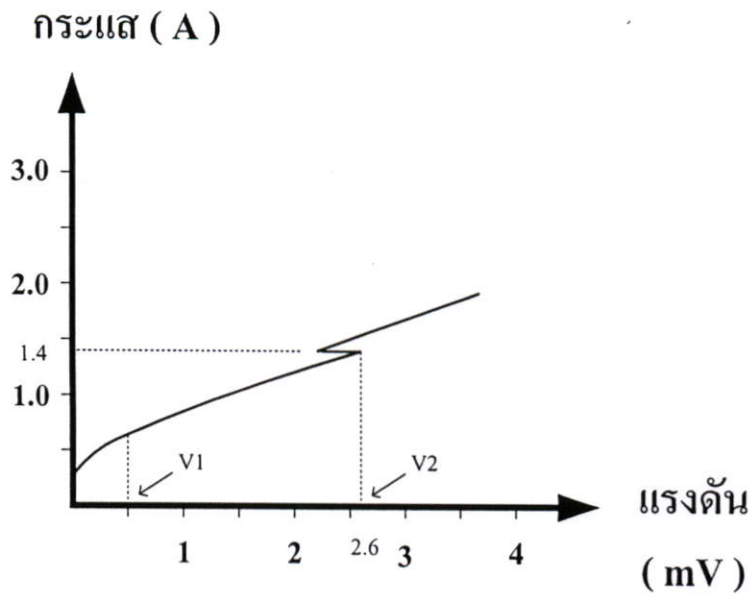
พิจารณารูปที่ 4.5 ข) ซึ่งเป็นเม็ดยุคที่ผ่านแรงอัด 1.2 ดัน กระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.59 A ซึ่งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดยุคที่ผ่านแรงอัด 0.4 ดัน เนื่องจากว่าถ้าแรงอัดที่ใช้มีค่ามากจะทำให้เนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งมีความแข็งแรงมากขึ้น ถ้าพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่า ลักษณะของกราฟในรูปที่ 4.5 ก) คล้ายกับรูปที่ 4.5 ข) แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบในรูปที่ 4.5 ข) จะมีขนาดใหญ่กว่ามาก เนื่องจากในขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้ามากกว่ากระแสวิกฤต คือ 0.59 A ส่วนที่เป็นจุดคอดจะขาดหมด กระแสไฟฟ้าขณะนี้จะไหลผ่านท่อตัวนำด้านล่างเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับรูป 4.5 ก) เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้ามากขึ้นจุดขาดบริเวณจุดคอดจะขยายตัวมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดยุค 0.4 ดันในรูปที่ 4.5 ก) แล้วจะขยายตัวน้อยกว่า เนื่องมาจากความแข็งแรงของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งมีมาก แสดงว่าความต้านทานบริเวณจุดคอดมีน้อยและเมื่อป้อนกระแสถึงค่าที่เหมาะสม บริเวณท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งในส่วนที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้าง กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาจึงเปลี่ยนทิศทางมาไหลที่ท่อตัวนำด้านล่างเนื่องจากความต้านทานในท่อตัวนำด้านล่างน้อยกว่าท่อด้านบนมาก ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขึ้นสารลดลงอย่างรวดเร็วแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่ามาก ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นเอง

4.3.2 อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปแบบที่ 3.19ข) สามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังรูปที่ 4.6 ก)-ข) ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงอัด 0.4 กับ 1.2 ตัน



รูปที่ 4.6 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าที่ยังขวด 0.4 และ 1.2 ตัน (950 องศาเซลเซียส)



ข) แรงยึด 1.2 ตัน

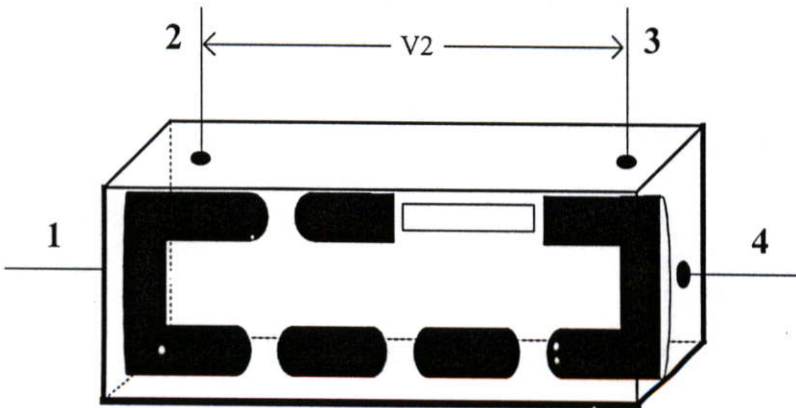
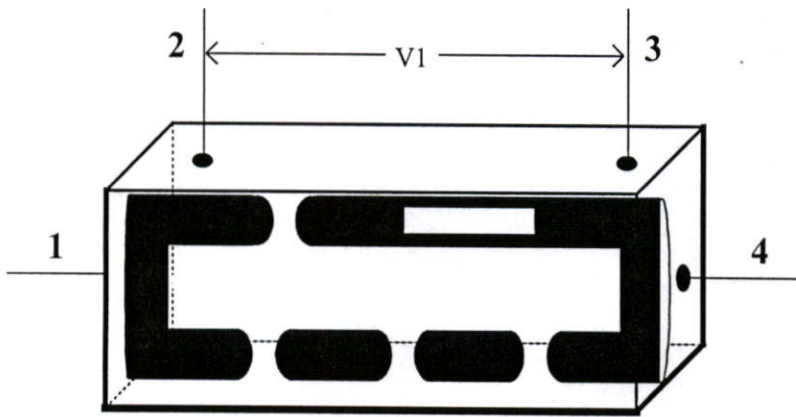
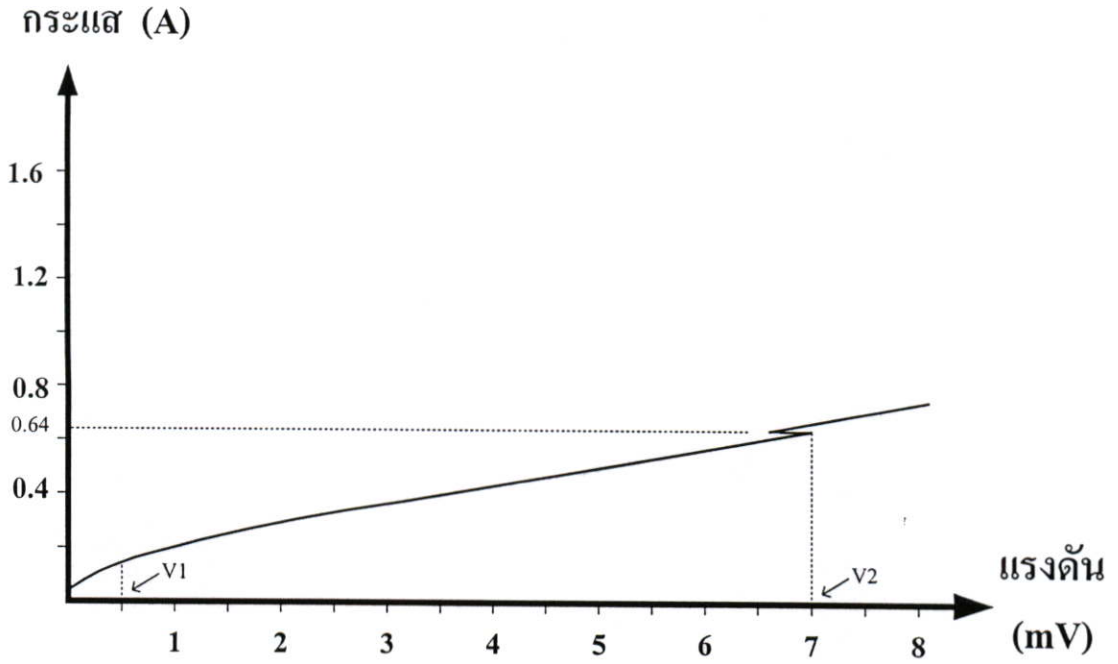
รูปที่ 4.6 (ต่อ)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.6ก) ซึ่งเป็นชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ดัน ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส ปริมาณกระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.15 A ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเม็ดสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ดันที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส การที่เม็ดสารมีปริมาณกระแสวิกฤตที่ต่ำแสดงว่า ความแข็งแรงของชิ้นสารมีน้อย การเสียดภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นไปได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ดังจะเห็นได้ว่า เมื่อป้อนกระแสเกินกว่า 0.15 A จุดคอดจะขาดออก ทำให้ชิ้นสารเสียดภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น ซึ่งในขณะนี้กระแสโดยส่วนใหญ่ จะไหลผ่านท่อตัวนำด้านบน เนื่องจากมีปริมาณจุดขาดที่น้อยกว่าท่อตัวนำด้านล่าง เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจุดขาดจะขยายตัวมากขึ้นและจะขยายตัวเร็วกว่าเมื่อเทียบกับเม็ดสารที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความแข็งแรงของชิ้นสารน้อยกว่าและเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง(ที่ตำแหน่ง V2) จะเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบขึ้น ท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้างเมื่อเทียบกับส่วนขาดบริเวณจุดคอด ขณะนี้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามายังชิ้นสารจึงเปลี่ยนทิศทางมาไหลยังท่อตัวนำด้านล่างซึ่งมีความต้านทานที่ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าในขณะนี้จึงลดต่ำลง และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นส่วนขาดก็จะขยายตัวมากขึ้นทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารเพิ่มสูงขึ้น สิ่งที่น่าสังเกตก็คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบนั้นมีมากกว่าชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากบริเวณที่เป็นสารแม่เหล็กมีขนาดใหญ่กว่านั่นเอง

