

การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แม่กนิโตรรีซิสตีฟชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

THE APPLICATIONS OF SUPERCONDUCTING MAGNETORESISTIVE DEVICE



นายสมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร

MR. SOMSAK YONGYINGSAKTHAWORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974-621-945-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 28872  
วัน, เดือน, ปี: 10 พ.ย. 2540

**THE APPLICATIONS OF SUPERCONDUCTING MAGNETORESISTIVE DEVICE**



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

**1997**

**ISBN 974-621-945-6**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แม่กนิโตรซีสตีฟชนิดตัวนำไฟฟ้า  
ยิ่งยวด

นักศึกษา

นายสมศักดิ์ ขงยิ่งศักดิ์ถาวร

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ.ดร. วิสูตร ฐิติรุ่งเรือง

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2540

### บทคัดย่อ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แม่กนิโตรซีสตีฟชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งได้รวมถึงการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่จำเป็นต่อการประยุกต์ใช้งานที่จะได้นำเสนอเพิ่มเติมด้วย โดยจะได้นำเสนอพอเป็นสังเขปดังนี้

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิกพบว่า สภาพต้านทานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีความสัมพันธ์กับแม่เหล็กภายนอกในแบบเชิงเส้น ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การตรวจจับสนามแม่เหล็ก หรือ ปรากฏการณ์แม่กนิโตรซีสแดนซ์ ซึ่งทางห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ใช้หลักการดังกล่าว ในการคิดค้นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดใหม่ขึ้น โดยใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก ตระกูลอิทเทรียม ประสบผลสำเร็จเป็นแห่งแรกในประเทศไทย ซึ่งมีความไวต่อสนามแม่เหล็กสูงที่สนามค่าต่ำในช่วง  $10^{-5}$ - $10^{-2}$  เทสลา ได้เป็นอย่างดี รวมถึงความสามารถในการตอบสนองความถี่ต่ำระหว่าง 0-500 เฮิรตซ์ นอกจากนี้ทางห้องปฏิบัติการยังค้นพบคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ เช่น ในกรณีของสัญญาณแม่เหล็กแบบสลับ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะให้สัญญาณเอาท์พุท ที่มีการเรียงสัญญาณแบบเต็มคลื่น (full-wave rectification)<sup>[5]</sup> อีกประการหนึ่ง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในมุมต่างๆ เท่ากัน ซึ่งจะเรียกว่า คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic property)<sup>[2]</sup> นอกเหนือจากที่ได้กล่าวไปแล้ว ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสามารถจำสภาพขั้วของสนามแม่

เหล็กที่ให้กับมันได้ เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากกระทำนั้น มีค่ามากกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ซึ่งจะให้ชื่อว่า ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก (magnetic memory effect)<sup>[7]</sup> โดยที่จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ D.C.hysteresis ในหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ยิ่งไปกว่านั้น ในกรณีของสัญญาณแม่เหล็กสลับ ที่กระทำต่ออุปกรณ์แมกนีโตรีซิสติฟชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อยู่ในสภาวะการจำ จะให้เอาท์พุทที่มีการเรียงสัญญาณแบบครึ่งคลื่น (half wave rectification) โดยจะให้เอาท์พุทเฉพาะซีกที่มีขั้วต่าง กับขั้วที่ถูกจำสภาพไว้เท่านั้น จากคุณสมบัติที่น่าสนใจดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 3 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจจับกระแสแบบไม่สัมผัส<sup>[2]</sup> หน่วยความจำแบบนอนโวลตาไทล์ และอุปกรณ์ตรวจหาทิศทางของแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด<sup>[6]</sup>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title**                    The Applications of Superconducting Magneto-resistive Device  
**Student**                         Mr. Somsak Yongyingsakthaworn  
**Thesis Advisor**                Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech  
**Thesis Co-advisor**            Asst.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang  
**Level of Study**                 Master of Engineering in Electrical Engineering  
**Department**                    Electronics Engineering, King Mongkut's Institute of Technology  
    Ladkrabang  
**Year**                                1997

### Abstract

For this thesis, the applications of superconducting magneto-resistive device are proposed, including the supplementary study on magnetic properties of superconductor which is necessary to the application as following briefly.

In the study on magnetic properties of ceramic superconductor, it is found that superconductor resistivity are linearly proportional to external magnetic density, called magnetic sensing property or magneto-resistance effect. At Superconductivity Laboratory, Electronics Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Chaokhunta-harn Ladkrabang, the principle has been applied to invent a novel magnetic sensor by using Yttrium type ceramic high temperature superconductor which is the first achievement in Thailand<sup>[1]</sup>. This sensor obtains very high sensitivity to low magnetic field between  $10^{-5}$ - $10^{-2}$  T as well as its low frequency response of 0-500 Hz. Furthermore, our laboratory also discovered the significant properties; for example in alternating magnetic signal, superconducting magnetic sensor generates output signal of full-wave rectification<sup>[5]</sup>. Moreover, superconductor responds to D.C.Hysteresis magnetic field equally in every direction, called isotropic property<sup>[2]</sup>. In addition, superconductor can be memorized by applied magnetic field which is greater than critical magnetic field, called magnetic memory effect<sup>[7]</sup>. Which leads to D.C.hysteresis phenomenon in superconducting magnetic sensor. Besides, when alternating magnetic signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

applied to superconducting magnetic sensor with magnetic memory state , its output obtains half-wave rectification which appears only with different magnetic pole from the memory pole . By using the fascinating properties above , there are three applications of superconducting magnetic sensor introduced here such as non-contact current meter<sup>[2]</sup>, nonvolatile memory and superconducting magnetic source directional finder<sup>[7]</sup>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ IV ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณาของท่าน รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ ให้แนวคิดตลอดจนการแก้ปัญหาที่เป็น ประโยชน์ต่องานวิจัย และให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณท่าน ผศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ผู้ให้ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางให้ดำเนินไปตามลำดับขั้นตอนของการทำวิจัย และเป็นกำลังใจแก่ ข้าพเจ้าอย่างสม่ำเสมอ ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ให้ข้าพเจ้ามีความรู้ใน ด้านต่าง ๆ ผู้เขียนขอขอบคุณ บัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย สจล. ที่ได้ ประสานงานต่าง ๆ ให้การศึกษาปริญญาโทของผู้เขียนได้สำเร็จลุล่วง อีกทั้งขอขอบพระคุณ ที่ได้ อนุมัติทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาในระดับบัณฑิตวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ให้แก่ ผู้เขียน จนทำให้ผู้เขียนได้มีความสะดวกในการดำเนินการวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ทุกคน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณสัญญา คุณขาว คุณวิสันต์ ตั้งวงษ์เจริญ คุณโยธิน วงศ์ ประเสริฐ คุณพัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์ และคุณถัดดาวลัย สุภาติ ที่ได้สนับสนุนให้กำลังใจ และ ช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุพการีของข้าพเจ้าที่ได้ให้การ เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนด้านการเรียน ให้ความรัก และกำลังใจ แก่ข้าพเจ้า

สมศักดิ์ ขยั้งศักดิ์ถาวร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
ศัพท์เทคนิค.....	XIV
สัญลักษณ์.....	XVII
บทที่	
1 บทนำ.....	1
วัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	1
คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ.....	2
กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	5
การทดสอบคุณสมบัติ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	8
ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	16
แบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	16
การควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	22
คุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	24
ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก.....	29
ปรากฏการณ์ฟลูเวฟเรกติไฟ.....	31
3 ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	35
การวัด D.C Hysteresis ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยทางอ้อม.....	35
คุณสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบไอโซโทโรปิก.....	40
เงื่อนไขของการเกิดปรากฏการณ์จำสภาพแม่เหล็ก.....	44
ปรากฏการณ์ฮอลล์ฟลูเวฟเรกติไฟ.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VI ศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	59
การประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์วัดกระแสแบบไม่สัมผัส.....	59
การประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำแบบนอนโวลตาไทล์.....	64
การประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจหาทิศทางของแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก.....	66
5 สรุปและวิจารณ์.....	72
บทความอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก การวัดสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ .....	77
ภาคผนวก ข รูปร่างชิ้นสารตัวอย่างที่ใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กชนิด ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	79
ภาคผนวก ค ชุดสายนำสัญญาณสำหรับ เชื่อมต่อหัววัดสนามแม่เหล็ก ชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเข้ากับเครื่องมือวัดและแหล่งกำเนิดสัญญาณ .....	80
ภาคผนวก ง ชุดเครื่องมือที่นำมาใช้ในการศึกษาคุณสมบัติ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด .....	81
ภาคผนวก จ ชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์ กับแม่เหล็กปรับเทียบ.....	82
ภาคผนวก ฉ ชุดวัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ต่อเข้า กับชุดทดลองวัดความสัมพัทธ์ กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	84

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงค่าวิกฤตสำหรับวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	5
2 แสดงลักษณะสมบัติของหัววัดที่สัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็ก.....	69



## สารบัญภาพ

หน้า

1	การค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดในปี ค.ศ.1911 Kamerlingh Onnes สังเกตว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าน้อยจนเกือบหายไปที่ 4.2K.....	2
2	ความสัมพันธ์ของสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส.....	4
3	แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ศูนย์จัมป์อิเล็กทรอนิกส์.....	7
4	แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์(Meissner Effect).....	8
5	วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน.....	9
6	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิห้อง.....	10
7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิ 77K.....	10
8	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแส กับแรงดันที่อุณหภูมิ 77K.....	11
9	แสดงวงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง.....	12
10	แสดงชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิวิกฤต ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	13
11	แสดงผลการวัดอุณหภูมิวิกฤต ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	14
12	การเปรียบเทียบสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	17
13	แสดงวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	19
14	แสดงรูปทรงแบบต่างๆและแบบจำลองของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในการทดลอง...	20
15	กราฟแสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ระหว่างขั้ว 1 และขั้ว 2 ของชิ้นสารในรูปที่ 2.3 ( a ) ถึง ( d ) ตามลำดับ.....	21
16	ขนาดของชิ้นสาร ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ใช้ในการทดลอง a) ชิ้นสารมาตรฐาน b) ชิ้นสารตัวอย่างที่ถูกเปรียบเทียบโดยการปรับแต่งรูปร่าง.....	23
17	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ซึ่งเปรียบเทียบชิ้นสารตัวอย่างที่ถูกปรับเทียบ(B ) กับชิ้นสารตัวอย่างมาตรฐาน (A).....	24
18	ชุดทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	25
19	ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ทดลอง.....	26
20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อได้รับผลของความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ กัน.....	27
22	แสดงรูปร่างของชั้นสารตัวอย่างที่มีการจ่ายกระแสไหลผ่านเข้า และออกทางขั้วคู่ นอก แรงดันตกคร่อม $V$ ถูกวัดโดยขั้วคู่ใน.....	29
23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่เกิดการจําสภาพแม่เหล็กไฟฟ้า.....	30
24	วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติในการเรียงรูปสัญญาณ.....	31
25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์ กับเวลาของปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟ.....	32
26	วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติระหว่างกระแส กับแรงดัน สำหรับทดสอบปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟ.....	32
27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันตกคร่อมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อทดสอบ ปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟ ขณะที่แรงดันตกคร่อม $VR_1$ เป็นศูนย์ และ $\pm V_p$ .....	33
28	วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันตกคร่อมชั้นสาร กับสนามแม่เหล็ก.....	36
29	กราฟฮิสเตอร์ซีส์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชั้นสารกับสนามแม่เหล็กที่กระแสคงที่เท่ากับ กระแสวิกฤตโดยป้อนสนามแม่เหล็กจาก ศูนย์ไปยัง $B < B_c$ แล้วกลับมายังค่าสนามที่เป็น ศูนย์จากนั้นเพิ่มสนามไปยัง $B > B_c$ แล้วปรับสนามไปยัง $(-B_c)$ จากนั้นเพิ่มสนามแม่เหล็ก ไปยัง $(+B_c)$ .....	37
30	กราฟฮิสเตอร์ซีส์ระหว่าง แรงดันตกคร่อมชั้นสาร กับสนามแม่เหล็ก ที่กระแสคงที่เท่ากับ กระแสวิกฤต ซึ่งใช้ในการวัดปริมาณกระแสคงสภาพในชั้นสาร.....	38
31	ชุดทดลองวัดการตอบสนองของหัววัดกับทิศทาง.....	41
32	วงจรไบอัสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และรูปร่างชั้นสารที่ใช้ทดลอง.....	41
33	กราฟเชิงขั้วแสดงค่าสนามแม่เหล็ก ที่อ่านได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์กับมุม ของ สนามแม่เหล็กที่มากกระทำ.....	42
34	กราฟเชิงขั้วแสดงแรงดันที่อ่าน ได้จากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็ก ที่มากกระทำ.....	43

สารบัญภาพ ( ต่อ )

หน้า

35 กราฟระหว่างแรงดันจากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กับสนามแม่เหล็ก จากแม่เหล็กถาวรขนาดต่างๆกัน.....43

36 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เส้นประและเส้น (C) ได้โดยปราศจากสนามแม่เหล็กเส้น ได้มาโดยมีสนามแม่เหล็กภายนอกที่ซึ่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B เป็น 0.1T เส้น (B) กลายเป็นอยู่ใกล้เส้น (C) หลังจากการนำเอาสนามแม่เหล็กออกไป เส้น (C) สัมพันธ์กับสถานะจำ รูปภาพที่แทรกอยู่แสดงวิธีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกและความหมายของสัญลักษณ์ V และ I.....45

37 ความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อม V กับเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จ่ายให้ภายนอกที่ 77 K สัญลักษณ์  $V_{MAG}$  กับ  $V_{MEM}$  ถูกกำหนดไว้ในรูปที่แนบมาให้ กราฟของ  $V_{MAG}$  กับ B ได้มาโดยมีสนามแม่เหล็กภายนอก กราฟของ  $V_{MEM}$  กับ B ถูกวัดหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไป ในช่วงกว้างของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  T แรงดันตกคร่อมกลายเป็นศูนย์หลังจากที่นำเอาสนามแม่เหล็กออก นั่นคือ ปรากฏการณ์การจำไม่เกิดขึ้น.....46

38 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวอย่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งใช้เป็นหัววัดเส้นแรงแม่เหล็กเส้นที่บสัมพันธ์กับกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก เส้นประได้มาภายใต้เงื่อนไขที่แสดงโดยรูปที่แทรกไว้ การเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันชี้ให้เห็นถึงการมีเส้นแรงแม่เหล็กถูกแทรกไว้ในชั้นสารที่ถูกทำให้จำ อุณหภูมิรอบๆ 77 K.....47

39 แรงดัน  $V_{MEM}$  ตกคร่อมชั้นสารที่ถูกทำให้จำกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้ B ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้มีทิศตรงข้ามกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกแทรกไว้ในชั้นสารตัวอย่างที่ถูกทำให้จำ ความจำถูกลบโดยเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้ที่ต่ำกว่า  $4 \times 10^{-3}$  T อีกนัยหนึ่ง แรงดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นอีกเนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้เป็นสาเหตุของปรากฏการณ์การจำในช่วงที่มากกว่า  $4 \times 10^{-3}$  T อุณหภูมิแวดล้อมเป็น 77 K.....48

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

- 40 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวอย่างที่ทำให้จำ โดยวางขั้วเหนือไว้ใกล้ๆ ผนัง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งถูกใช้สำหรับการจำคือ 0.1 T เส้นทึบ แสดงกรณีที่ปราศจากสนามแม่เหล็กอ่อนๆเข้ามาใกล้กับตัวอย่างที่การจำแรงดัน ตกคร่อมจะลดลง ในกรณีของขั้วใต้แรงดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นสัญลักษณ์ $+\Delta V$  และ  $-\Delta V$  หมายถึงการเพิ่มและลดลงของแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร โดยลำดับ.....49
- 41 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมขึ้นสารถูกทำให้จำโดยขั้วเหนือ กับระยะห่าง ระหว่างขึ้นสารตัวอย่างกับขั้วแม่เหล็ก ในบริเวณที่ระยะห่างมากกว่า 1 เซนติเมตร ผลของขั้วทั้งสองตรงข้ามกันและกัน สัญลักษณ์  $+\Delta V$  และ  $-\Delta V$  เป็นการเพิ่ม และลดของแรงดันตกคร่อมขึ้นสารตามลำดับ แกนนอนอันบนแสดงความหนาแน่น ของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่สอดคล้องกับระยะทางในแกนอันต่ำ.....50
- 42 การเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อมขึ้นตัวอย่างที่ไม่ได้จำ  $\Delta V$  กับระยะห่าง และ ระยะห่างขึ้นสารตัวอย่าง และขั้วแม่เหล็กชนิดของขั้วทั้งสอง ก่อให้การเพิ่มขึ้น ของแรงดันตกคร่อมแกนนอนอันบนแสดงความหนาแน่น ของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งสัมพันธ์กับระยะห่างของแกนอันล่าง.....52
- 43 วงจรทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ฟเวฟเรกติไฟ.....53  
แสดงปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟความถี่ 300 Hz
- 44 ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 230 mA .....54
- 45 แสดงปรากฏการณ์ฟูลเวฟแบบไม่สมมาตร ที่ความถี่ 300 Hz  
ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไบอัส 230 mA.....54
- 46 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์ฟเวฟเรกติไฟของขึ้นสารที่จำขั้วสนามแม่เหล็กเหนือในปริมาณ สูง ที่ความถี่ 300 Hz ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไบอัส 230 mA.....55
- 47 แสดงปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟ แบบไม่สมมาตรของขึ้นสารที่มีการจำขั้วใต้ ที่ความถี่ 300 Hz ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไบอัส 230 mA.....56