จากกราฟในรูปที่ 4.6ข) ซึ่งเป็นชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 1.2 ดัน ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าปริมาณกระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.26 A ซึ่งมีความมากกว่าชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ดัน นั้นแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของชิ้นสารมีมากกว่า ดังแสดงให้เห็นจากแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ในขณะที่ชิ้นสารเสียดภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด จุดคอดจะขาดออกและขยายตัวได้น้อยกว่าชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ดัน จึงทำให้ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันจึงมีมากกว่าเนื่องมาจากผลต่างของแรงดันระหว่างท่อตัวนำด้านบนและล่างมีมากนั่นเอง

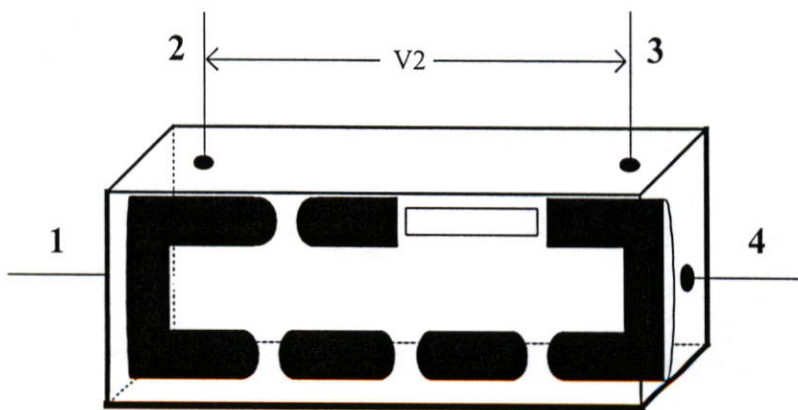
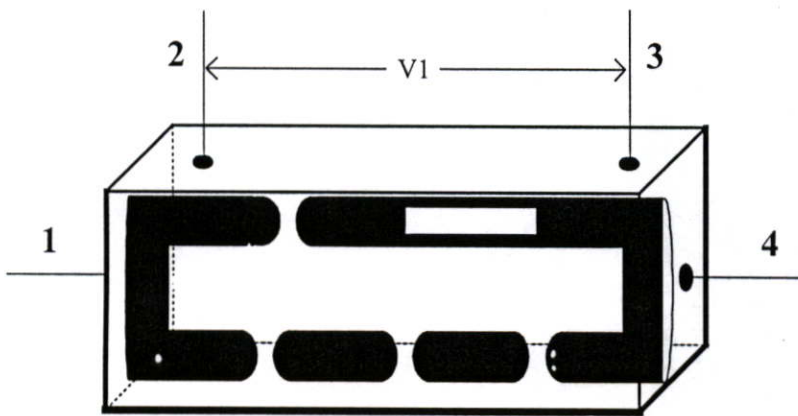
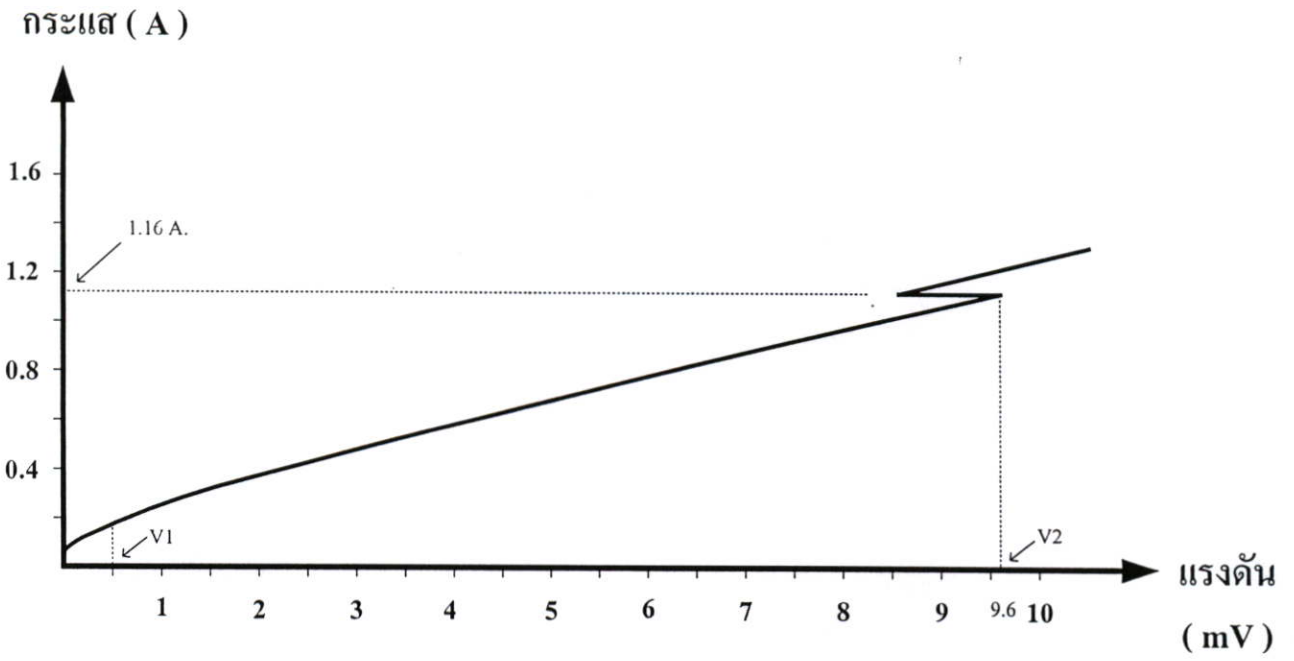
4.3.3 อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.19ค) สามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังรูปที่ 4.7ก)-ข) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ดัน กับ 1.2 ดัน