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

48	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของระดับไฟตรงของสัญญาณสนามแม่เหล็กอินพุท- ปริมาณน้อยๆที่มีต่อชิ้นสารในสภาวะจำขั้วได้ ที่ความถี่ 400 Hz ขนาดแรงดัน 8 mV และกระแสไบอัส 230 mA.....	57
49	วงจรที่ใช้ทดลองวัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสสลับจากมอเตอร์ โดยใช้หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดขอลล์ ในการวัดสนามจากอุปกรณ์.....	60
50	วงจรที่ใช้ทดลองวัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสสลับจากมอเตอร์ โดยใช้หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	60
51	กราฟระหว่างสนามแม่เหล็กที่วัดจากเกาส์มิเตอร์กับกระแสที่ให้กับมอเตอร์.....	61
52	กราฟแรงดันจากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับสนามแม่เหล็กที่ได้จากเกาส์มิเตอร์.....	62
53	กราฟแรงดันจากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ค่าระหว่าง 4 - 10 เกาส์.....	62
54	วงจรที่ใช้สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำแบบนอนโวลไทล์.....	64
55	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสารกับสนามแม่เหล็ก สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำแบบนอนโวลไทล์.....	65
56	วงจรวัดสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง.....	67
57	ชุดเครื่องมือและโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็ก.....	68
58	ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของแรงดันหัว วัดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มีค่าสนามแม่เหล็ก.....	68

## ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

กระแส

Current

กระแสไบอัส

Biasing current

กระแสคงสภาพ

Persistent current

กระแสวิกฤต

Critical current

กระแสไหลวน

Eddy current

สภาพไร้ความต้านทาน

Zero resistance

ความต่างศักย์

Voltage

ความต้านทาน

Resistance

เคลวิน

Kelvin

แหล่งกำเนิดกระแสคงที่

Current source

แหล่งกำเนิดแรงดัน

Voltage source

เครื่องบันทึกสองแกน

X-Y recorder

เซรามิก

Ceramic

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

Superconductor

แบเรียม

Barium

แบเรียมคาร์บอเนต

Barium carbonate

อิตเทียม

Yttrium

อิตเทียมออกไซด์

Yttrium oxide

คอปเปอร์(ทองแดง)

Copper

คอปเปอร์ออกไซด์

Copper oxide

ไนโตรเจนเหลว

Liquid Nitrogen

ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

Meissner effect

ปรากฏการณ์ซิลสบี

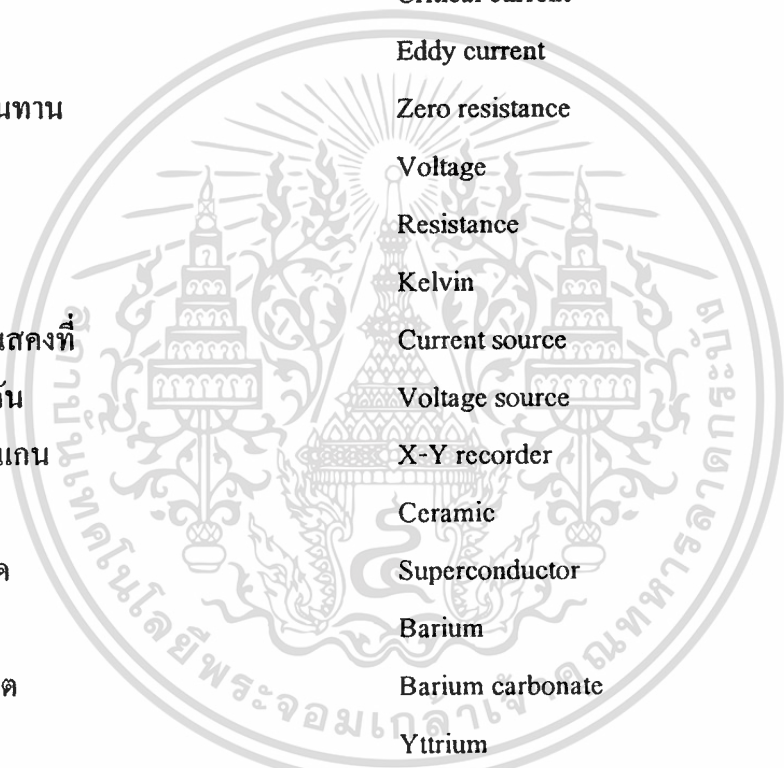
Silsbee effect

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

Superconductivity

สภาพแม่เหล็ก

Magnetization



## ศัพท์เทคนิค ( ต่อ )

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

สารไดอามैกเนติก

Diamagnetic

เส้นแรงแม่เหล็ก

Magnetic flux

ส่วนที่เกิดการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

Superconductor part

ส่วนตัวนำไฟฟ้าธรรมดา

Normal part

แหล่งจ่ายกำลัง

Power supply

ออสซิลโลสโคป

Oscilloscope

อุณหภูมิวิกฤต

Critical temperature

ฮีเลียมเหลว

Liquid helium

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

Current density

ความเหนี่ยวนำ

Inductance

เซลเซียส

Celsius

แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

Macrostructure model

สนามแม่เหล็กคงที่

Constant magnetic field

สนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา

Time dependent magnetic field

ส่วนคอดภายในเนื้อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

Weak link

กระแสตรง

Direct current

กระแสสลับ

Alternative current

สนามแม่เหล็กวิกฤต

Critical magnetic field

สควิด

Superconducting Quantum Interference Device

การนำของอิเล็กตรอน

Conduction electron

โครงข่าย

lattice

สภาพความต้านทานคงค้าง

residual resistivity

สนามแม่เหล็กภายนอก

External magnetic field

ขดลวด โซลินอยด์

Solenoid coil

วงจรแม่เหล็ก

Magnetic circuit

## ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

Electromagnetic induction

เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบเกาส์

Gauss meter

เครื่องกำเนิดสัญญาณ

Function generator

การลดทอน

Attenuate

กระแสป้องกัน

Shielding current

สภาพความซึมซาบสนามแม่เหล็ก

Magnetic permeability

ความลึกซึมซาบ

Penetration depth

หัววัดสนามแม่เหล็กความไวสูง

High sensitivity magnetic sensor



## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\Phi$	ฟลักซ์แม่เหล็ก	Weber (Wb)
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก	$A \cdot m^{-1}$
R	ความต้านทาน	Ohm ( $\Omega$ )
L	ความเหนี่ยวนำ	Henry (H)
I	กระแสไฟฟ้า	Amp (A)
$\rho$	สภาพความต้านทานไฟฟ้า	$\Omega \cdot m$
f	ความถี่	Hertz (Hz)
$\mu$	สภาพความซึมซาบแม่เหล็ก	$H \cdot m^{-1}$
$\mu_0$	สภาพความซึมซาบแม่เหล็กที่สุญญากาศ	$H \cdot m^{-1}$
$\mu_r$	สภาพความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์	ไม่มีหน่วย
$\sigma$	สภาพนำไฟฟ้า	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
$\lambda$	ความลึกของการซึมซาบของสนามแม่เหล็ก	nm
V	แรงดันไฟฟ้า	Volt(V)
T	อุณหภูมิ	Kelvin(K)
$\theta$	มุม	deg.
S	ความไว	$mV \cdot deg^{-1}$
B	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	Tesla(T) , gauss(G)
J	ความหนาแน่นกระแส	$A \cdot cm^{-2}$

# บทที่ 1

## บทนำ

จากการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าประหลาดใจอย่างมาก อีกทั้งยังมีความสำคัญต่อวิทยาศาสตร์ และในเชิงพาณิชย์ที่จะมีศักยภาพสูงขึ้น สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในอดีตที่ผ่านมาได้เป็นสิ่งที่ทำลายต่อปัญหาพื้นฐาน และทางด้านเทคโนโลยีที่จำเป็นต่อการเรียนรู้ให้เข้าใจ และการประยุกต์ใช้งานในตอนแรก ๆ นั้นจะเป็นไปอย่างช้า เพราะว่าก่อนหน้านี้ความเข้าใจในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นเป็นพื้นฐานที่ทำซ้ำที่ก่อให้เกิดความหวังในความก้าวหน้าที่จะประสบผลในอีกไม่นาน

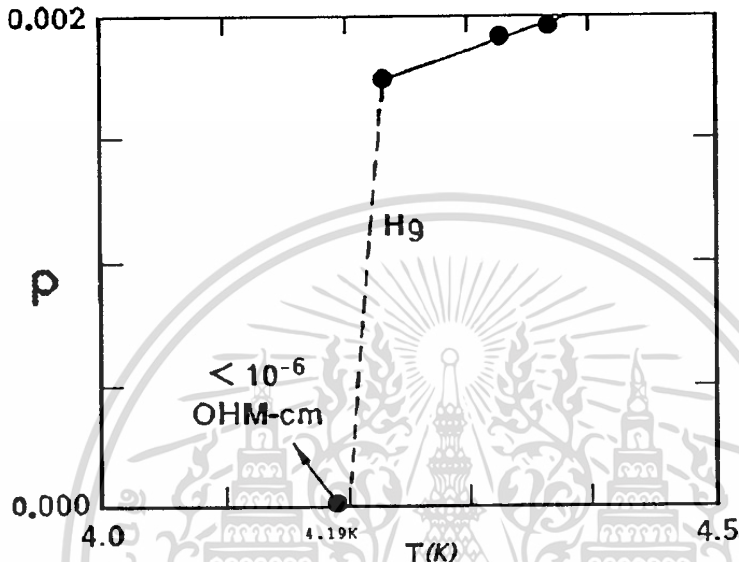
สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิสูง จะส่งผลก่อให้เกิดโอกาสในความเป็นไปได้ที่สำคัญต่อวงการวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีของชาติ ซึ่งแสดงถึงการวิจัยพื้นฐานที่จำเป็นต่อไปในอนาคต ที่จะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาทางการค้าจากการค้นพบวัสดุใหม่ ๆ

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นได้ถูกค้นพบ ในวัสดุโลหะ 26 ชนิด ที่เป็นโลหะ และที่เป็นอัลลอยด์ อีกทั้งสารประกอบที่มีมากกว่าพันชนิด วัสดุเหล่านี้จะมีการนำไฟฟ้ายิ่งยวดครบเท่าที่อุณหภูมิของมันมีค่าต่ำพอเพียงที่ก่อให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด อีกทั้งกระแส และสนามแม่เหล็กที่ไหลผ่าน และล้อมรอบตัวมันไม่สูงเกินกว่าค่าวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว จะก่อให้เกิดการกลายสภาพของวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปสู่การเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดา<sup>[17]</sup>

### วัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด<sup>[17]</sup>

นับตั้งแต่การค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในปี ค.ศ. 1911 โดยนักฟิสิกส์ชาวดัตช์ Kamerlingh Onnes ผู้ซึ่งสังเกตพบปรากฏการณ์นี้ในปรอทที่ 4.2 K ( $\approx -269^\circ\text{C}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้ประสบความสำเร็จในการค้นพบวัสดุซึ่งนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอย่างมาก ในปัจจุบันธาตุที่เป็นโลหะหลายสิบชนิดและสารประกอบหลายพันชนิด ได้เป็นที่รู้จักกันว่าแสดงคุณสมบัตินี้ จวบจนกระทั่งช่วงกลางทศวรรษ 1980 อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสู่สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่บันทึกได้สูงที่สุดคือประมาณ 23 K ( $-250^\circ\text{C}$ ) ในไนโอเบียมเฮอริมาเนท ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ) อย่างไรก็ตามในปีค.ศ. 1987 ได้มีการค้นพบวัสดุประเภทใหม่ซึ่งนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิซึ่งสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว (77K) วัสดุเหล่านี้เรียก กันโดยทั่วไปว่า  $\text{HiTc}$  ซึ่งโดยมากจะเป็นเซรามิกในธรรมชาติ (นั่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือโลหะออกไซด์ชนิดโพลิคริสทอลเชิงซ้อน) มีความสำคัญในทางเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานที่กว้างทั้งในสิ่งใหม่และสิ่งที่มีอยู่ ถึงแม้ว่ากลไกการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสารประกอบ  $\text{HfTe}$  ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างถ่องแท้



รูปที่ 1 การค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดในปี ค.ศ.1911 Kamerlingh Onnes สังเกตว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าน้อยจนเกือบหายไปที่ 4.2K

### คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ <sup>[17]</sup>

การรักษาสถานะสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกกำหนดขึ้นจากค่าของสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส รวมทั้งค่าอุณหภูมิต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต(critical values)ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ โดยแสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 1 ที่บอกถึงค่าวิกฤตของอุณหภูมิ และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตของกลุ่มวัสดุที่ใช้ทำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การนำไปใช้ปฏิบัติในความเป็นจริงนั้น โดยทั่วไปต้องการค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลง และค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นต้องให้สัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตสูง ๆ ด้วยพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่สำคัญได้แก่ค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด( $T_c$ ) ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตด้านบน( $H_{c2}$ ) และค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต( $J_c$ )จะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

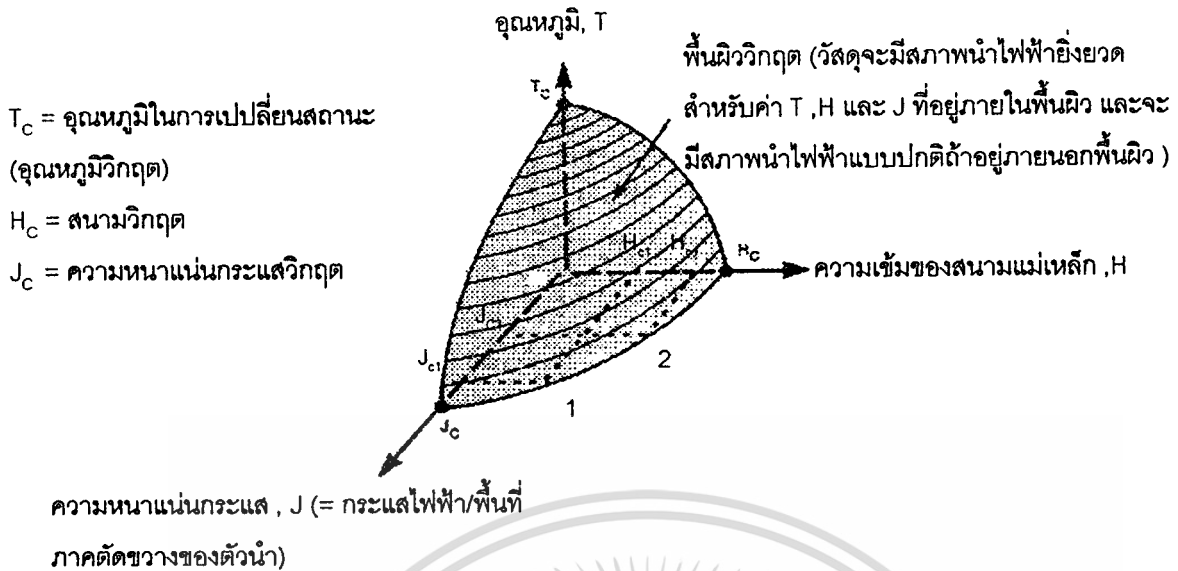
## ค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature, $T_c$ )

หลักโดยทั่ว ๆ ไปสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้นั้นคือวัสดุนั้น ๆ ต้องทำงานที่ สาม ในสี่ ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า ที่อุณหภูมิประมาณ  $3/4T_c$  นั้นค่าสนามวิกฤตจะไปถึงครึ่งหนึ่งโดยประมาณ ของขีดจำกัดอุณหภูมิที่ต่ำ และค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต ซึ่งถึงหนึ่งในสี่โดยประมาณของขีดจำกัด ดังนั้นการทำงานที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว(77K) เราต้องการค่า  $T_c$  ให้เข้าใกล้ 100K แต่จะทำให้วัสดุที่ใช้มีค่า  $T_c \approx 95$  K ก็เพียงพอสำหรับการทำงานที่อุณหภูมิห้อง (293K) เราต้องการวัสดุที่มีอุณหภูมิ  $T_c$  มากกว่า 400K ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่แสดงไว้สูงสุดที่ได้กล่าวมาแล้ว วัสดุที่มีค่า  $T_c$  สูงขึ้นจะทำให้คุณสมบัติโดยรวมดีขึ้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ โดยคุณสมบัติอื่น ๆ ก็สามารถยอมรับได้ และวัสดุที่มี  $T_c$  สูงกว่า 400K นี้จะมีผลต่อการปฏิรูปทางเทคโนโลยีอย่างแท้จริง ในกลุ่มอุณหภูมินี้ เราสามารถนำไปพิจารณาการนำไปประยุกต์ใช้งานทางการตลาดได้อีกมากมาย

## ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field, $H_c$ )

สารตัวอย่าง  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตด้านบนสูงสุดสำหรับโครงสร้างผลึกเดี่ยว (single crystals) หรือ ค่า  $H_{c2}$  จะขึ้นกับทิศทาง นั่นคือขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ แกน a-, b- หรือ c- ของโครงสร้างผลึกแบบ orthorhombic ที่ 4.2K จะมีค่าในช่วงตั้งแต่ 30T (แกน c) ถึง 150T (แกน a หรือ b)

จากกราฟในรูปที่ 2 สามารถใช้อธิบายผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยพิจารณาความหนาแน่นกระแสไบอัสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต  $J_c$  เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเป็น  $H_1$  ค่า  $J_c$  จะมีขนาดลดลงเป็น  $J_1$  และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น  $H_2$  ค่า  $J_{c2}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสลดลง นั่นคือสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายไปมากขึ้น เป็นผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์แม็กนิโตรีซิสแตนซ์