ก) แรงอัด 0.4 ตัน

รูปที่ 4.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 0.4 และ 1.2 ตัน (970 องศาเซลเซียส)



ข) แรงยึด 1.2 ตัน

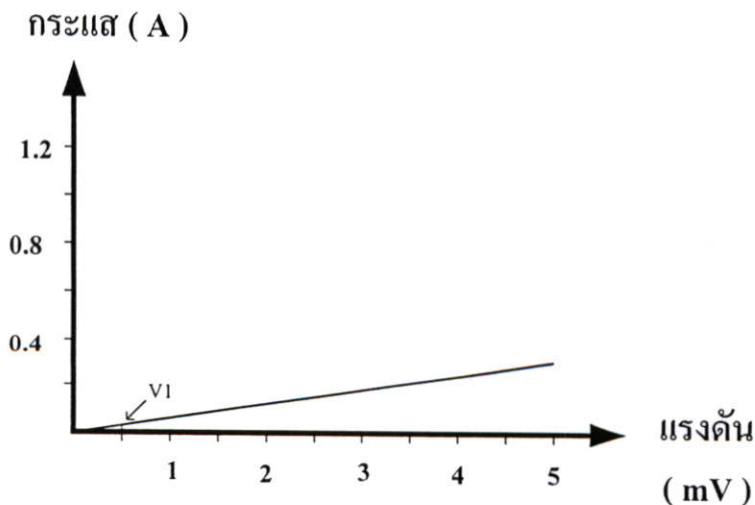
รูปที่ 4.7 (ต่อ)

พิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.7 ก) ซึ่งเป็นเม็ดสารที่ผ่านแรงอัดในการขึ้นรูป 0.4 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณกระแสวิกฤตมีค่าประมาณ 20 mA ซึ่งน้อยกว่าเม็ดสารที่ผ่านอุณหภูมิการเผา 930 และ 950 องศาเซลเซียส พิจารณาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในขณะที่เม็ดสารเสียดสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังจุดขาดจะมีการขยายตัวมากกว่าเม็ดสารที่อุณหภูมิการเผา 930 และ 950 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบพบว่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อเทียบกับเม็ดสารที่แรงอัดเดียวกัน อุณหภูมิการเผาอื่น เนื่องจากว่าส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กนั้นมีขนาดใหญ่ จึงทำให้ผลต่างของแรงดันที่ต่อตัวนำด้านล่างกับด้านบนต่างกันมาก

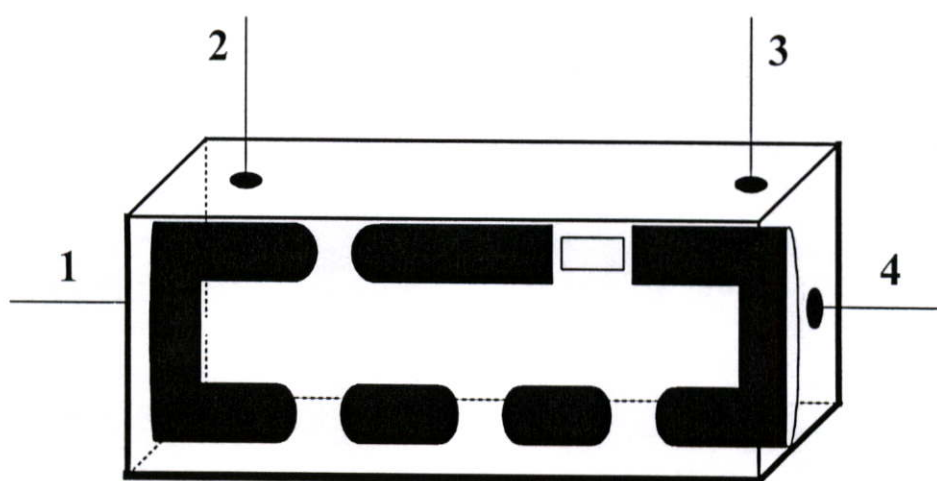
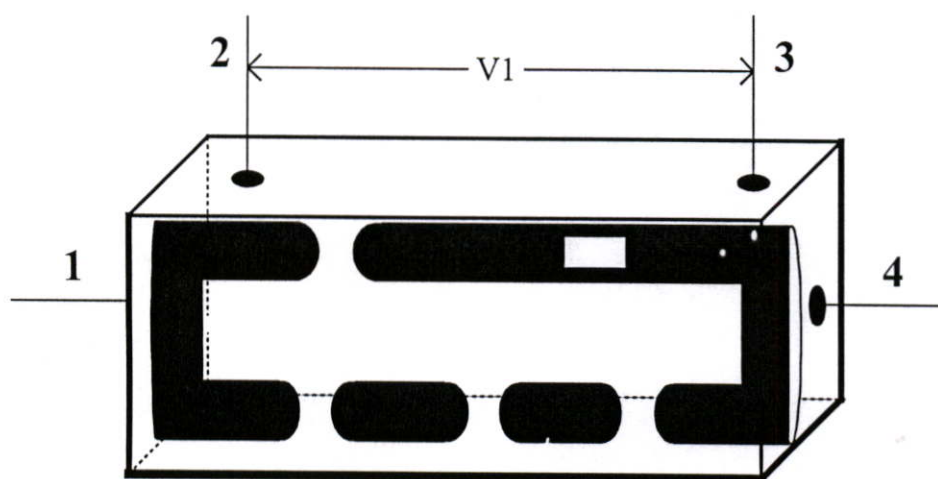
พิจารณากราฟในรูปที่ 4.7 ข) ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ผ่านมา กล่าวคือปริมาณกระแสวิกฤตมีค่าประมาณ 55 mA ซึ่งมีค่ามากกว่าเม็ดสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน นั้นแสดงให้เห็นว่าเม็ดสารมีความแข็งแรง การเสียดสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังจุดขาดเป็นไปได้อย่างมาก เมื่อพิจารณาจากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่า ขณะที่เม็ดสารเกิดการเสียดสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังจุดขาดจะขาดออกและจะขยายตัวมากขึ้นเมื่อป้อนกระแสสูงขึ้น แต่การขยายตัวของจุดขาดจะน้อยกว่าเม็ดสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน เนื่องจากความแข็งแรงของเนื้อสารมีมากกว่า และเมื่อพิจารณาปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบพบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าเม็ดสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน เนื่องจากความแข็งแรงของเนื้อสารมีมากจึงทำให้ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบผลต่างของแรงดันที่ต่อตัวนำด้านบนและล่างจึงมีมาก

4.3.4 อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.19ง) สามารถนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังรูปที่ 4.8 ก)-ข)