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส<sup>[17]</sup>

### ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density, $J_c$ )

สำหรับการนำไปประยุกต์ ใช้ในทางปฏิบัติ ค่า  $J_c$  มีค่าเกิน  $10^7 \text{ A-cm}^{-2}$  เป็นที่ต้องการทั้งตัวนำชนิด บัลด์ (bulk) สำหรับการประยุกต์ใช้งานในทางพาณิชย์ และในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดฟิล์มบาง สำหรับงานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ตัวนำชนิดบัลด์เซรามิกของ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  สามารถทำให้ได้ถึง  $10^4 \text{ A-cm}^{-2}$  ที่ 4.2K และ 6T อย่างไรก็ตามค่า  $J_c$  จะตกลงถึงระดับในช่วง  $10^2$ - $10^3 \text{ A-cm}^{-2}$  ที่ 77K และ 6T ค่า  $J_c$  เหล่านี้กำหนดขึ้นจากการวัดแบบแมกนีไทเซชัน (magnetization measurement) ค่า  $J_c$  ที่หาได้จากการวัดแบบทรานสปอร์ต (transport measurement) ตามปกติจะมีค่าต่ำกว่า ไม่มีความเข้าใจที่ชัดเจนของค่า  $J_c$  ที่ลดลงเหล่านี้ในปัจจุบัน แต่การได้ค่า  $J_c$  ที่ยอมรับได้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดบัลด์มีความสำคัญอย่างมาก และควรจะเป็นเป้าหมายหลักของการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการสร้าง

โดยอาศัยประสบการณ์ในปัจจุบัน รายละเอียดเป้าหมายที่ยอมรับได้สำหรับตัวนำแม่เหล็กในเชิงการค้า จะเป็น  $J_c$  มีค่าประมาณ  $10^5 \text{ A-cm}^{-2}$  ที่ 77K และ 5T โดยวัดที่สภาพด้านทานนั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่า  $10^{-14} \Omega\text{-mm}$  พร้อมกับมีค่า strain tolerance ที่ 0.5 % และสามารถหาได้ในราคาที่เหมาะสมเท่ากัน หรือต่ำกว่าราคาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำที่ใช้กันโดยทั่วไป

การวัดเบื้องต้นของฟิล์มบางผลึกเดี่ยว ที่ปลูกขึ้นด้วยวิธีการอพิแทกซ์ชี้ว่าค่า  $J_c$  เกินกว่า  $10^6 \text{ A-cm}^{-2}$  ที่ 77K และสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ค่าเหล่านี้ดูเหมือนพอเพียงสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 1  
แสดงค่าวิกฤตสำหรับวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

	Temperature (Kelvin)	Magnetic Field (gauss)	Current density <sup>a</sup> (amp per square centimeter)
Aluminum	1.2	105	
Mercury	4.2	410	
Lead	7.2	800	
Niobium(75%)- titanium(25%)	10	$14 \times 10^{4b}$	$\sim 10^{5c}$
Niobium-tin	18	$23 \times 10^{4b}$	$\sim 10^{7c}$
1-2-3 ceramic ( $YBa_2Cu_3O_{6.9}$ )	93	$100 \times 10^{4b}$	$10^3$ to $> 10^{6d}$

(a) At zero magnetic field (b) At upper critical field (Type II superconductor)

(c.) At 4.2K (d) At 77K The highest value are reached with oriented single-crystal films

### กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด<sup>117</sup>

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่เป็นออกไซด์ของโลหะที่มาผสมกัน ซึ่งแสดงคุณสมบัติทางกล และทางกายภาพของเซรามิก ใช้เป็นหลักในการนำไปสู่พฤติกรรมของวัสดุใหม่ ๆ ที่มี ระบายซึ่งประกอบด้วยอะตอมของทองแดง และออกซิเจนที่มีการยึดเหนี่ยวกันทางเคมีซึ่งกันและกัน ธรรมชาติที่พิเศษของการยึดเหนี่ยวทางเคมีของทองแดงและออกซิเจนจะไปเพิ่มให้วัสดุ สามารถนำไฟฟ้าได้ดีในบางทิศทาง ในทางตรงกันข้ามสารเซรามิกส่วนใหญ่จะเป็นฉนวนทาง ไฟฟ้า ตัวอย่างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิกได้แก่  $La_2CuO_4$ ,  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ,  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$  ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเป็น 40 K 92 K และ 110 K ตามลำดับ

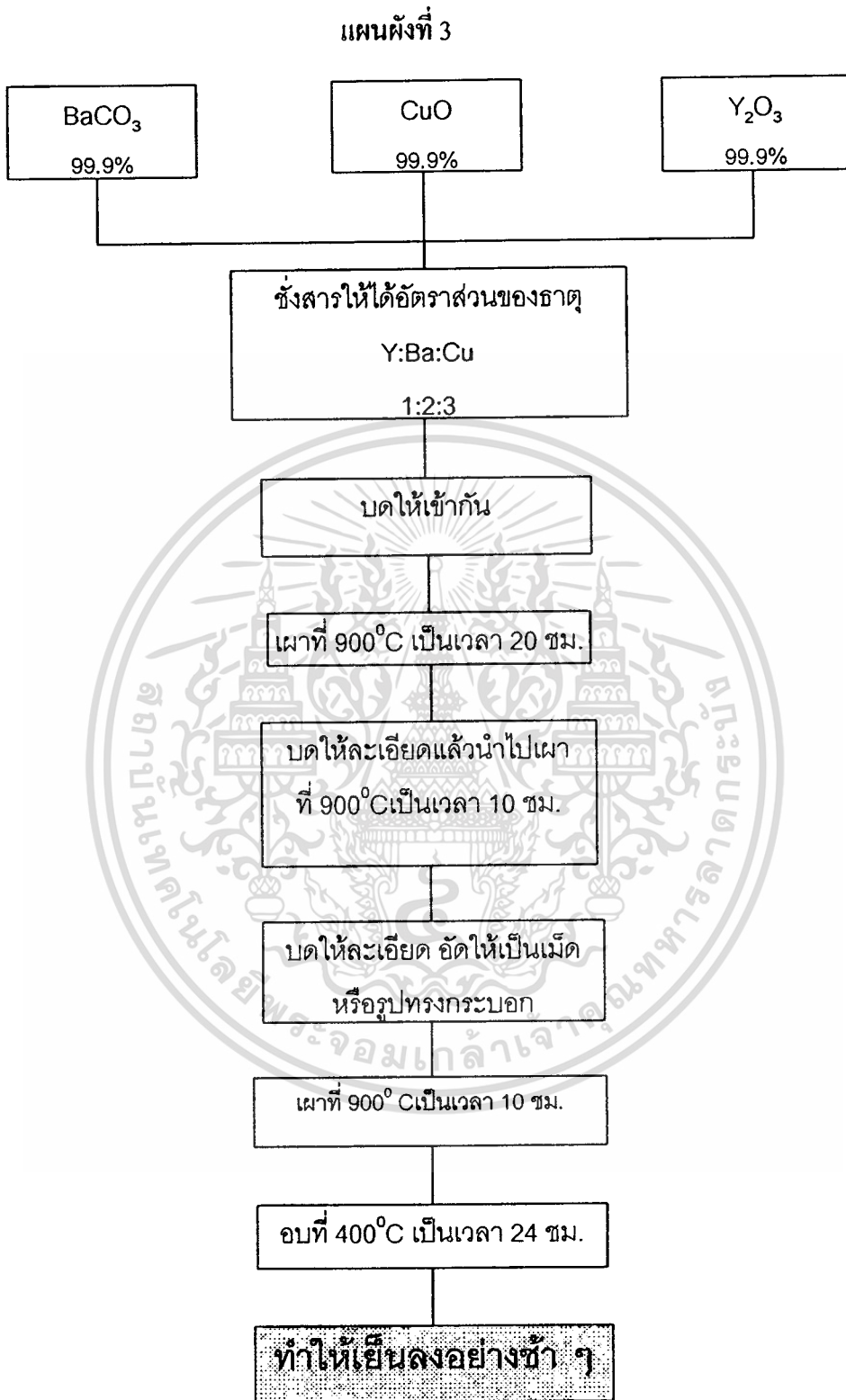
## กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง<sup>[10]</sup>

กระบวนการสร้างที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกนี้ สามารถเตรียมขึ้นได้จากสารประกอบตั้งต้นได้แก่  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$  และ  $CuO$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% มาผสมกันโดยมีอัตราส่วนของธาตุ Y:Ba:Cu เป็น 1:2:3 ซึ่งสามารถสร้างเป็นสารประกอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 92 K และสามารถแสดงคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการสร้างเริ่มต้นจากการนำสารประกอบทั้ง 3 ชนิดมาผสมจนเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อขจัดคาร์บอนในสารประกอบคาร์บอนทำให้เป็นสารประกอบออกไซด์ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าแคลซิเนชัน (calcination) และทำให้เกิดสารประกอบ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  เมื่อเผาสารครบ 20 ชั่วโมงแล้วทิ้งไว้ให้เย็นตัว นำมาเขี่ยเอาส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดออก ซึ่งส่วนนี้จะมีสีเขียว จากนั้นนำเอาส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งมีเกล็ดสีดำมาบดให้ละเอียดอีกครั้งแล้วนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดตามความต้องการด้วยแรงอัดขนาด 1.5 ตัน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อเผาครบ 10 ชั่วโมงแล้วลดอุณหภูมิของเตาที่ 400 องศาเซลเซียส อบอุ่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ผงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเชื่อมติดเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งชิ้น ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า ซินเทอริง (sintering) เพื่อให้ชิ้นสารได้มีปริมาณออกซิเจนในโครงผลึกอย่างพอเพียง และทำให้ชิ้นสารกลายเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสม่ำเสมอซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่าแอนนิลลิ่ง (annealing) จากนั้นลดอุณหภูมิจนมาถึงอุณหภูมิห้อง ก็จะได้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง สามารถแสดงด้วยแผนผัง (Flow Chart) และชุดทดลองประกอบการอธิบาย แสดงดังในรูปที่ 3

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้มานี้ จะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญ ก่อนที่จะนำมาศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ตามต้องการจากการวิจัยของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป



แสดงขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

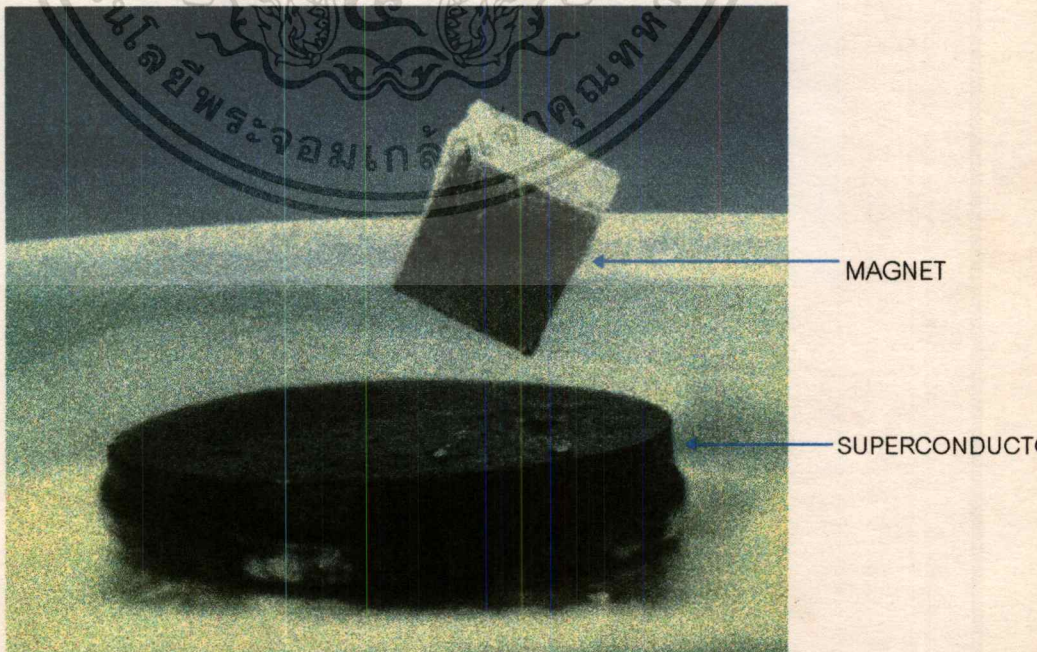
## การทดสอบคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด<sup>[10]</sup>

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ถูกสร้างขึ้นจากห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สามารถแสดงคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันได้แก่ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect) ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance) ปรากฏการณ์ ซิลส์บี (Silsbee effect) และอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าในสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวคนั้นคือ ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ส่วนคุณสมบัติทางด้านสนามแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก็มีผลมากเหมือนกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะผลักเส้นแรงแม่เหล็กออกจากตัวมันทันที นั่นคือมันจะไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านตัวมันได้เลย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)

เมื่อนำแม่เหล็กมาวางเหนือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะพบว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ คือ จะไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านตัวมัน จึงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงถูกเส้นแรงแม่เหล็กผลักดันให้ลอยอยู่เหนือแม่เหล็กได้ รูปที่ 4 เป็นภาพถ่ายแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ (-196°C)



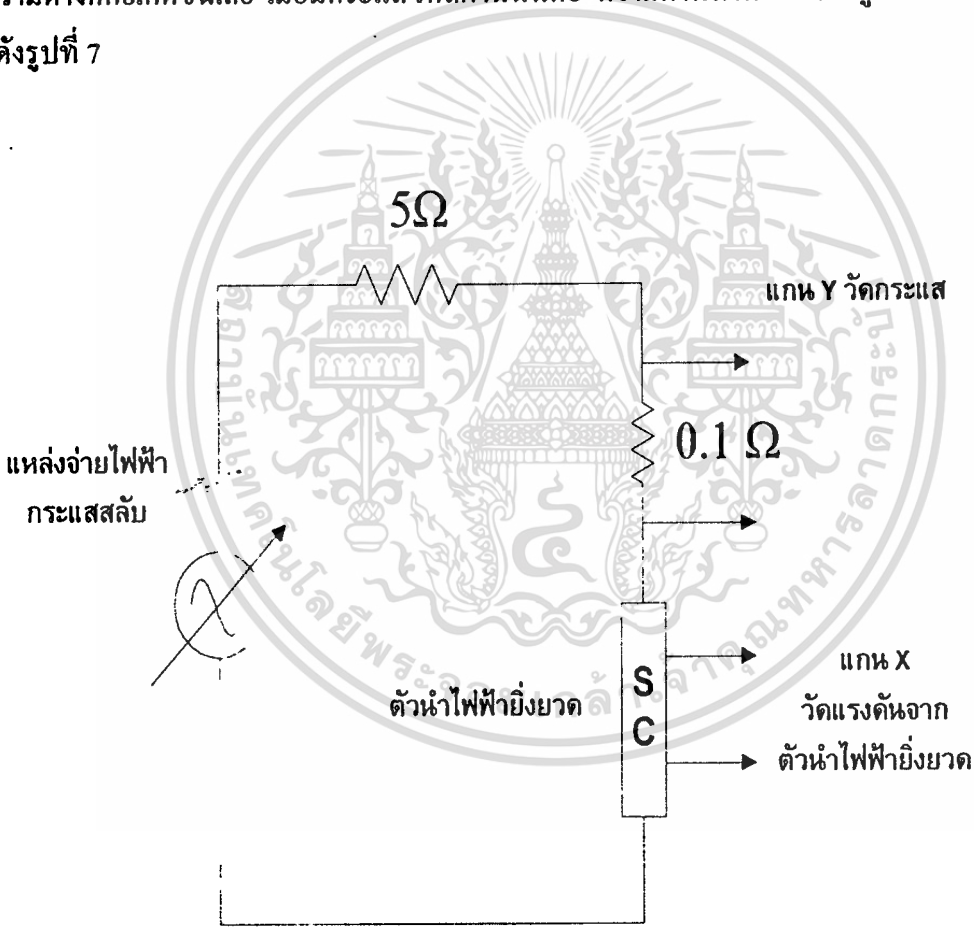
รูปที่ 4 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์(Meissner Effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

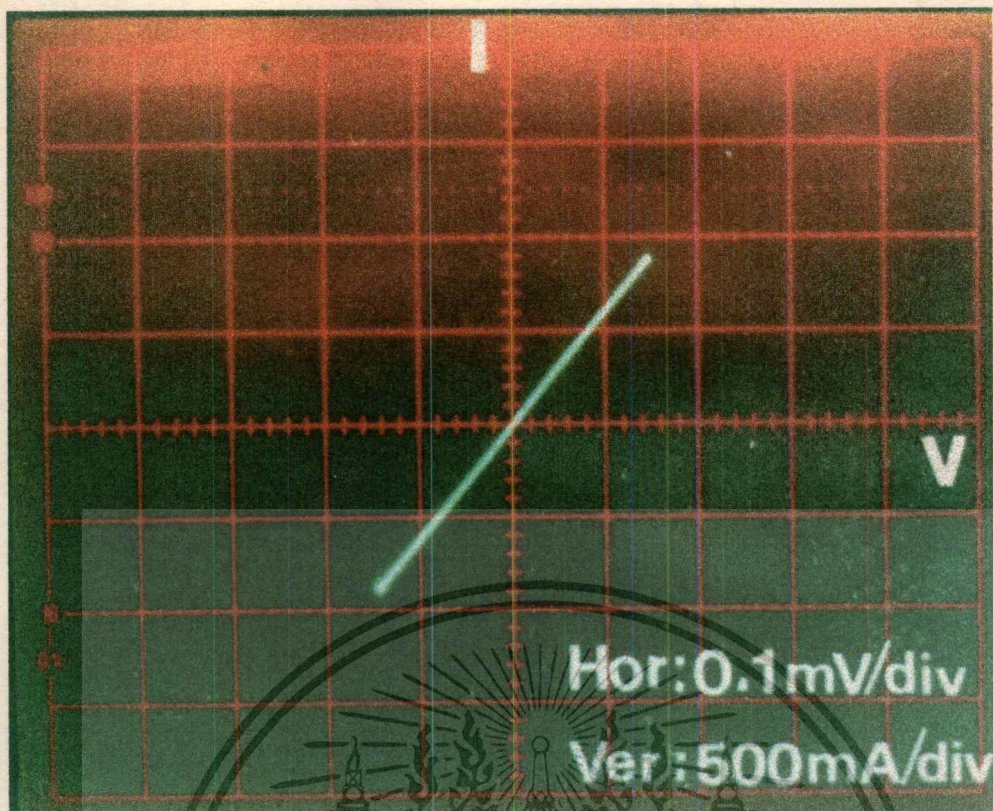
### ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance)

ใช้วงจรตามรูปที่ 5 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าในช่วงที่อุณหภูมิห้อง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน จะมีความชันซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความต้านทานได้ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ณ ที่อุณหภูมิห้อง ชิ้นสารมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ที่มีความต้านทานไม่เกิน  $50 \text{ m}\Omega$

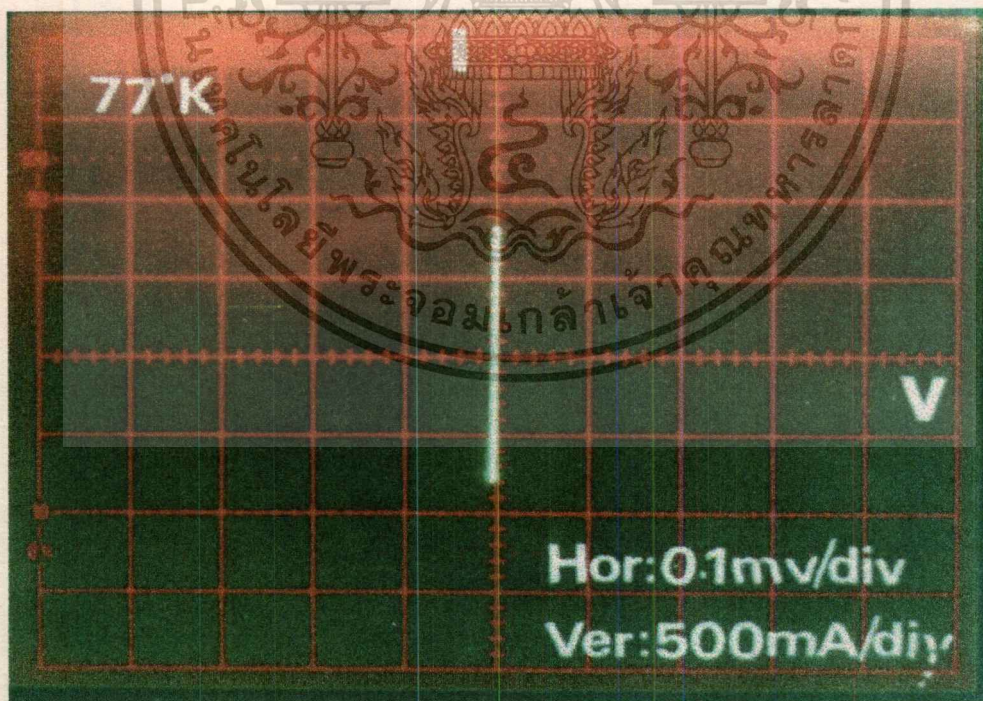
เมื่อจุ่มชิ้นสารลงในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ  $77 \text{ เคลวิน}$  จะสังเกตเห็นว่ากราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน จะตั้งขึ้นในแกน Y ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีความต่างศักย์เกิดขึ้นเลย เมื่อมีกระแสไหลผ่านนั่นคือ ความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 5 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแส กับแรงดันที่อุณหภูมิ 77K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปรากฏการณ์ ซิลสบี (Silsbee effect)

เมื่อป้อนกระแสไบอัสให้กับขั้วนำไฟฟ้ายิ่งยวด ตามวงจรรูปที่ 5 เป็นปริมาณมาก จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากการไหลของกระแสมีค่ามากขึ้น ถ้ากระแสไบอัสที่ให้นั้นมีค่ามากกว่าค่ากระแสวิกฤตแล้ว สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายด้วยกระแสนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect) และจากรูปที่ 8 เมื่อเพิ่มกระแสให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้นเส้นกราฟจะค่อย ๆ เบนออกจากแกน Y แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากการเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มถูกทำลายแล้วนั่นคือจะเกิดสภาพต้านทานไฟฟ้าขึ้น ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ซิลสบี สำหรับกระแสไบอัสสูงสุดที่ป้อนให้กับขั้วนำโดยที่ขั้วนำยังมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จะกำหนดให้เป็นค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) ซึ่งเมื่อนำมาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของการนำกระแสได้ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต ( $J_c$ ) โดยที่ค่า  $J_c$  จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของขั้วนำ ไม่ขึ้นกับรูปร่าง แต่  $I_c$  จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด

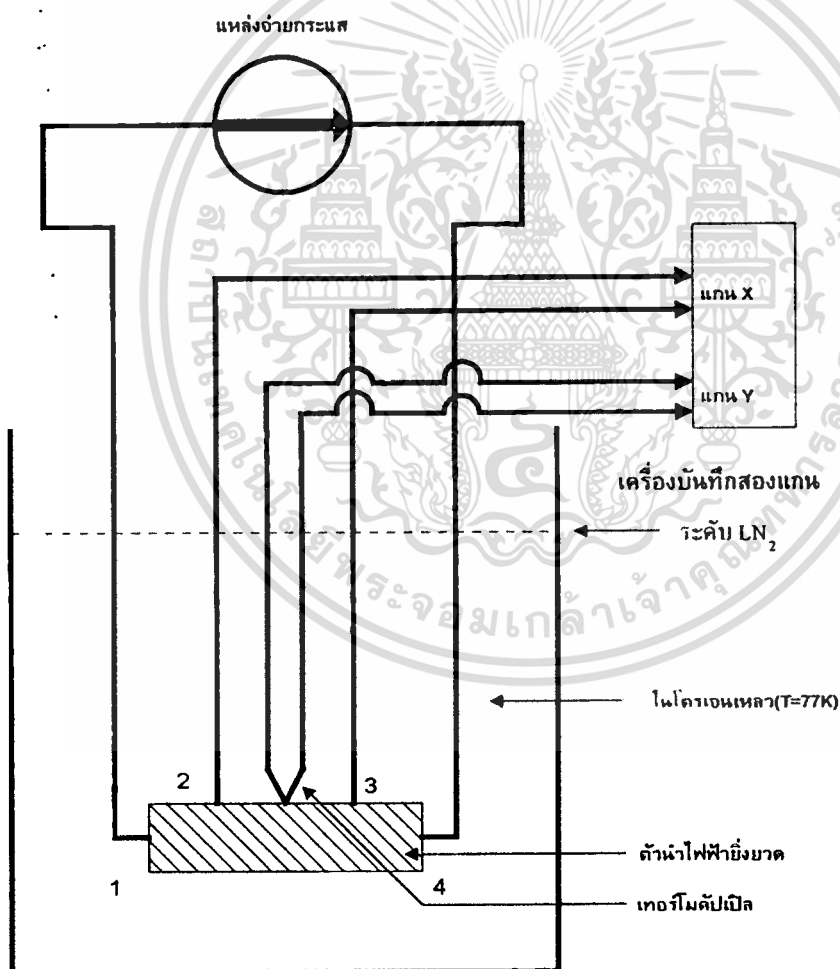


รูปที่ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแส กับแรงดันที่อุณหภูมิ 77K

## อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

อุณหภูมิวิกฤตเป็นคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิด ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการศึกษารายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถใช้วงจรดังรูปที่ 9 โดยใช้เซ็นเซอร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่มีการตัดแตงนำมาบัดกรีเป็นแบบ Four Point Probe โดยในขั้วที่ 1 และ 4 ได้รับความร้อนกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสที่ ส่วนในขั้วที่ 2 และ 3 นั้นถูกต่อเข้ากับเครื่องบันทึกลงแกน ซึ่งจะถูกรับที่แกน Y เพื่อแสดงค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะที่ทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับเซ็นเซอร์ ส่วนเทอร์โมคัปเปิลนั้นจะถูกรับมาวางให้สัมผัสกับผิวของเซ็นเซอร์



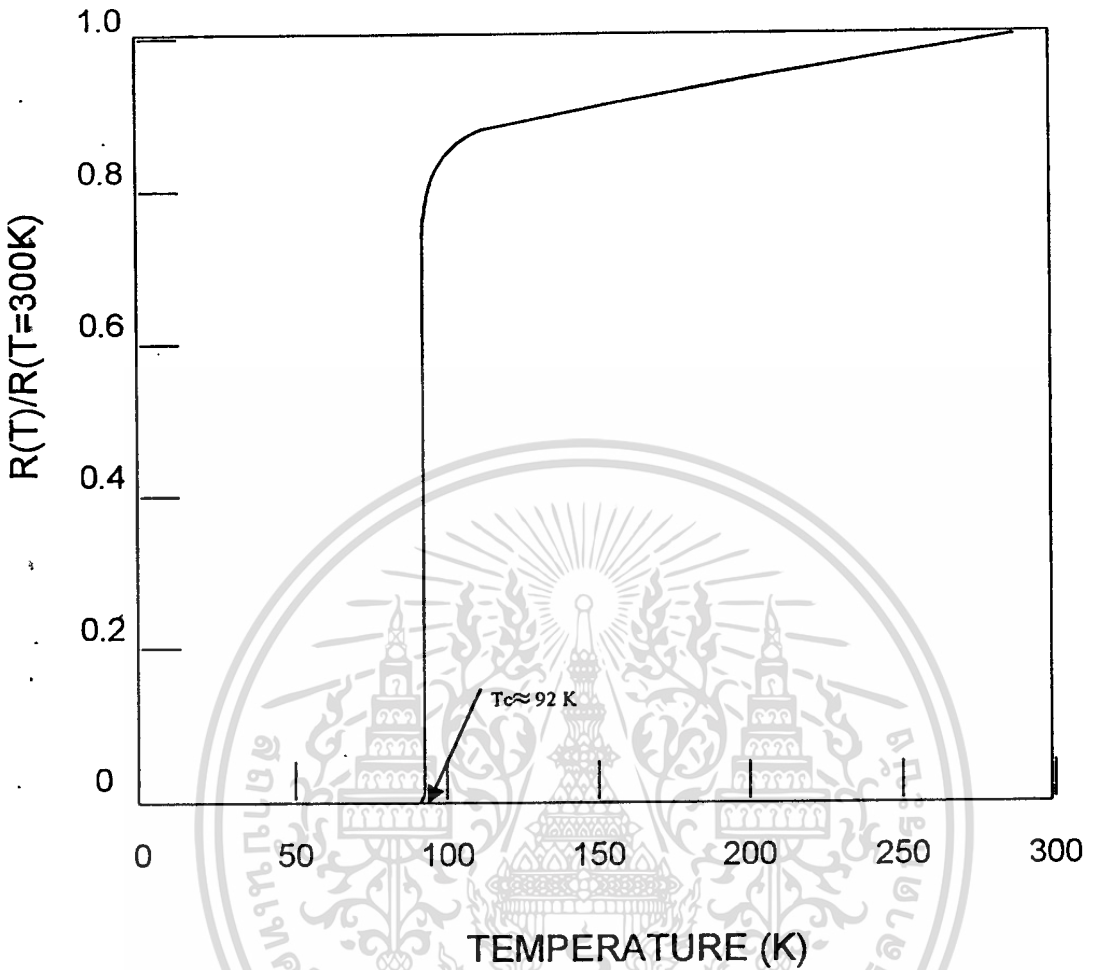
รูปที่ 9 แสดงวงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยสัญญาณ แรงดันนั้นจะถูกนำมาต่อ  
 เข้าที่แกน X ของเครื่องบันทึกสองแกนดังแสดงดังรูปที่ 10 จากนั้นนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้า  
 ยิ่งยวด และเทอร์โมคัปเปิล ค่อย ๆ จุ่มลงไปไนไนโตรเจนเหลวเพื่อลดอุณหภูมิ จากอุณหภูมิห้อง  
 ( $27^{\circ}\text{C}$ ) ลงไปยังอุณหภูมิที่จุดเดือดของไนโตรเจนเหลว ( $77\text{K}$ ) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 แสดงชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิวิกฤต ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงผลการวัดอุณหภูมิวิกฤต ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

### ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รายงานการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซรามิก เพิ่มเติม และการนำไปประยุกต์ใช้งาน เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท เนื้อหาของแต่ละบทที่จะนำเสนอ กล่าวโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ ที่เป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมไปถึงกระบวนการ สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อีกทั้งยังได้นำชิ้นสารที่สร้างได้มาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อยืนยันสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อันได้แก่ แบบจำลองโครงสร้างมหภาค ที่สามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมทั้งการควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก และปรากฏการณ์ฟลักเวฟเรกติไฟ

บทที่ 3 เป็นการศึกษาเพิ่มเติม ถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ได้แก่ การวัด D.C. hysteresis ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยทางอ้อม คุณสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบไอโซโทรปิก เงื่อนไขของการเกิดปรากฏการณ์การจำสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ฮอลล์ฟลักเวฟเรกติไฟ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานของการประยุกต์ใช้งาน ทางด้านการวัดสนามแม่เหล็กต่อไป

บทที่ 4 เป็นการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปเป็นอุปกรณ์วัดกระแสแบบไม่สัมผัส หน่วยความจำแบบนอนโวลตาไทล์ และอุปกรณ์ตรวจหาทิศทางของแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานทางแม็กนีโตอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งแบบบนาลอกและดิจิทัลสำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิก

บทที่ 5 เป็นบทสรุปของการประยุกต์ใช้งาน อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก ที่ได้อาศัยพื้นฐานความรู้ในการวิจัยและพัฒนาจากกลุ่มวิจัยของห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทที่ 2

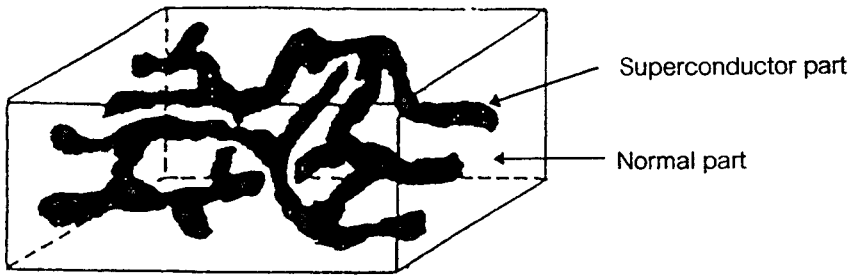
# ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในปัจจุบันนี้ มีการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Tc or conventional superconductors) และแบบอุณหภูมิสูง (High Tc or ceramic superconductor) ในรูปต่างๆ เช่น เส้นลวด เส้นเทป พิล์มหนา และ พิล์มบาง เป็นต้น ซึ่งจะให้ค่า  $J_c$  สูงอยู่ระหว่าง  $10^3$ - $10^7$  A-cm<sup>-2</sup> ทำให้เหมาะกับการใช้งานด้านไฟฟ้ากำลังและไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างยิ่ง แต่ชิ้นงานเหล่านี้จะต้องอาศัยเครื่องมือวิจัยที่มีความเที่ยงตรงสูง วัสดุที่มีความบริสุทธิ์มาก ความพิถีพิถันในการสร้าง รวมถึง อุปกรณ์หล่อเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำพอเพียงและมีประสิทธิภาพดี ซึ่งจะทำให้มีต้นทุนในการวิจัยสูงตามไปด้วย ดังนั้น ทางกลุ่มวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงได้ริเริ่มการวิจัยและพัฒนา ด้านการประยุกต์ใช้งาน ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซรามิกตระกูลอิเทรียม ที่ได้จากการบวนการสร้างมาตรฐานแบบเซรามิก เนื่องจากข้อดีคือมีความสะดวกในการสร้าง และใช้ต้นทุนในการวิจัยที่ไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัดในด้าน ความหนาแน่นกระแสวิกฤต และความคงทนของชิ้นสาร อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้ได้พบสิ่งใหม่ๆ ที่น่าสนใจ อาทิเช่น ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ฟลูเวฟเรกติไฟ ปรากฏการณ์ฮอลล์ฟลูเวฟเรกติไฟ และ คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง เป็นต้น นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิกที่สามารถนำไปอธิบายผลต่างๆ ที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้อย่างสอดคล้องกันด้วย สำหรับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ แมกนีโตริซิสดีฟ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์สนามแม่เหล็กชนิดแอคทีฟ เพื่อประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้มากมาย ซึ่งเป็นงานวิจัยที่มีผู้สนใจกว้างขวางมากสาขาหนึ่งในระดับนานาชาติ