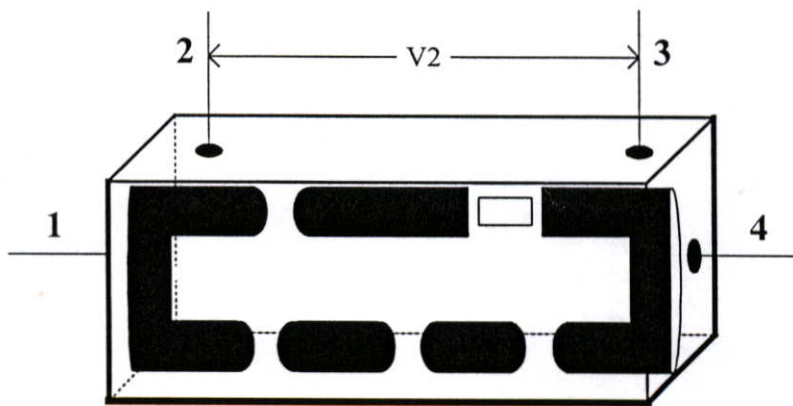
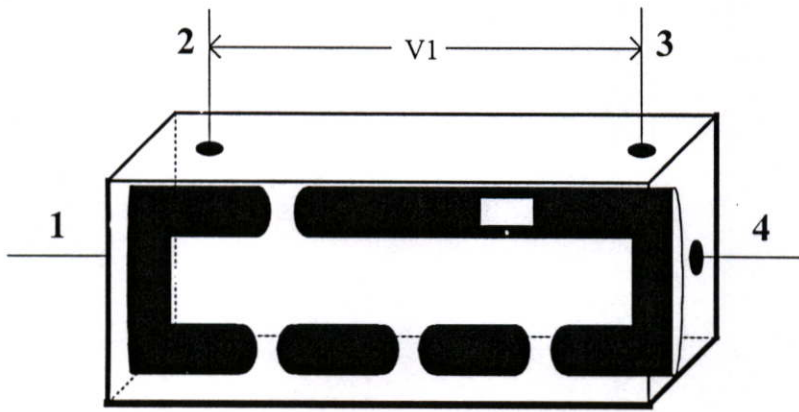
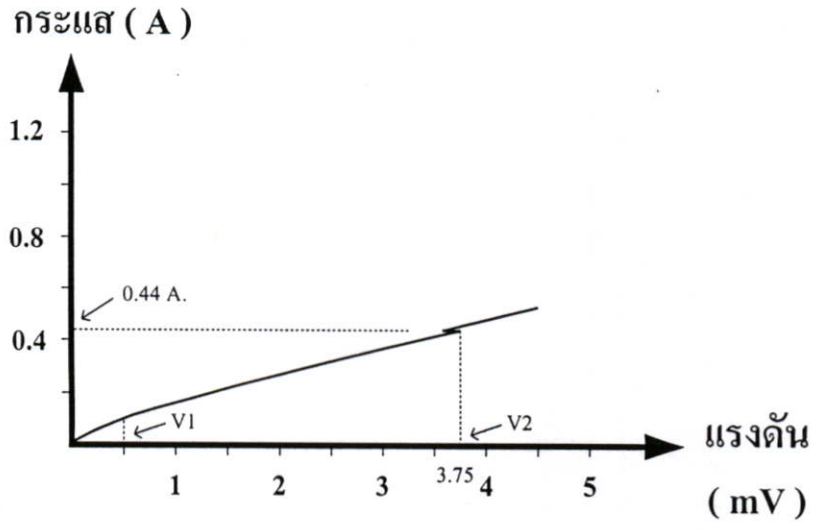


รูปที่ 4.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าที่ยังจุดขาด 0.4 และ 1.2 ตัน (990 องศาเซลเซียส)



ก) แรงอัด 0.4 ตัน

รูปที่ 4.8 (ต่อ)



ข) แรงยึด 1.2 ตัน

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

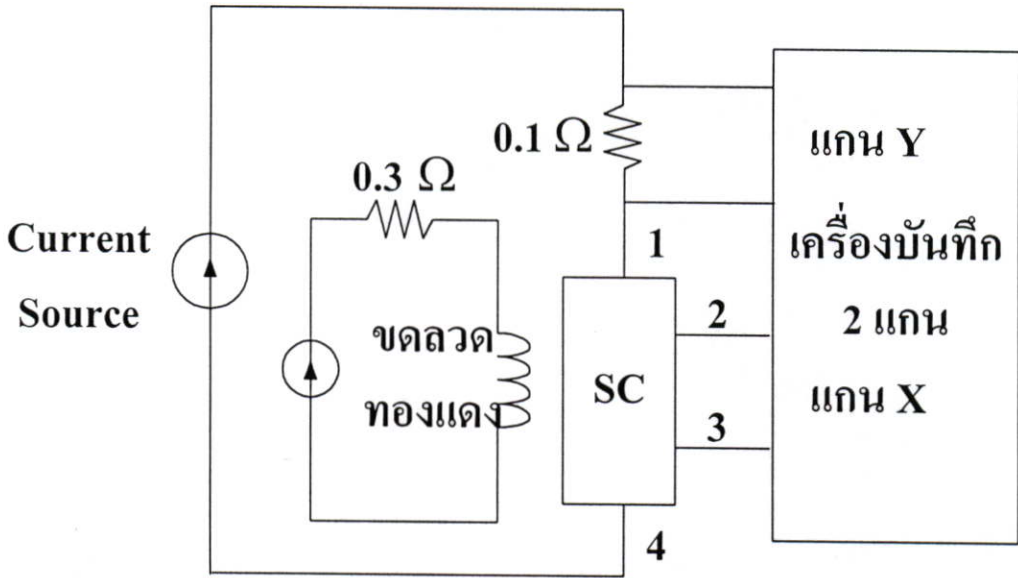
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.8 ก) พบว่าปริมาณกระแสวิกฤตน้อยมากซึ่งต่ำกว่า 1 mA นั้นแสดงให้เห็นว่า เม็ดสารเสียดสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ง่ายมาก เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเกินกว่ากระแสวิกฤตจุดคอขวดจะขาดออกและขยายตัวมากขึ้น พิจารณาที่จุดขาดจะพบว่าการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อป้อนกระแสสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของเนื้อสารมีน้อยมากและเมื่อป้อนกระแสถึงค่าหนึ่ง ท่อตัวนำบริเวณที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออก แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณส่วนขาดระหว่างท่อตัวนำด้านบนและด้านล่างในขณะนี้ มีปริมาณใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างท่อตัวนำด้านบนและล่างจึงไม่แตกต่างกัน ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบจึงไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4.8 ข) จะพบว่ามีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น เนื่องจากว่าในขณะที่ชั้นสารเริ่มมีการเสียดสภาพนั้นจุดขาดจะมีการขยายตัวน้อยกว่าชั้นสารที่ผ่านแรงอัด 0.4 ตัน ดังนั้นในขณะที่ท่อตัวนำบริเวณที่มีสารแม่เหล็กขาดออก ปริมาณการขาดของท่อตัวนำด้านบนกับด้านล่างจึงไม่เท่ากัน ซึ่งท่อด้านบนนั้นจะมีปริมาณการขาดที่มากกว่าท่อด้านล่างเล็กน้อย ทำให้เกิดผลต่างของแรงดันระหว่างท่อตัวนำด้านบนและด้านล่างขึ้น จึงทำให้มีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น

4.4 การทดสอบแบบจำลองโครงสร้างมหภาคโดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่ได้นำเสนอไป ในการทดสอบจะทำโดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แล้วทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากนั้นจะเป็นการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

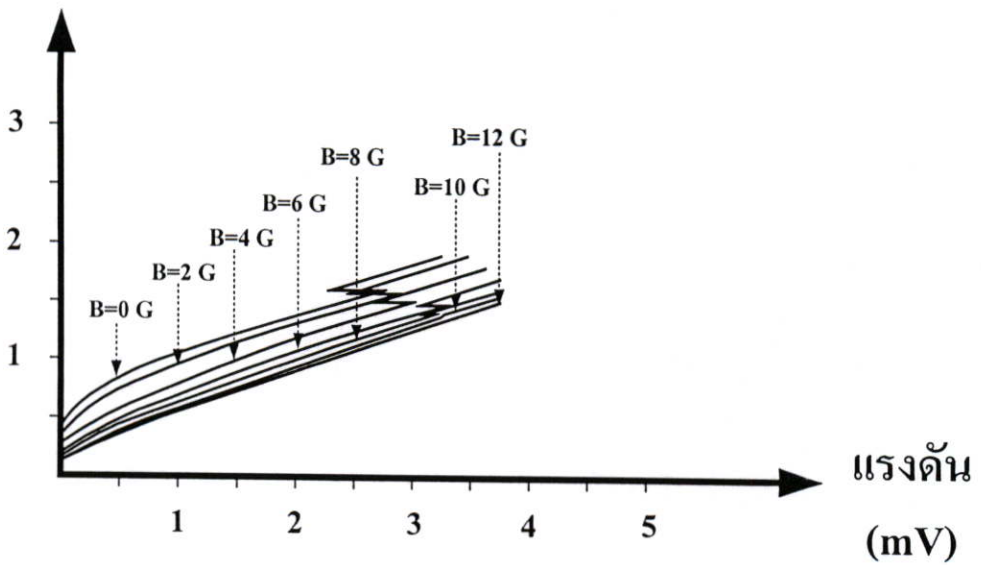
4.4.1 การทดลองและผลการทดลอง

- ในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีขั้นตอนดังนี้
- 1) นำชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านแรงอัด 1.2 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 930 และ 970 องศาเซลเซียสมาต่อเข้ากับวงจรในรูปที่ 4.9 เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ในไนโตรเจนเหลวในขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเลย ($B=0$ Gauss) บันทึกผลการทดลอง
 - 2) ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยเริ่มต้นที่ 2 Gauss ($B=2$ Gauss) แก่ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กขึ้นเรื่อยๆ โดยเปลี่ยนค่าทีละ 2 Gauss ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับชั้นสารนั้นได้มาจากการป้อนกระแสไฟตรงไหลผ่านขดลวด ผลการทดลองทั้งสองข้างต้นแสดงไว้ดังรูปที่ 4.10 ก)-ข)

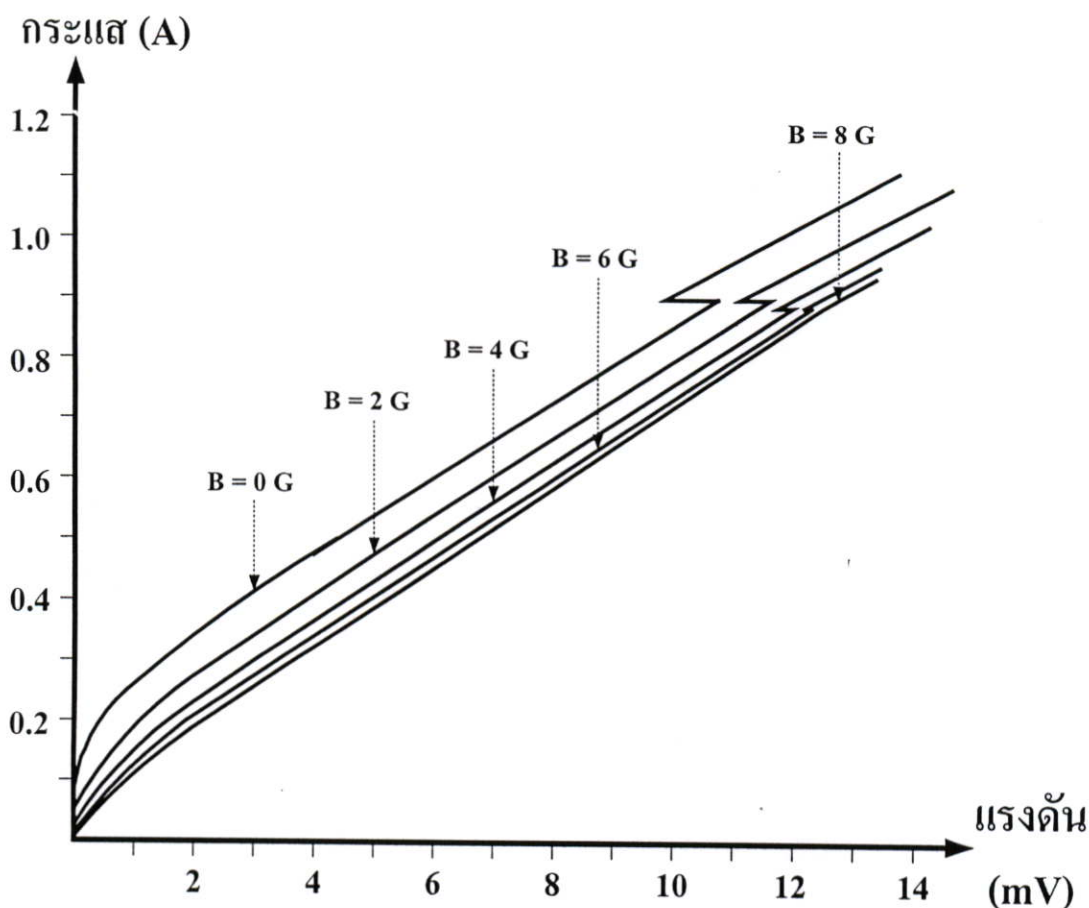


รูปที่ 4.9 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

กระแส (A)



ก) อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส



ข) อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่แรงอัด 1.2 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 930 และ 970 องศาเซลเซียส เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

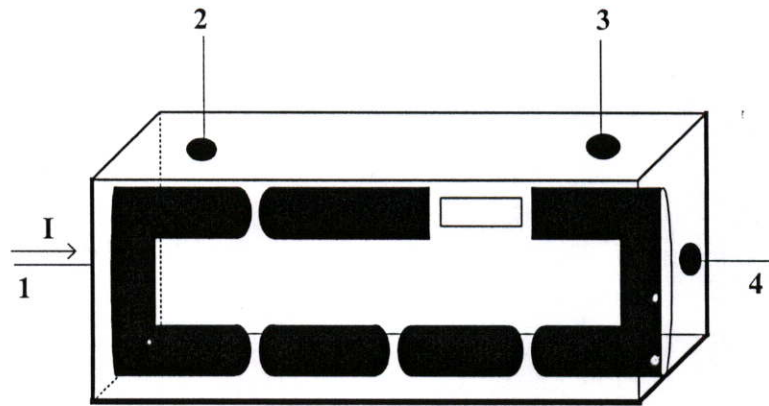
4.4.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มาอธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.4.1 ดังนี้