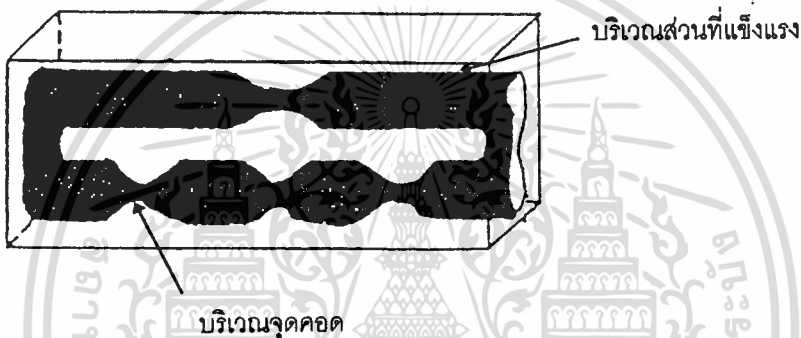
### แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด <sup>[3,19]</sup>

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่ทางห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสร้างขึ้นมานั้น มีลักษณะเนื้อสารแบบเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ซึ่งจากสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก พิจารณาได้ว่าในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 (ก) แสดงแบบจำลองโครงสร้างภายในเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 12 (ข) แสดงแบบจำลองโครงสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกที่ส่วนนำของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในเนื้อสาร ถูกแทนด้วยท่อนำกระแส 2 ท่อ ซึ่งปลายของท่อทั้งสองถูกเชื่อมติดกันและมีจุดคอดเกิดขึ้นอยู่ระหว่างบริเวณที่แข็งแรงของท่อนำกระแส

รูปที่ 12 การเปรียบเทียบสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังนั้นการที่เม็ดสารสามารถแสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น หมายถึงจะต้องมีเนื้อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเชื่อมต่อกันอยู่ ซึ่งอาจจะแสดงแบบจำลองให้เห็นได้ในรูปที่ 12 (ก) และในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเอง ยังเชื่อมกันอย่างไม่สม่ำเสมอคือ มีทั้งการเชื่อมกันอย่างแข็งแรงและเชื่อมกันอย่างหลวมๆ หรือเรียกว่าจุดคอด ซึ่งอาจแสดงให้เห็นชัดเจนได้ ดังรูปที่ 12 (ข) โดยนำส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในรูปที่ 12 (ก) มาแทนด้วยท่อนำกระแส 2 ท่อ โดยปลายท่อทั้งสองนั้นเชื่อมติดเข้าด้วยกัน และภายในท่อนำกระแสก็มีความไม่สม่ำเสมอซึ่งจะสังเกตได้จากมีจุดคอดเกิดขึ้น 1 จุดที่บริเวณกึ่งกลางท่อนำกระแสอันบน และจุดคอดที่เหลืออีก 3 จุด จะอยู่ที่บริเวณริมด้านซ้าย และขวาของท่อนำกระแสอันล่าง

นี่มีอยู่จริงในเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

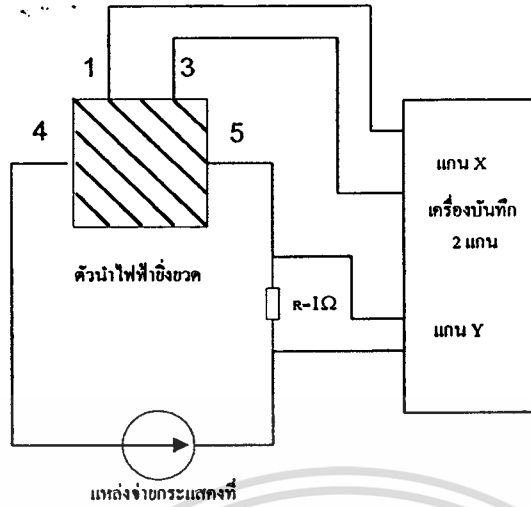
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสก็มีความไม่สม่ำเสมอซึ่งจะสังเกตได้จากมีจุดคอดเกิดขึ้น 1 จุดที่บริเวณกึ่งกลางท่อนำกระแสอันบน และจุดคอดที่เหลืออีก 3 จุด จะอยู่ที่บริเวณริมด้านซ้าย และขวาของท่อนำกระแสอันล่าง สำหรับจุดคอด ที่เสนอมาในแบบจำลองรูปที่ 12 (ข) นี้มีอยู่จริงในเม็คสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก เพราะในขณะที่ทำการอัดผงสารเข้าด้วยกันนั้น อนุภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเข้ามาชิดกันมากยิ่งขึ้น และเมื่อทำการเผาเม็คสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเข้ามาชิดกันมากยิ่งขึ้น และเมื่อทำการเผาเม็คสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดความร้อนก็จะทำให้โมเลกุลนั้นหลอมตัวเข้าด้วยกันอย่างเหนียวแน่น จับตัวเป็นโครงสร้างของเซรามิกขึ้นมา แต่ก็ยังพบว่า มีบางจุดที่อนุภาคมาสัมผัสกันเท่านั้นยังไม่หลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดเป็นจุดคอดขึ้นมา ซึ่งการทดลองในตอนต่อไปนี้ ก็ได้อาศัยแนวความคิดพื้นฐานมาจากสมมติฐาน แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิกนี้ด้วย

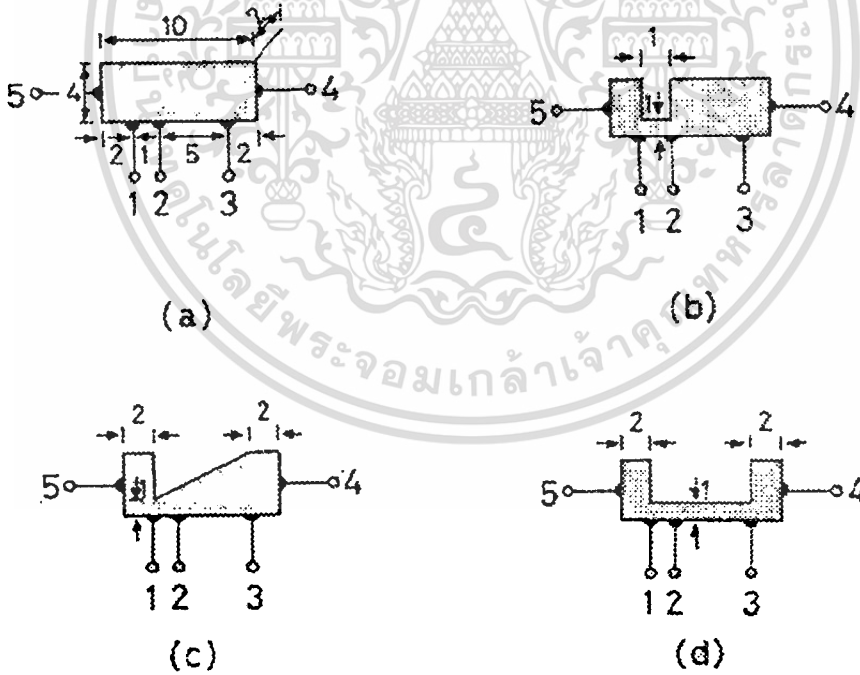
### การทดลองและผลการทดลอง

**การทดลองและผลการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของจุดคอดที่กำหนดขึ้นเองในชั้นสาร**

ในการทดลองนี้จะศึกษาผลที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าในบริเวณจุดคอดของชั้นสารเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชั้นสารที่บริเวณจุดคอด โดยวิธีการตะไบให้มีลักษณะการคอดที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดลองจะทำด้วยการต่อวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ดังรูปที่ 13 โดยให้กระแสไหลเข้า-ออก จากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขั้ว 5 และ 4 ตามลำดับ แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นสารที่ขั้ว 1 และ 3 ทำการทดลองในขณะที่ชั้นสารแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีอุณหภูมิ 77 เคลวิน สำหรับชั้นสารที่จะนำมาทดลองได้มาจากการตะไบเม็คสาร ให้มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาวดังรูปที่ 14 (a) แล้วตะไบต่อไปเป็นรูปทรงแท่งสี่เหลี่ยมยาวมีรอยบากเป็นร่องรูปตัวอักษรไอ ตัวอักษรวีและตัวอักษรยู ดังรูปที่ 14 (b) 14 (c) และ 14 (d) ตามลำดับ สำหรับผลที่ได้ นั้นจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกสองแกน กราฟที่ได้ทั้งหมดจะถูกบันทึกลงบนกระดาษกราฟเดียวกัน

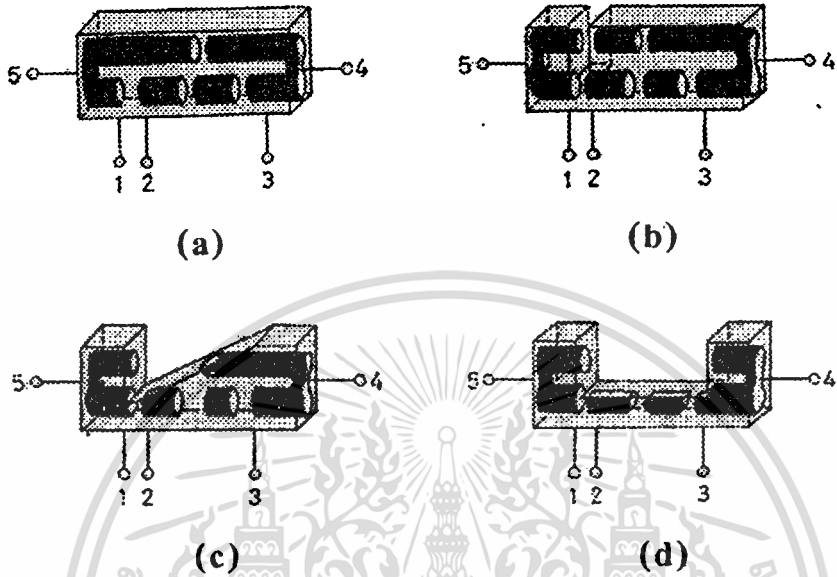


รูปที่ 13 แสดงวงจรที่ใช้วัสดุสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน



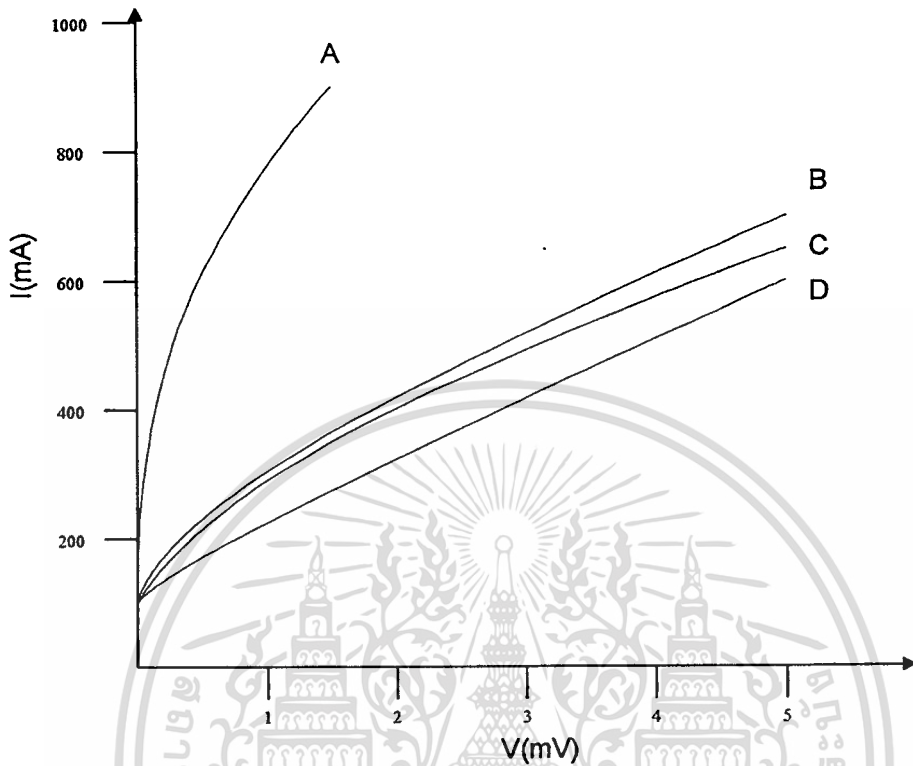
รูปที่ 14 แสดงรูปทรงแบบต่างๆและแบบจำลองของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 14 (a) แท่งสี่เหลี่ยมยาว  
 (b) แท่งสี่เหลี่ยมมากเป็นร่องรูปตัวไอ  
 (c) แท่งสี่เหลี่ยมยาวมากเป็นร่องรูปตัววี  
 (d) แท่งสี่เหลี่ยมยาวมากเป็นร่องรูปตัวยู

รูปที่ 14 (ต่อ) แสดงรูปทรงแบบต่าง ๆ และแบบจำลองของ  
 จักรยานไฟฟ้าฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 15 กราฟแสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันระหว่างขั้ว 1 และขั้ว 3 ของชิ้นสารในรูปที่ 14 (a) ถึง (d) ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 15 เป็นผลการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ในบริเวณส่วนคอดที่กำหนดขึ้นมาของชิ้นสารเดียวกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นสารไป เพื่อเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารในรูปที่ 14 ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นสารไป นั้นจะเห็นได้ว่าชิ้นสารรูปร่าง 14 (a) เมื่อถูกตะไบลดขนาดพื้นที่หน้าตัดบริเวณส่วนคอดลงกลายเป็นรูปร่าง 14 (b), 14 (c) และ 14 (d) จะมีผลทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลงตามไปด้วย จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอธิบายได้ว่า เมื่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดในบริเวณส่วนคอดลดลง การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็สามารถทำได้ง่าย โดยใช้กระแสที่น้อยลง ดังนั้นค่ากระแสวิกฤตจึงมีค่าต่ำลง ส่วนความหนาแน่นกระแสวิกฤตยังไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจาก ความหนาแน่นกระแสวิกฤตเป็นค่าคงที่ของชิ้นสารนั้น ไม่ขึ้นกับรูปร่างของชิ้นสาร นอกจากนี้แล้ว เมื่อพื้นที่หน้าตัดส่วนคอดของชิ้นสารลดลงก็จะทำให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสารส่วนคอดของชิ้นสาร ในขณะที่สูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อธิบายได้ว่าเมื่อให้กระแสที่มากกว่ากระแสวิกฤต ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป จึงเกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณจุดขาดในแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของชั้นสาร ซึ่งจะเห็นว่าถ้าลดพื้นที่หน้าตัดบริเวณส่วนคอดลง เสมือนกับว่าเป็น การเพิ่มปริมาณจุดขาดในแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชั้นสาร ขณะที่สูญเสียสภาพนำไฟฟ้า ยิ่งยวดทำให้แรงดันตกคร่อมบริเวณจุดขาดเพิ่มมากขึ้น และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชั้นสารรูปทรง 14(b) ในบริเวณ 2-3 ไปเป็นรูปทรง 14 (c) และ 14 (d) พบว่า แรงดันตกคร่อมชั้นสารในบริเวณ 1-2 มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่กระแสวิกฤตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากในการสร้างขั้วสัมผัสนั้น รอย สัมผัสที่เกิดขึ้นขั้ว 2 จะต้องมีบางส่วนของขั้วที่ทับบริเวณ 2-3 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าที่บริเวณ 1-2 เมื่อกระแสที่ให้มากกว่าค่ากระแสวิกฤตก็จะมีแรงดันส่วนหนึ่งไปตกคร่อมบริเวณ 1-2 และอีกส่วน หนึ่งไปตกคร่อมบริเวณ 2-3 ซึ่งแรงดันส่วนหลังนี้จะมีผลต่อแรงดันตกคร่อมบริเวณ 1-2 ที่วัดได้ก็ ต่อเมื่อพื้นที่หน้าตัดของขั้ว 2 ในบริเวณ 2-3 มีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่หน้าตัดบริเวณส่วนคอดของชั้น สารหรือบริเวณ 1-2 ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงจาก 14 (b) ไปเป็น 14 (c) และ 14 (d) กระแสวิกฤตจึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่แรงดันตกคร่อมบริเวณ 1-2 ในขณะที่สูญเสียสภาพ นำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเพิ่มมากขึ้น

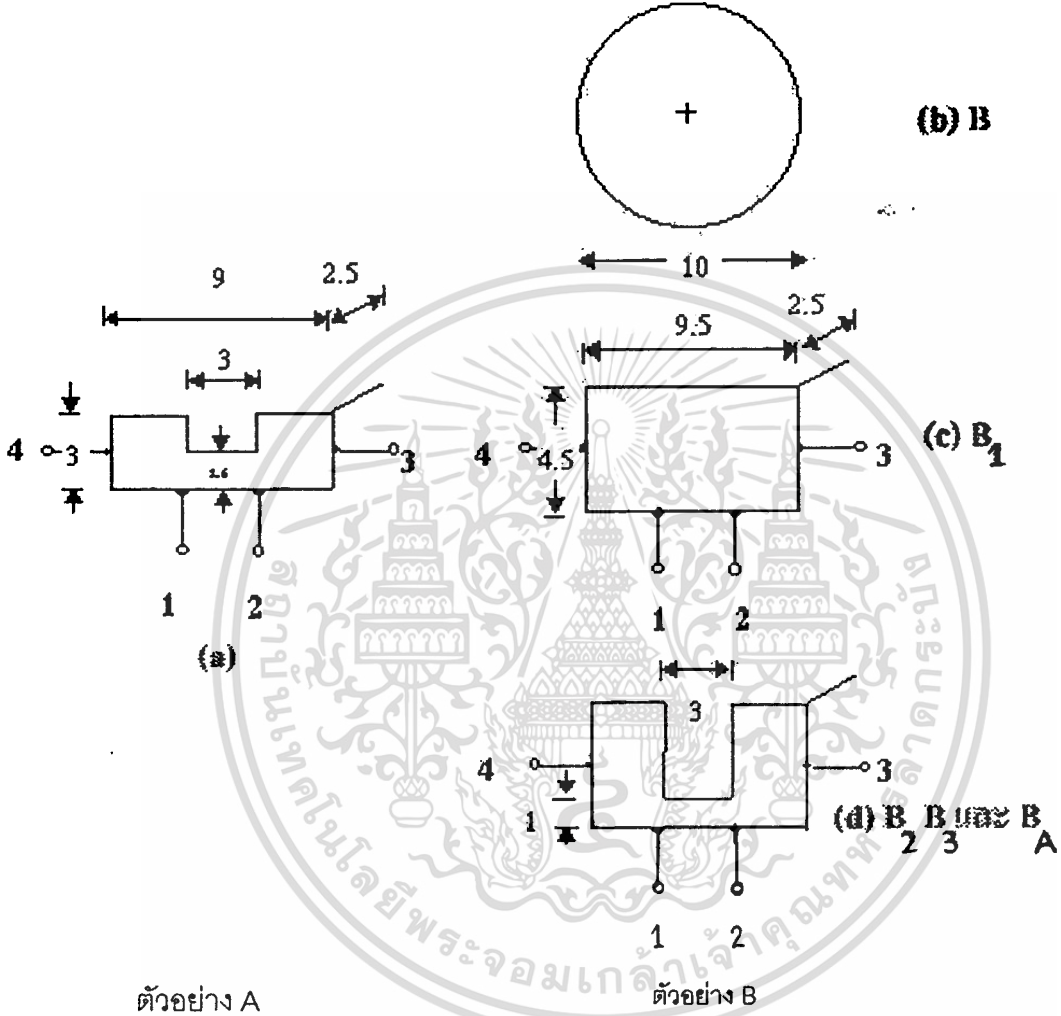
### การควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด<sup>[4]</sup>

เพื่อที่จะนำหัววัดสนามแม่เหล็ก ไปประยุกต์ใช้งาน ที่ต้องใช้หัววัดที่มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึง กันจำนวนมากว่าหนึ่งหัววัดขึ้นไป การทำซ้ำ ๆ กันสามารถทำได้ โดยการปรับแต่งลักษณะ สมบัติทางไฟฟ้า ของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ยังไม่ได้ปรับเทียบให้มีกระแสวิกฤต และความต้านทานที่มีการนำแบบปกติเป็นค่าเดียวกัน กับหัววัดที่ปรับเทียบแล้วโดยกระบวนการตะไบ หรือ การทริม เป็นความจริงที่ว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก ซึ่งเป็นสาร ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐาน ของห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในทางปฏิบัติ นั้น การสร้างเป็นชุดครั้งละมาก ๆ มีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยเสมอ ยกตัวอย่างเช่น ความหนาแน่น ของกระแสวิกฤต หรือ  $J_c$  อาจจะแปรเปลี่ยนจาก 10 ถึง 20 A-cm<sup>-2</sup> ดังนั้นถ้าใช้ชั้นสารที่มีขนาดของ จุดคอดที่สร้างขึ้นเท่ากัน ความแตกต่างของกระแสวิกฤตอาจจะกลายเป็น 100 %

เพื่อที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างทาง เรขาคณิตของจุดคอดที่สร้างขึ้น จึงได้เตรียมชั้นสารตัวอย่างโดยการตะไบเป็นชั้นสารมาตรฐาน และชั้นสารที่จะถูกปรับเทียบดังรูปที่ 16 โดยปรับแต่งรูปร่างได้แก่ตัวอย่าง A และตัวอย่าง B ตาม ลำดับ ในรูปที่ 17 แสดงลักษณะสมบัติระหว่างกระแส-แรงดันหรือกราฟ I-V ของชั้นสารตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดตัวอย่าง ทั้งสองที่ อุณหภูมิ 77 K ถูกลำมาเปรียบเทียบกัน ในรูปที่ 17 ผลการทดลองคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

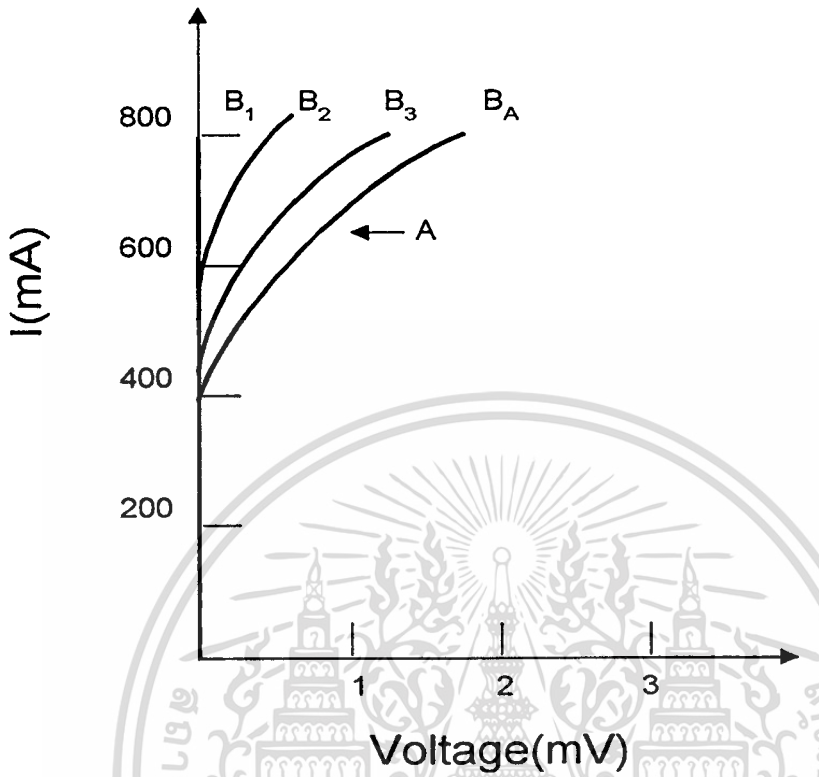
กระแสวิกฤตของชั้นสารตัวอย่าง B สามารถทำให้ลดลงโดยการทริม และเส้นกราฟที่ทับซ้อนกันระหว่างชั้นสารมาตรฐาน และชั้นสารที่มีการปรับแต่งรูปร่างนั้นสามารถทำได้



รูปที่ 16 รูปร่างของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

- a) ชั้นสารมาตรฐาน (ตัวอย่าง A)
- b) - d) ชั้นสารตัวอย่างที่ถูกเปรียบเทียบ (ตัวอย่าง B) โดยชั้นสารตัวอย่างดังกล่าวจะแสดงได้ดังนี้
  - b) เม็ดสารตัวอย่าง B ก่อนที่จะทำการตะไบ และทำขั้วสัมผัส
  - c) ชั้นสาร B<sub>1</sub> ซึ่งได้ตะไบและทำขั้วสัมผัสไว้แล้ว โดยที่ยังไม่ได้สร้างส่วนคอด
  - d) ชั้นสาร B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> และ B<sub>A</sub> ซึ่งจะมีความกว้างของส่วนคอด (W) จากมากไปหาน้อย คือ W<sub>2</sub>, W<sub>3</sub> และ W<sub>A</sub> ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



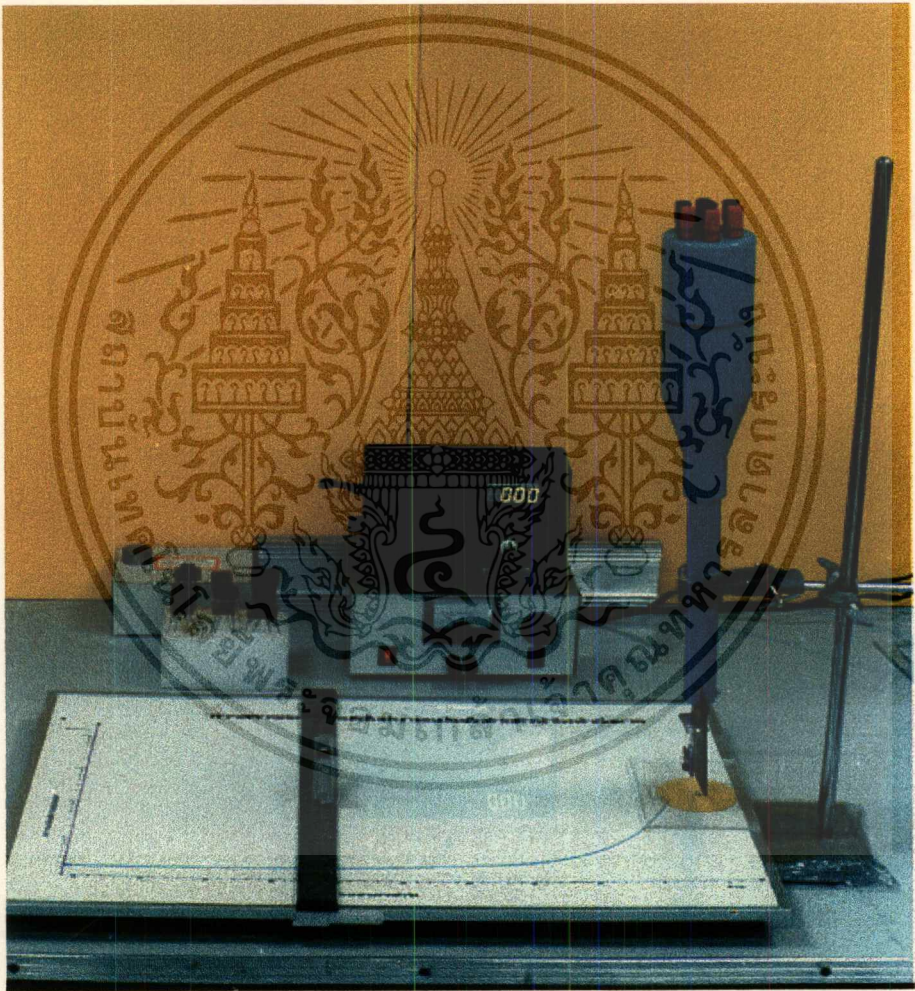
รูปที่ 17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ซึ่งเปรียบเทียบชั้นสารตัวอย่างที่ถูกปรับเทียบ(B) กับชั้นสารตัวอย่างมาตรฐาน (A)

### คุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก<sup>(11)</sup>

การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ทำโดยการวัดคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ซึ่งพบว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมนั้นจะมีค่ามากขึ้น ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ผลจากปรากฏการณ์นี้สามารถถูกนำไปใช้เป็นตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ สำหรับการทดลองและผลการทดลองจะได้นำเสนอต่อไป

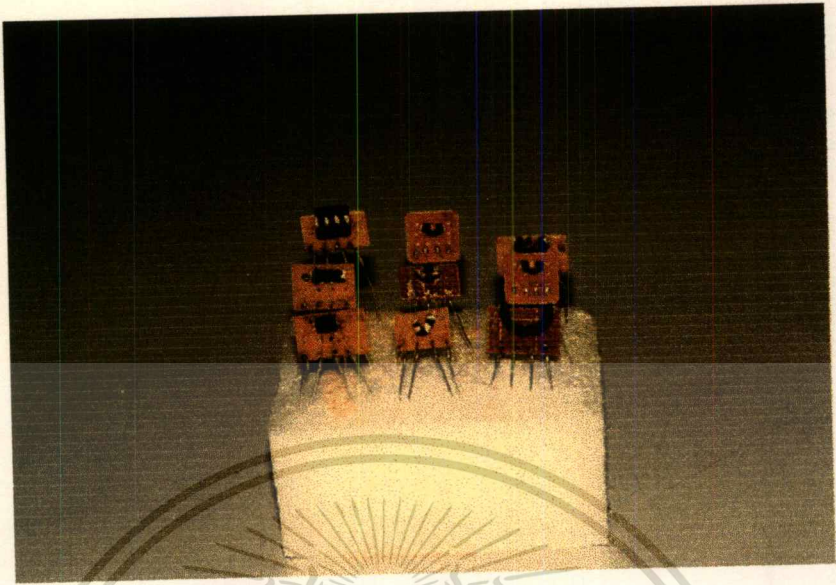
### การทดลองและผลการทดลอง

จากการสังเกตพบปรากฏการณ์การตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ที่สร้างขึ้นในขณะทดสอบคุณสมบัติเรื่อง Silsbee effect นั้นอธิบายได้ว่า เนื่องจากมีผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากทำให้เกิดศักดาตกคร่อมขั้วสาร จึงได้จัดทำชุดทดลองที่ประกอบไปด้วยหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยาว และชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กคงที่มาตรฐานที่ปรับค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 18 ส่วนขั้วสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่เตรียมขึ้นเพื่อการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 18 ชุดทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

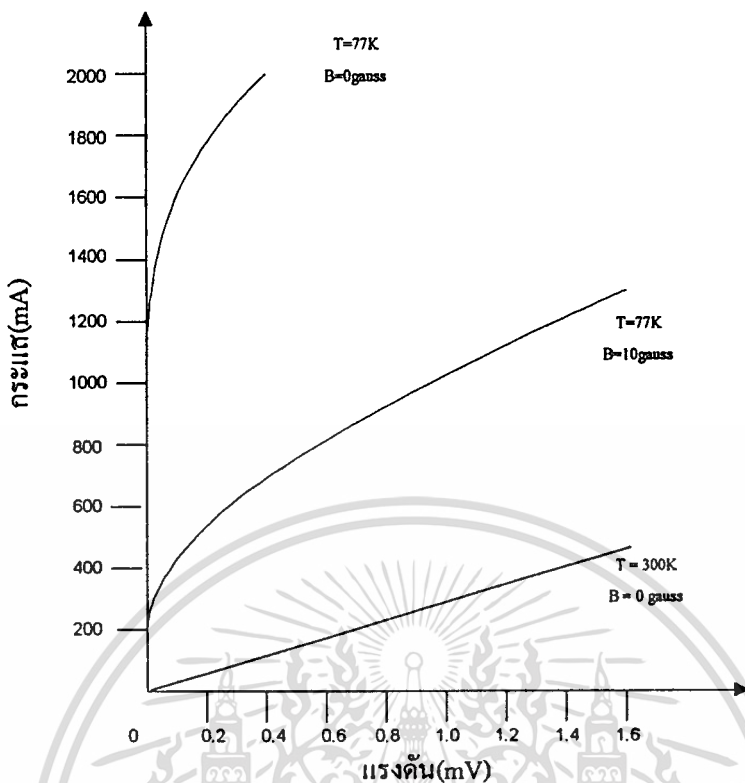


### รูปที่ 19 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ทดลอง

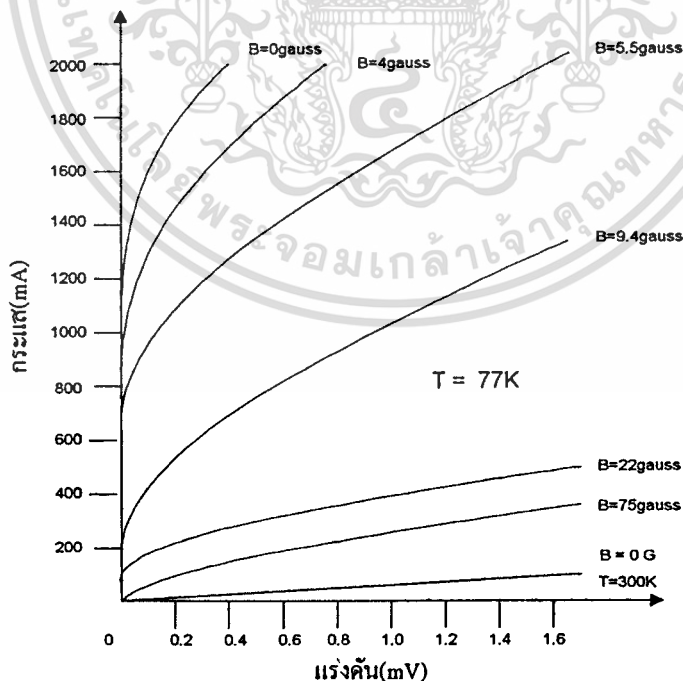
จัดเครื่องมือการทดลองตามวงจรตามรูปที่ 13 โดยให้แสดงผลการทดลองบนเครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder)

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น ในขณะที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ( $T=300K$ ) บันทึกผลที่ได้
- 2) ทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ที่อุณหภูมิ 77K ในไนโตรเจนเหลว บันทึกผลการทดลองเพื่อหาค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) สูงสุดขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กจากภายนอกเลย ( $B=0$  gauss)
- 3) ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความเข้ม 10 gauss ( $B=10$  gauss) แก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวเดิม นั้น ที่อุณหภูมิ 77K บันทึกผลการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กต่อค่ากระแสวิกฤต ผลการทดลอง ทั้งสามข้างต้นนั้น แสดงดังรูปที่ 21 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีอุณหภูมิ 300K จะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวต้านทานทั่วไป ซึ่งจากผลการทดลองนี้คำนวณเป็นค่าความต้านทานได้ประมาณ 26.5  $m\Omega$  และสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกได้ประมาณ 1 แอมป์ แต่เมื่ออิทธิพลจากสนามแม่เหล็กภายนอก 10 gauss จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเหลือ ประมาณ 150 มิลลิแอมป์



รูปที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เมื่อได้รับผลของความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ กัน

จากนั้นได้ทำการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชั้นเคมที่อุณหภูมิ 77K ภายใต้อิทธิพลของความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ กันโดยบันทึกผลการทดลองลงบนกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน เพื่อการเปรียบเทียบอิทธิพลของความเข้มสนามแม่เหล็ก ต่อค่ากระแสวิกฤต ดังแสดงดังรูปที่ 21 ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้นจะทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลง