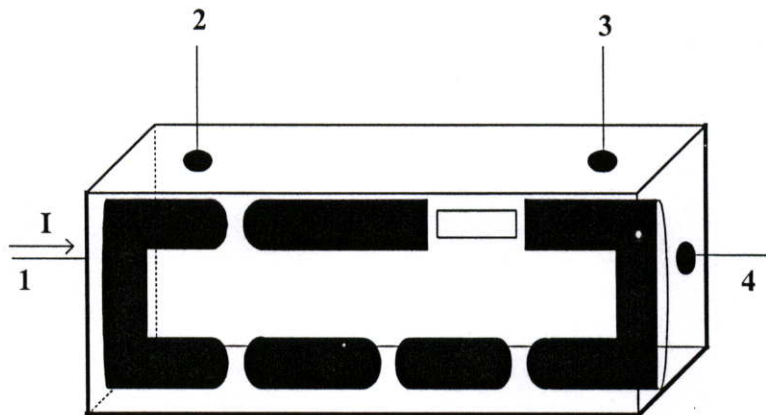
4.4.2.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.10 ก) ซึ่งแสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ พบว่าเมื่อเราให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเพิ่มมากขึ้นปริมาณกระแสวิกฤตจะยิ่งลดลงและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขณะเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบก็ลดน้อยลงเช่นกัน

การที่ปริมาณกระแสวิกฤตลดลง มีสาเหตุมาจากการที่สนามแม่เหล็กเป็นตัวเข้าไปทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้เสียสภาพได้ง่ายขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคได้ ดังรูปที่ 4.11 ก)-ข)

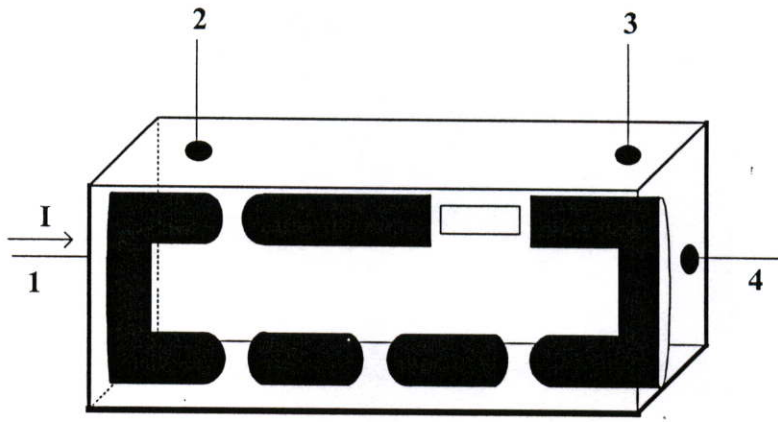


ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 0 \text{ G}$

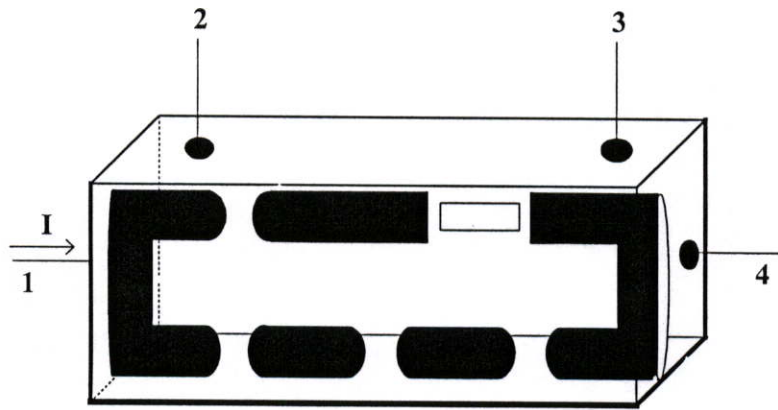


ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 2 \text{ G}$

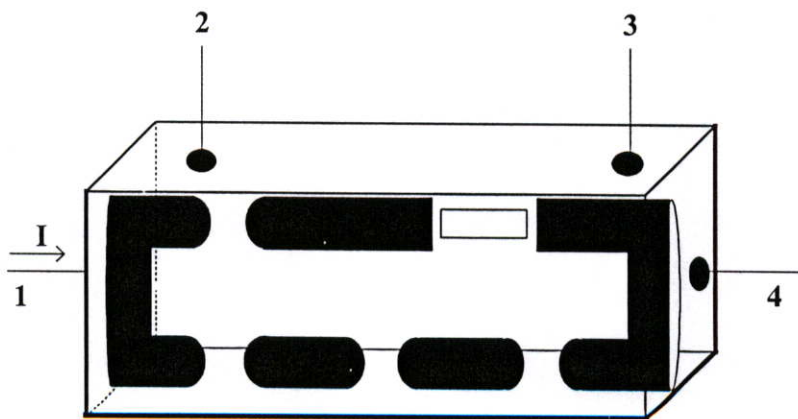
รูปที่ 4.11 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ (930 องศาเซลเซียส)



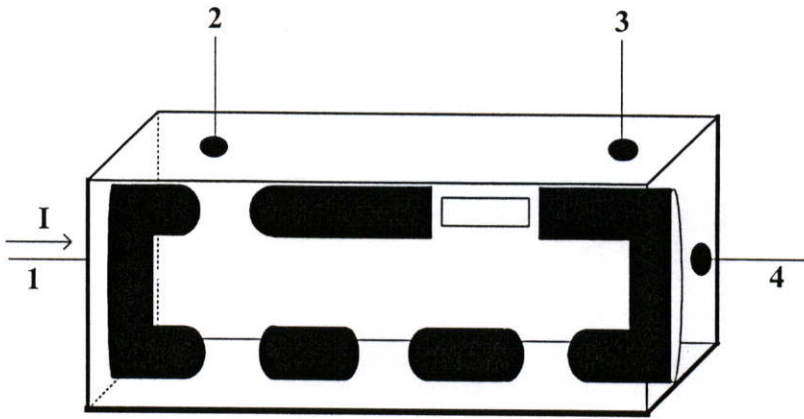
ค) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 4 \text{ G}$



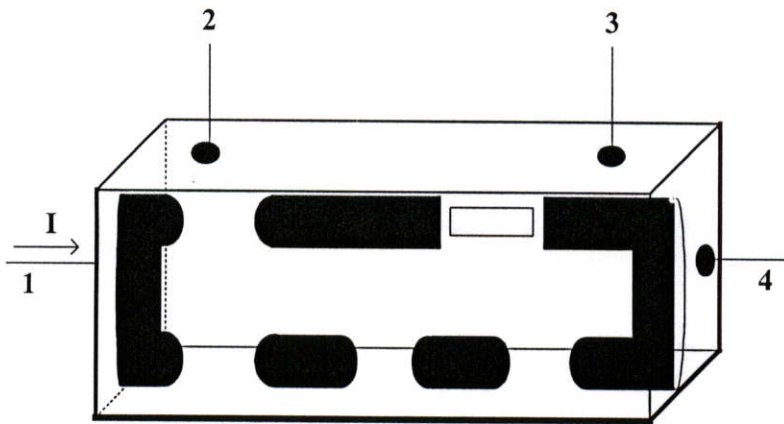
ง) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 6 \text{ G}$



จ) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 8 \text{ G}$



ก) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 10 \text{ G}$



ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 12 \text{ G}$

รูปที่ 4.11 (ต่อ)

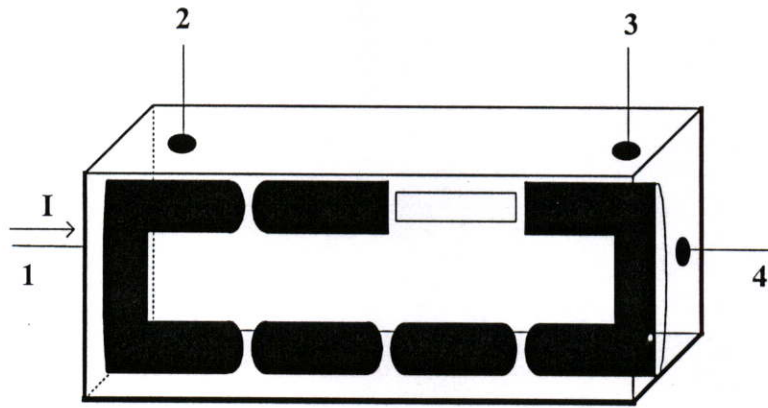
จากกราฟในรูปที่ 4.10 ก) ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔV) มากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 4.11 ก) โดยขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจะเห็นได้ว่าในส่วนจุดคอด้านล่างขาดออกจากกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับส่วนที่ขาดด้านบน ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลลงมายังท่อตัวนำด้านล่าง แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารในขณะนี้จึงมีค่าลดลงจากเดิมมาก ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมาก

เมื่อเราให้สนามแม่เหล็กภายนอก 2 Gauss แก่ชิ้นสาร จากกราฟในรูปที่ 4.10 ก) จะเห็นว่ากระแสวงกลมมีค่าต่ำลงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาทำลายส่วนที่เป็นการนำไฟฟ้าที่ยังยวดย ทำให้จุดคอดขาดและขยายตัวได้ง่ายขึ้นกระแสวงกลมจึงลดต่ำลง มีผลทำให้ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบลดลงด้วย ซึ่งอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคดังรูปที่ 4.11 ข) ซึ่งเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเกินกว่ากระแสวงกลม จุดคอดจะขาดและขยายตัวออกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมมากขึ้น เมื่อป้อนกระแสถึงจุดที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ท่อตัวนำด้านบนในส่วนที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้างกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามายังชิ้นสารจึงไหลลงมายังท่อตัวนำด้านล่างซึ่งมีความต้านทานที่ต่ำกว่าแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารจึงลดลงแต่ไม่มาก เนื่องจากปริมาณการขาดของท่อตัวนำด้านล่างน้อยกว่าท่อตัวนำด้านบนไม่มาก การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบจึงน้อย

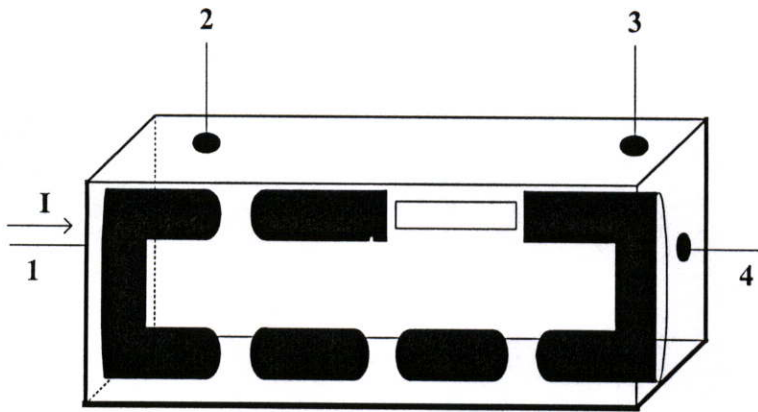
เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 4, 6, 8 และ 10 Gauss ทำให้กระแสวงกลมและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบลดลงตามลำดับ จากรูปที่ 4.11 ค)-ง) จะเห็นว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น ขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ปริมาณส่วนที่ขาดของท่อตัวนำด้านล่างกับส่วนที่ขาดด้านบนมีความแตกต่างกันน้อยลง ผลต่างของแรงดันจึงมีไม่มาก ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจึงน้อยลง จนกระทั่งเมื่อป้อนสนามแม่เหล็ก 12 Gauss ให้กับชิ้นสาร เมื่อป้อนกระแสให้กับชิ้นสารถึงจุดที่ทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบ ส่วนที่ขาดของท่อตัวนำด้านบนและล่างจะมีปริมาณการขาดที่เท่ากัน จึงทำให้ไม่เกิดความแตกต่างของแรงดัน ความต้านทานเชิงลบจึงไม่เกิดขึ้น

4.4.2.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส

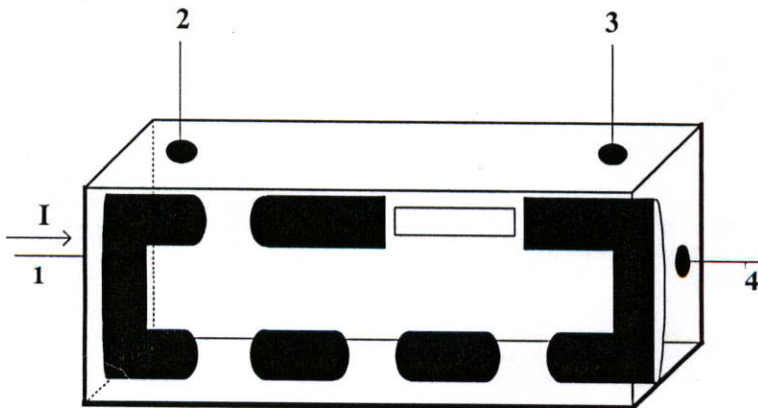
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.10 ข) ซึ่งแสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ แนวโน้มของกราฟจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับผลการทดลองที่ 4.10ก) กล่าวคือ เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเพิ่มมากขึ้น ปริมาณกระแสวงกลมและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบจะลดน้อยลง ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคได้ดังรูปที่ 4.12 ก)-จ) ดังนี้



ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 0 \text{ G}$

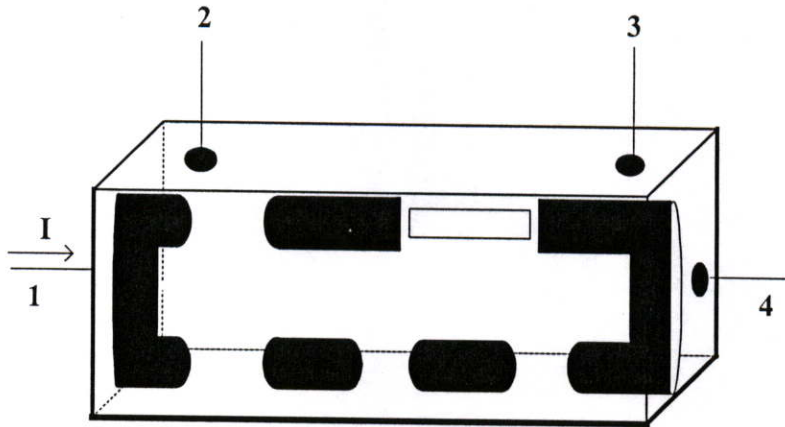


ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 2 \text{ G}$

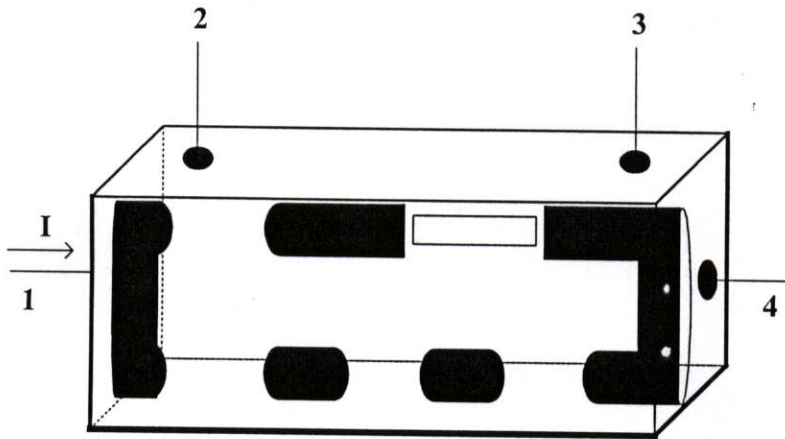


ค) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 4 \text{ G}$

รูปที่ 4.12 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ (970 องศาเซลเซียส)