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 21 จะเห็นว่าขณะที่ชั้นสารมีอุณหภูมิ 300K นั้นจะไม่แสดงคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเลย นั่นคือจะแสดงคุณสมบัติของตัวต้านทาน ที่มีค่าน้อยมาก ๆ เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิวิกฤต แต่เมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ( $T_c=90K$ ) เช่นที่ 77K จะเห็นได้ว่าขณะที่กระแสไหลผ่านมีค่าไม่มาก (พิจารณาที่กระแสมีค่าน้อยกว่า 1 แอมป์) จะไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารเลย แสดงว่าขณะนั้นชั้นสารนั้นมีคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น แต่เมื่อให้กระแสไหลมากขึ้น (พิจารณาที่กระแสมีค่ามากกว่า 1 แอมป์) จะเกิดค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้น ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากกระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวจะทำลายสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนไป ทำให้เกิดเป็นเสมือนความต้านทานเกิดขึ้นจึงเกิดมีค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสาร

การทำลายสภาพความนำไฟฟ้ายิ่งยวด ด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวความคิดดังกล่าวนี้ ยืนยันให้เห็นจริงได้โดยการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองดังรูปที่ 21 ว่ากระแสวิกฤตมีค่าลดลงเหลือเพียง 150 มิลลิแอมป์ได้ นั่นคือเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนตามกัน

ผลจากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น มีคุณสมบัติในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กได้ โดยแสดงให้เห็นเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ที่ตกคร่อมตัวชั้นสารนั่นเอง ซึ่งถ้านำค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันดังกล่าวไปแสดง โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอ่านค่าแรงดัน แล้วทำการปรับ (Adjust) ตัวชี้บ่งบอกค่าให้แสดงเป็นค่าสนามแม่เหล็กก็จะได้ ชุดตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นตัวตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กต้นแบบ แสดงในรูปที่ 18

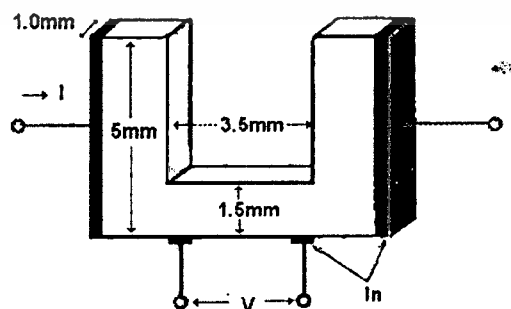
## ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก<sup>[7]</sup>

เป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นมีคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าต่ำ ๆ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ที่ค่าสนามแม่เหล็กสูง ๆ จะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นเกิดสภาพแม่เหล็กปริมาณน้อย ๆ ที่ตกค้างอยู่ในตัวมันด้วย หรือเรียกว่าปรากฏการณ์จำ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค ซึ่งสามารถแสดงด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่มากระทบนั้นมีค่ามากขึ้น และค่าแรงดันนั้นจะยังคงปรากฏอยู่ ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นจะหมดไปแล้วก็ตาม

### การทดลองและผลการทดลอง

จัดเครื่องมือการทดลองตามวงจรตามรูปที่ 13 และแสดงผลการทดลองบนเครื่องบันทึกสองแกน

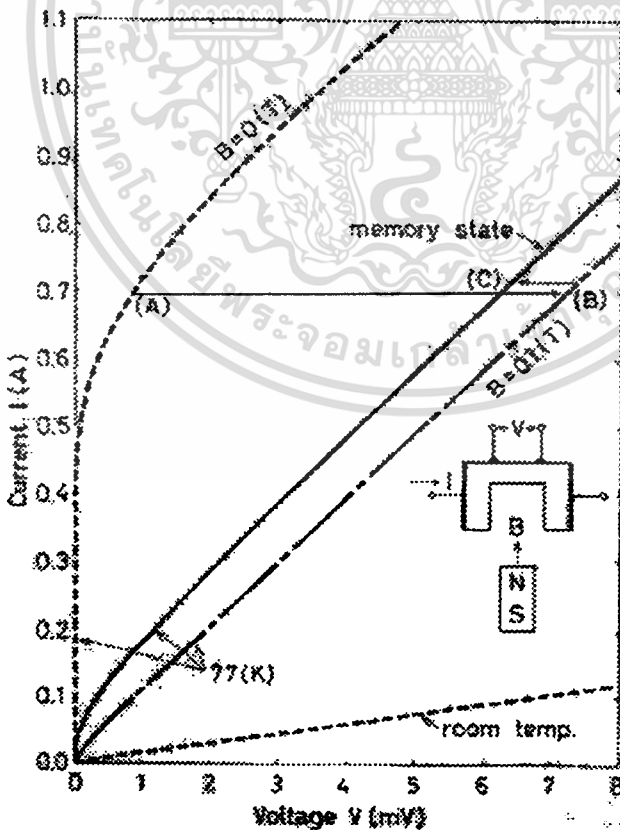
- 1) วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส กับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สร้างขึ้นจากชิ้นสารที่ได้รับการตัดแต่งให้มีขนาดคั่งรูปที่ 22 ในขณะที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องบันทึกผลการทดลอง
- 2) วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส กับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สร้างขึ้นขณะมีอุณหภูมิ 77K บันทึกผลการทดลองเพื่อวัดค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) ขณะที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กภายนอก
- 3) ให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม 1000 gauss ( $B=1000$  gauss) แก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวเดิม ขณะที่อุณหภูมิ 77K วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน บันทึกผลการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กต่อค่ากระแสวิกฤต
- 4) นำสนามแม่เหล็กภายนอกชั่วคราวออกไป แล้ววัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันอีกครั้ง บันทึกผลการทดลองบนกระดาษกราฟแผ่นเดิม



รูปที่ 22 แสดงรูปร่างของชิ้นสารตัวอย่างที่มีการจ่ายกระแสไหลผ่านเข้า และออกทางขั้วคู่ นอก แรงดันตกคร่อม  $V$  ถูกวัดโดยขั้วคู่ใน

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นนั้นแสดงให้เห็นว่า ขณะที่สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีอุณหภูมิ 300K จะมีคุณสมบัติเสมือนตัวต้านทานไฟฟ้าทั่วไป และสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 500 mA แต่เมื่ออิทธิพลจากสนามแม่เหล็กภายนอก 0.1T จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเป็นศูนย์ และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นออกไป พบว่าคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่กลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ โดยจะยังคงมีค่าแรงดันตกคร่อมเนื้อสารอยู่ ถึงแม้กระแสที่ไหลผ่านเพียง 100 mA ก็ตาม ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าของกระแสวิกฤตขณะนี้นั้นเปลี่ยนเป็นประมาณ 50 mA นั่นคือกระแสวิกฤตที่ลดลงจะทำให้เกิดสภาพต้านทานสูงขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาที่กระแสคงที่พบว่าแรงดันตกคร่อมจะมีค่าสูงขึ้นขณะที่จิ้นสารอยู่ในสภาวะจำ แรงดันที่ตกค้างอยู่นี้เรากล่าวได้ว่า เกิดการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สำหรับการศึกษเพิ่มเติมในปรากฏการณ์ดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเกี่ยวกับเงื่อนไขของการเกิดปรากฏการณ์จำสภาพแม่เหล็กซึ่งเราสามารถใช้ในการที่จะประยุกต์ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหน่วยความจำสนามแม่เหล็กต่อไปดังได้กล่าวถึงในบทที่ 4



รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

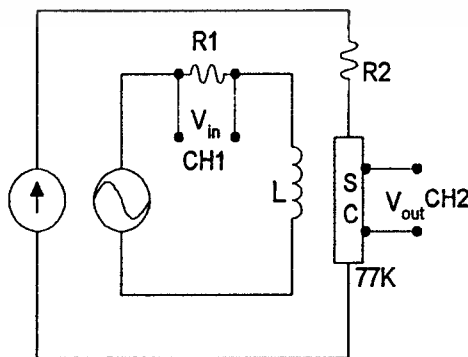
## ปรากฏการณ์ฟลิวเร็กตีฟ<sup>[9]</sup>

จากที่ได้ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา โดยจะมีการตอบสนองแบบเรียงสัญญาณลักษณะเต็มคลื่น(Full wave rectification) ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ด้วย แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก

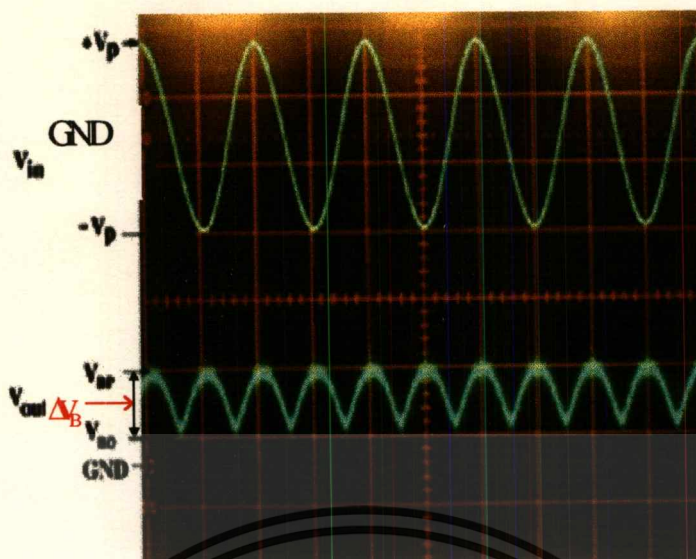
การที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองต่อสัญญาณ ที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา โดยการเรียงรูปสัญญาณแบบเต็มคลื่นนั้น จะมีความคล้ายคลึงกับคุณสมบัติการเรียงกระแสในรอยต่อ P-N junction ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น โดยปกติการเร็กตีฟแบบเต็มคลื่นในไดโอดจะต้องใช้ไดโอด 2 หรือ 4 ตัว แต่ในสิ่งประดิษฐ์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น ใช้เพียงหนึ่งตัวเท่านั้น ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวจึง เป็นประโยชน์ในการประมวลผลสัญญาณแบบสลับ คือไม่ต้องใช้วงจรค่าสัมบูรณ์เพื่อกลับขั้วคลื่นด้านลบ ซึ่งจะทำให้ลดขนาดของวงจรลงได้ สำหรับการเกิดเร็กตีฟในไดโอด เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่จะไปเสริม หรือหักล้าง กับศักดาของรอยต่อ (built in potential)ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในทางเดียว อย่างไรก็ตามกรณีของการเร็กตีฟในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามบริเวณส่วนคอดในเนื้อสาร เมื่อมีการขาคออกจากกันของส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะทำให้เกิดความต้านทานขึ้นในบริเวณนั้น จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะได้นำเสนอต่อไป

### การทดลองและผลการทดลอง

เมื่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต่อเข้ากับวงจร ซึ่งใช้ออสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์แสดงผล ดังในรูปที่ 24 ค่าแรงดันอินพุตที่ให้ผ่านขดลวด (L) นั้นจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะไปทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังรูปที่ 25



รูปที่ 24 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติในการเรียงรูปสัญญาณ

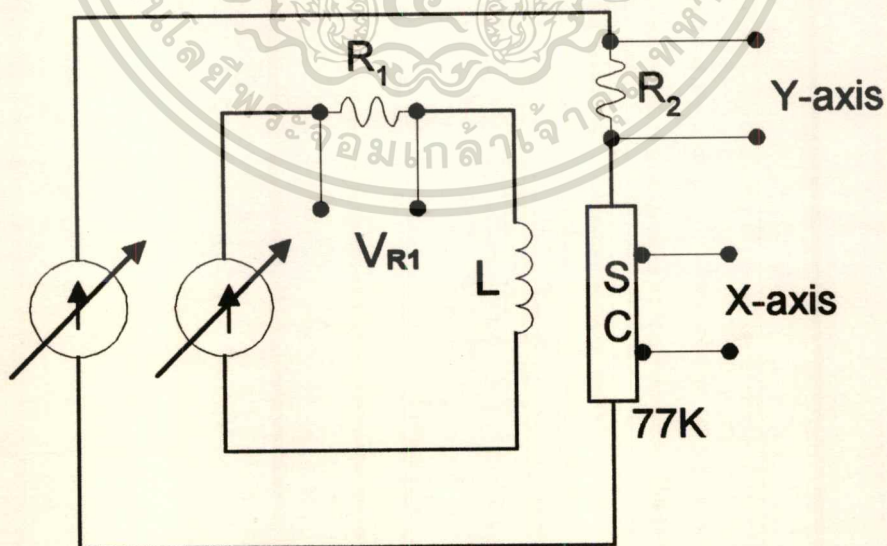


$V_{in} : 5 \text{ mV/div.}$  Time = 1 ms/div.

$V_{out} : 1 \text{ mV/div.}$

รูปที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์ กับเวลาของปรากฏการณ์ฟลูเวฟเรกติไฟที่ความถี่ 500 Hz ที่ความถี่ 15 mV กระแสไบอัส

สำหรับการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้โดยอาศัยการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันตกคร่อมชิ้นสารด้วยวงจรดังในรูปที่ 26

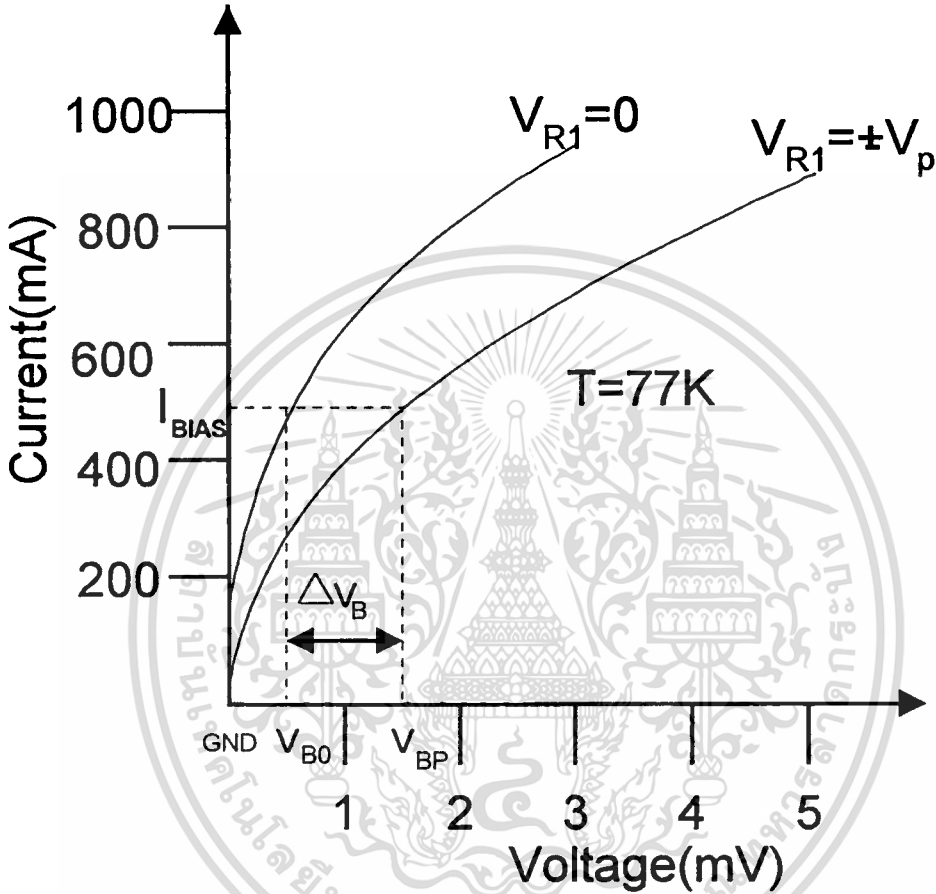


รูปที่ 26 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติระหว่างกระแส กับแรงดัน

สำหรับทดสอบปรากฏการณ์ฟลูเวฟเรกติไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปรับค่ากระแสไบอัสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จาก 0 ถึง 1000 mA เปรียบเทียบกันระหว่างที่ไม่มีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_1$  และมีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_1$  เป็น  $\pm V_p$  ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 27



รูปที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อทดสอบปรากฏการณ์ฟลูวเฟร็ดคิฟ ขณะที่มีแรงดันตกคร่อม  $V_{R1}$  เป็นศูนย์ และ  $\pm V_p$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่าที่กระแสไบอัสมีค่ามากกว่าค่ากระแสวิกฤต คือที่ประมาณ 500 mA แรงดันตกคร่อมชิ้นสารขณะที่ปราศจากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_1$  หรือ  $V_{B0}$  จะเป็น 0.6 mV และขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_1$  เป็น  $\pm V_p$  แรงดันตกคร่อมชิ้นสารหรือ  $V_{BP}$  จะมีค่าเท่ากันและเครื่องหมายเหมือนกัน โดยที่ความแตกต่างของแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร หรือ  $\Delta V_B$  มีค่าประมาณ +1 mV จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_1$  มากขึ้น แรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นไปด้วยโดยจะไม่เปลี่ยนแปลงเครื่องหมายเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สามารถให้ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ทั้งแบบคงที่และแบบสลับ โดยจะให้แรงดันที่สัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากกระทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