ง) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 6 \text{ G}$



จ) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 8 \text{ G}$

รูปที่ 4.12 (ต่อ)

จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 4.12 ก)-จ) ซึ่งแสดงถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส แต่จะสังเกตได้ว่า ชั้นสารที่ผ่านอุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียสนั้น จะมีกระแสวิกฤตในขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กต่ำกว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส แสดงว่าชั้นสารที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียสนั้นเสถียรภาพได้ง่ายกว่า และเมื่อนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าที่สนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน ชั้นสารที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียสในขณะที่เสถียรภาพนั้นส่วนขนาดของท่อตัวนำจะมีการขยายตัวมากกว่าและเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่า 8 Gauss

ปริมาณส่วนขาดของท่อตัวนำทั้งด้านล่างและด้านบนจะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จึงไม่เกิดความแตกต่างของแรงดัน ความต้านทานเชิงลบจึงไม่เกิดขึ้น แต่สำหรับชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียสนั้น ต้องใช้สนามแม่เหล็กถึง 12 Gauss

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

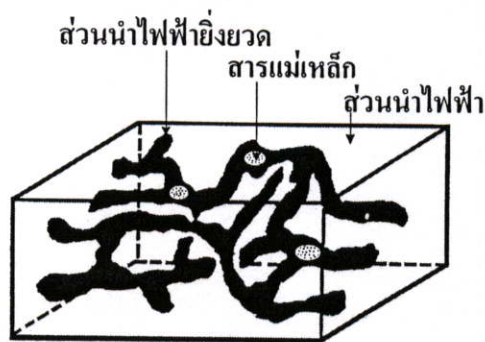
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เบื้องต้นได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และได้กล่าวถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O และการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ในส่วนของงานวิจัยจากกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งสร้างโดยกระบวนการสร้างมาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นนั่นคือปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ซึ่งตามปกติแล้วจะไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบและปริมาณกระแสวิกฤต เมื่อพิจารณาจากกระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O พบว่าพารามิเตอร์ที่น่าสนใจก็คือ แรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงแรงอัดและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา โดยแรงอัดที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ 5 ค่าด้วยกันคือ 0.4, 0.6, 0.8, 1 และ 1.2 ดัน ส่วนอุณหภูมิการเผามีการทดลองทั้งหมด 4 ค่าด้วยกันคือ 930, 950, 970 และ 990 องศาเซลเซียส ส่วนเมล็ดสารที่อุณหภูมิการเผาต่ำกว่า 930 องศาเซลเซียส จะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงไม่พิจารณา

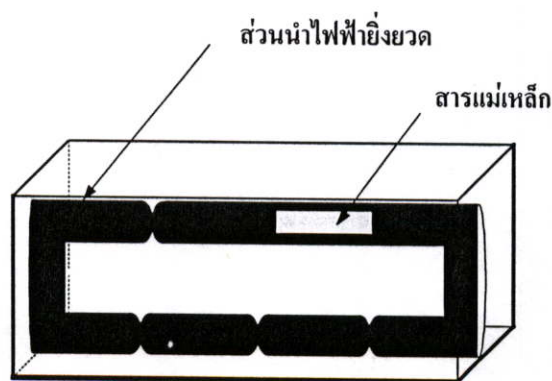
จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิการเผานั้นมีอิทธิพลต่อปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบอย่างมาก โดยที่ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 930 องศาเซลเซียส และจะลดปริมาณลงเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้น ส่วนปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบนั้นจะมีปริมาณมากที่สุดที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 950 และ 930 องศาเซลเซียส ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะลดลงตามลำดับ และที่อุณหภูมิการเผา 990 องศาเซลเซียส ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบจะน้อยที่สุด

ส่วนผลของแรงอัดในการขึ้นรูปก็มีผลต่อปริมาณกระแสวิกฤตและการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบเช่นกัน กล่าวคือ ปริมาณกระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะมีค่ามากเมื่อแรงอัดมีค่าสูงสุดคือ 1.2 ดัน และจะมีค่าลดลงเมื่อแรงอัดที่ใช้มีค่าน้อยลง

ในงานวิจัยครั้งนี้ยังได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ดังแสดงในรูปที่ 5.1 - 5.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แต่ต่างกันตรงที่ ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O นั้น แบบจำลองโครงสร้างจะมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมา ซึ่งเป็นส่วนที่มีอยู่จริงและสามารถพิสูจน์ได้จากการนำเม็ดสารไปทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งพบว่ามีส่วนของเม็ดสารที่มีการดูดเม็ดสารแม่เหล็ก การที่เม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถดูดเม็ดสารแม่เหล็กได้นั้นเกิดจากสารแกดโดลิเนียม(Gd)ซึ่งเป็นสารในตระกูลเฟอร์โรแมกเนติก จึงทำให้มีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้น และส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กนี้เองที่มีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบขึ้น



รูปที่ 5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O



รูปที่ 5.2 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นได้อย่างสอดคล้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Daniel Hunt V. 1989. **Superconductivity Sourcebook**. New York : John Wiley & Sons.
- [2] ดำรงค์ศักดิ์ มณีพงษ์สวัสดิ์. 2533. ฟิสิกส์ของแข็ง 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [3] Jha A.R. 1998. **Superconductor Tecnology**. New York: John Wiley & Sons.
- [4] ดุลยวัจน์ จอมแสง. “การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [5] ชบา ชมภูพงษ์. “การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซรามิก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [6] พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์. “การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [7] Matsuda M., Kikuchi A , Maeda T., Ishii M., Iwai Y., Takata M. and Yamashith T. 1988. “Observation of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ceramic microstructure.” **Jpn. J. Appl. Phys.** 27.L529-530.
- [8] Matsuda M., Kikuchi A , Ishii M., Takata M., Yamashith 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.
- [9] Kasap S.O. 2000. **Principles of Electrical Engineering Materials and Devices**. : McGraw-Hill Companies.
- [10] วิสิฎฐ์ วงศ์สุทธิธรรม นพดล สิทธิพล ชบา สุรียอมรานนท์ และวิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24. 2544. หน้า 992-997.

ภาคผนวก

ตาราง ก คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ และ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

| ธาตุ | น้ำหนักอะตอม | จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{ซ}$) | จุดเดือด ($^{\circ}\text{ซ}$) |
|------|--------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Y | 88.905 | 1,509 | 2,927 |
| Gd | 157.26 | $1,312 \pm 15$ | 3,270 |
| Ba | 137.34 | 725 ± 5 | 1,637 |
| Cu | 63.546 | 1,083 | 2,538 |
| O | 15.99 | -218.8 | -183 |
| C | 12.011 | 3,827 | 3,727 |

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

วิสิฎฐ์ วงศ์สุทธิธรรม

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2517

สถานที่เกิด

จังหวัดจันทบุรี

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สถานที่สำเร็จการศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2541