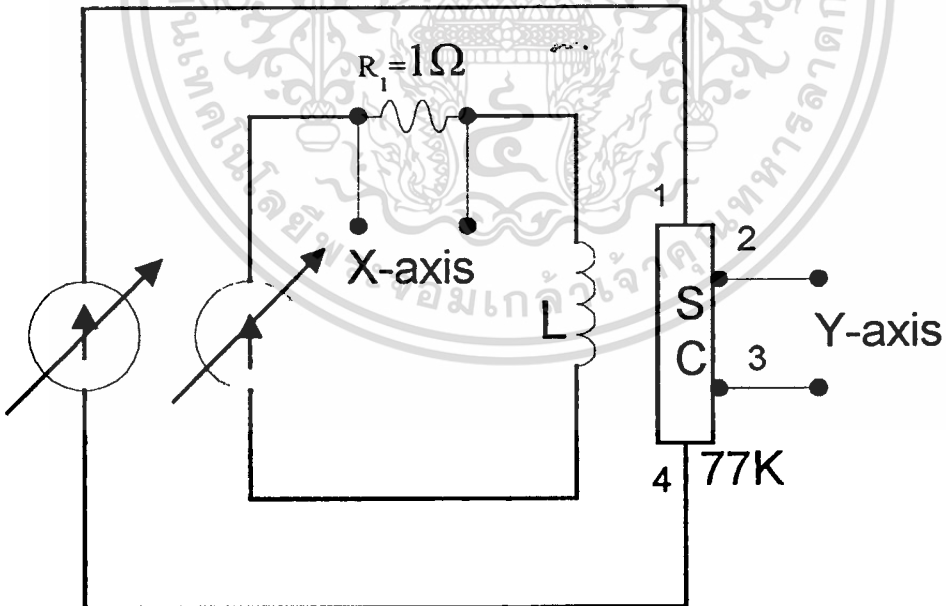
ในบทที่แล้วได้กล่าวถึงทฤษฎี และหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทำให้ได้ทราบถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก การควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงปรากฏการณ์ฟลักเวฟเรกติไฟ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับเนื้อหาในบทนี้ ที่จะได้กล่าวถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งจะมีความสำคัญต่อการนำความรู้นี้ไปประยุกต์ใช้งานในบทต่อไป โดยเนื้อหาที่กล่าวถึงได้แก่ การวัด D.C' hysteresis ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยทางอ้อม คุณสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบไอโซโทรปิก เงื่อนไขของการเกิดปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก ตลอดจนปรากฏการณ์ฮอลล์ฟลักเวฟเรกติไฟ ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

#### การวัด D.C Hysteresis ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยทางอ้อม

ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่เปลี่ยนแปลงไปกับสนามแม่เหล็กที่ผ่านมาพบว่า เมื่อให้กระแสตรงที่แก่ชิ้นสาร แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสารแปรเป็นเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็ก จึงได้มีแนวคิดที่จะนำคุณสมบัติดังกล่าว ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งสามารถใช้วัดค่าสนามแม่เหล็กขนาดต่ำ ๆ ได้เป็นอย่างดีปราศจากฮิสเทอรีซิส และมีการตอบสนองที่ไม่ค้างถึงขั้วหรือคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic property) อย่างไรก็ตามในรายงานนี้จะได้กล่าวถึงกรณีของสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงเกินกว่าค่าสนามวิกฤตนั้นจะทำให้หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีความไวต่ำลงหรืออยู่ในสถานะอิ่มตัว (saturation) ซึ่งจะก่อให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็กภายในชิ้นสาร (memory) และเมื่อสนามลดลงมาจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับสนามแม่เหล็ก เป็นคนละเส้นทางกับขณะเพิ่มสนามเกิดเป็นวงรอบฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ของความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสาร การศึกษาถึงปรากฏการณ์ดี.ซี.ฮิสเทอรีซิส เป็นประโยชน์ต่อการกำหนดช่วงสนามแม่เหล็กในการใช้งานที่ขนาดสนามต่ำ ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

### การทดลอง และผลการทดลอง

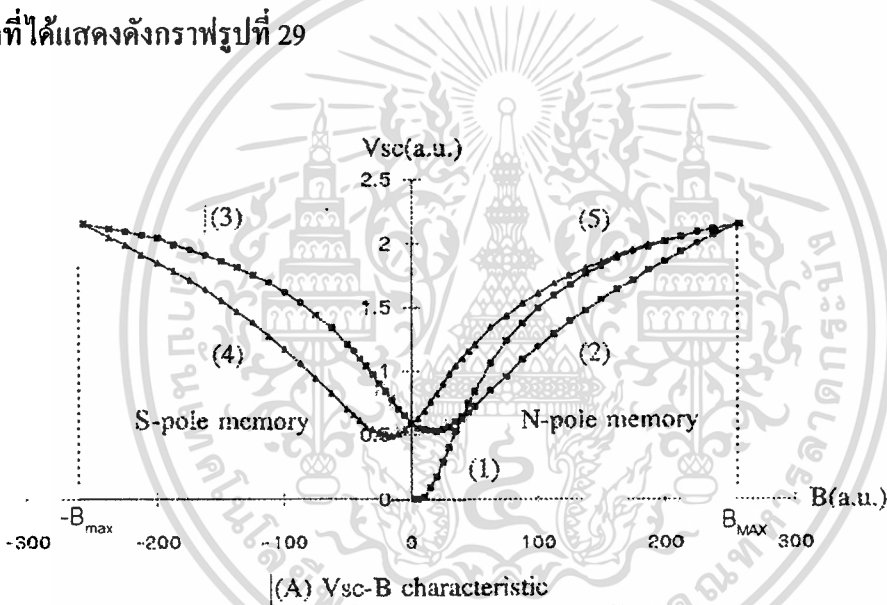
ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้ทำการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ four point probe ไว้แล้วไปต่อเข้ากับวงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 28 โดยให้แหล่งจ่ายกระแสตรงจ่ายกระแสเข้าทางขั้วที่(1) แล้วออกทางขั้วที่ (4) ส่วนขั้วที่(2) และ(3) ใช้ตรวจสอบแรงดันตกคร่อมชิ้นสารโดยต่อเข้ากับที่แกน Y ของเครื่องบันทึกสองแกน จากนั้นนำชิ้นสารใส่ลงในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่เตรียมไว้ และนำแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องทั้งบวก และลบ ต่อผ่านตัวต้านทานแบบอนุกรมขนาด  $1\Omega$  แล้วต่อเข้ากับขดลวดดังกล่าว สำหรับขนาด และทิศทางของสนามแม่เหล็ก ตรวจสอบด้วยการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดซึ่งวัดจากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานดังกล่าว ที่ต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน เมื่อนำชุดวัดที่มีหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ใส่ลงในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กแล้วจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีอุณหภูมิ  $77K$  และตั้งกระแสไบอัสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่ากระแสสูงกว่าค่ากระแสวิกฤตเล็กน้อย ก็สามารถทำการศึกษาปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส และการหาปริมาณกระแสคงสภาพภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ได้จากการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 28 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร กับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อแจ้งให้ทราบเท่านั้น มิใช่เผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

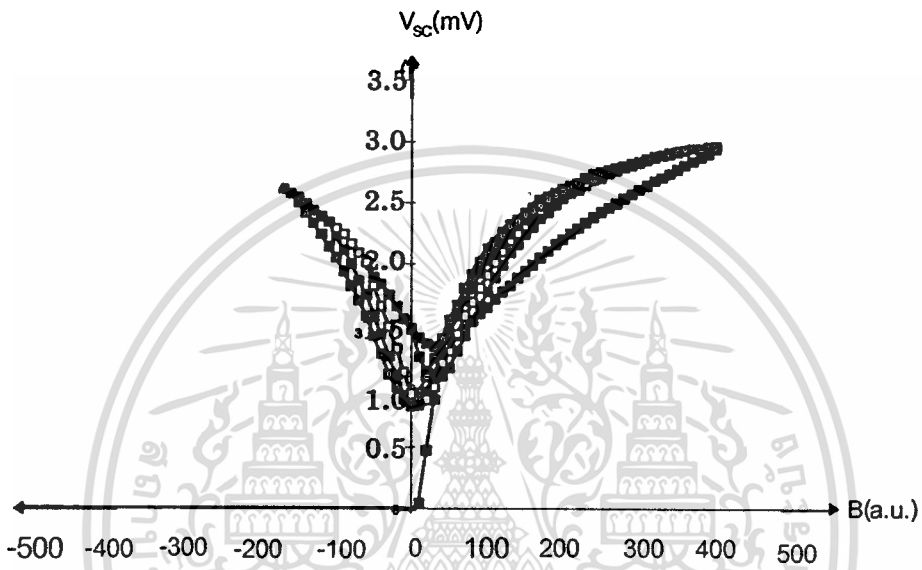
ในการศึกษาปรากฏการณ์ซี.อี. ฮีสเตอร์ีซิสในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถทำได้โดย การวัดความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันตกคร่อมชั้นสารที่ปราศจาก การจำสภาพแม่เหล็กกับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก โดยใช้รูปแบบของการป้อนสนามแม่เหล็กดังนี้ คือเริ่มต้นจากการจ่ายสนามแม่เหล็กจากศูนย์ ขึ้นไปยังค่าสนาม 10 a.u. ซึ่งเทียบเท่ากับกระแสผ่านขอลวดเป็น 10 mA หรือสนาม 0.8 mT แล้วลดค่าสนามลงมาเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่ง แล้วให้สนามเพิ่มขึ้นอีกโดยให้กระแสเพิ่มอีกครั้งละ 10mA จนกระทั่งถึงค่าสนามวิกฤติ( $B_c$ ) ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าสนามสูงสุดที่ทำให้กราฟย้อนกลับได้ จากนั้นจึงเพิ่มค่าสนามขึ้นไป มากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ( $B_c$ )ถึงค่าสนาม  $B_{MAX}$  เป็น 250 a.u. แล้วลดสนามแม่เหล็กลงเป็นศูนย์ ต่อจากนั้นลดสนามแม่เหล็กลง ไปจนถึงค่าสนามแม่เหล็กที่เป็นค่าลบ ( $-B_{MAX}$ ) แล้วจึงเพิ่มสนามกลับไปยังสนามแม่เหล็กวิกฤตที่เป็นบวก ( $+B_{MAX}$ ) อีกครั้งหนึ่ง ผลที่ได้แสดงดังกราฟรูปที่ 29



รูปที่ 29 กราฟฮีสเตอร์ีซิสระหว่าง แรงดันตกคร่อมชั้นสาร กับสนามแม่เหล็ก ที่กระแสคงที่เท่ากับ กระแสวิกฤตโดยป้อนสนามแม่เหล็กจาก ศูนย์ไปยัง  $B < B_c$  แล้วกลับมายังค่าสนามที่เป็นศูนย์ จากนั้นเพิ่มสนามไปยัง  $B_{MAX} > B_c$  แล้วปรับสนามไปยัง ( $-B_{MAX}$ ) จากนั้นเพิ่มสนามแม่เหล็กไปยัง ( $+B_{MAX}$ )

ในการทดลองวัดปริมาณกระแสคงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถทำได้โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันตกคร่อมชั้นสารที่ปราศจากการจำสภาพแม่เหล็ก กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก โดยใช้รูปแบบการป้อนสนามแม่เหล็กดังนี้ คือเริ่มต้นจากการจ่ายสนามแม่เหล็กจาก ศูนย์ขึ้นไปยังค่าสนาม ที่มากกว่าค่าสนามวิกฤต ( $+B_c$ ) หรือ  $B_{MAX}$  ซึ่งในที่นี้คือ 400 a.u. แล้วลดค่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามลงมาเป็นศูนย์ จากนั้นเพิ่มสนามแม่เหล็ก ไปยังค่าสนาม  $B_{MAX}$  แล้วลดสนามลงมาให้เป็นลบมากขึ้นกำหนดจากกระแสต่ำสุดที่ให้หลอดครั้งละ 20 mA ในแต่ละรอบเส้นกราฟไม่ย้อนกลับเส้นเดิม โดยจุดต่ำสุดของกราฟจะเคลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้น ซึ่งจะกำหนดให้การทดลองหยุดลงที่ปริมาณสนามแม่เหล็กที่ทำให้จุดต่ำสุดของกราฟอยู่ที่ค่าสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ผลที่ได้แสดงดังกราฟในรูปที่ 30



รูปที่ 30 กราฟฮิสเตอร์ซิสระหว่าง แรงดันตกคร่อมชิ้นสาร กับสนามแม่เหล็ก ที่กระแสคงที่เท่ากับ กระแสวิกฤต ซึ่งใช้ในการวัดปริมาณกระแสคงสภาพในชิ้นสาร

โดยป้อนสนามแม่เหล็กจาก ศูนย์ไปยัง  $B_{MAX} > B_C$  แล้วกลับมายังค่าสนามที่เป็นศูนย์ จากนั้นเพิ่มสนามไปยัง  $B_{MAX}$  อีกครั้งหนึ่ง แล้วปรับสนามไปยัง  $(-B_{COM})$  จากนั้นเพิ่มสนามแม่เหล็กไปยัง  $(+B_{MAX})$  โดยที่สนาม  $(B_{COM})$  จะลดลงครั้งละ 20 a.u. ซึ่งจะเห็นว่าจุดต่ำสุดของกราฟจะย้ายมายังค่าสนามที่เท่ากับศูนย์ โดยการทดลองจะหยุดลงที่ค่าที่มีสนาม  $B_{COM}$  ซึ่งทำให้จุดต่ำสุดของกราฟอยู่ที่สนามที่เป็นศูนย์

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

ปรากฏการณ์ คี.ซี.ฮิสเตอร์ซิส ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร กับสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 29 โดยหมายเลข (1) ถึง (5) จะแสดงลำดับการป้อนสนามแม่เหล็กในการทดลอง พบว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กที่ต่ำกว่าค่าสนามแม่เหล็กเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิกฤต ซึ่งในระหว่างสนามแม่เหล็กที่ 0-40 a.u. เส้นกราฟจะย้อนกลับแสดงให้เห็นว่าไม่มีการแพร่ของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในชั้นสารได้ นอกจากนี้สำหรับการทดลองที่สนามตรงข้ามจะให้ผลสมมาตรด้วย ซึ่งสนับสนุนปรากฏการณ์ฟลูเวฟเรกติไฟ ที่ได้นำเสนอไปแล้ว ซึ่งแสดงไว้ในส่วนที่ (1) นั่นคือสนามแม่เหล็กวิกฤตจะมีค่าเป็น 40 a.u. และถ้าให้สนามที่มากกว่า 40 a.u. แล้วเส้นกราฟ  $V_{sc}-B$  จะไม่ย้อนกลับเส้นเดิมแสดงให้เห็นว่า มีการแพร่ของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในชั้นสาร ซึ่งค่าสนามจาก 0 ถึง 40 a.u. หรือ 3.2mT นี้กำหนดให้เป็นช่วงสนามแม่เหล็ก ในการใช้งานที่ขนาดสนามต่ำ ที่หัววัดสนามแม่เหล็กสามารถแสดงค่าสนามได้อย่างถูกต้อง โดยไม่มีผลของฮิสเทอรีซิส จากนั้นเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กไปยังค่าสนามที่มากกว่าสนามวิกฤต  $H_c$  ในที่นี้คือ  $B_{MAX}$  เป็น 250 a.u.(1) จะมีความชันลดลงหรือเริ่มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ซึ่งเมื่อลดสนามลงเส้นกราฟจะไม่ย้อนกลับดังแสดงในส่วนที่ (2) แรงดันจะต่ำกว่าแรงดันในขณะที่เพิ่มสนาม ซึ่งแสดงว่าปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่สนามค่าเดียวกัน ในขณะที่เพิ่มสนามจะมีค่าสูงกว่า ในขณะที่ลดสนามเป็นผลที่ทำให้ส่วนที่เชื่อมกันอย่างอ่อน ภายในชั้นสารถูกสร้างขึ้นมาได้อีกครั้งเป็นบางส่วน เมื่อสนามได้ลดลงจนกระทั่งถึงสนามบวกค่าหนึ่ง แรงดันจะกลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังกราฟในส่วนที่ (3) และที่สนามเป็นศูนย์จะยังคงมีเส้นแรงขั้วเหนือค้างอยู่ หรือเรียกว่าปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก ทำให้มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารสูงกว่า ในขณะที่ปราศจากการจำสภาพแม่เหล็ก จากนั้นเมื่อลดสนามจากนี้ เครื่องหมายจะเปลี่ยนเป็นลบจนกระทั่งถึงค่าสนาม  $-B_{MAX}$  นั่นคืออาจกล่าวได้ว่า ส่วนที่ (3) นี้จะเป็นการสร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อเกิดการจำสภาพในขั้วได้ สำหรับ ถ้าอธิบายกราฟในส่วนที่ (4) และ (5) จะเป็นในลักษณะเดียวกับคำอธิบายของขั้วเหนือ คือกราฟในส่วนที่ (2) และ (3) ที่ได้กล่าวไปแล้ว

การวัดปริมาณกระแสแสดงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชั้นสารและสนามแม่เหล็ก ดังในรูปที่ 30 เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มจากศูนย์ไปยังค่าสนาม  $B_{MAX}$  เท่ากับ 400 a.u. (ดูจากกราฟ) ที่กำหนดไว้คงที่ ในชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ทำให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก จะสามารถหาได้โดยตรงจากการให้สนามแม่เหล็กขั้วตรงข้ามกับที่จำอยู่ เพื่อเป็นการชดเชยสนามที่จำอยู่ภายในชั้นสาร ซึ่งขณะที่ชั้นสารมีการชดเชยเกิดขึ้นจะสังเกตเห็นว่า จุดต่ำสุดของกราฟจะย้ายเข้ามาใกล้กับค่าสนามที่เป็นศูนย์มากขึ้น แสดงว่าชั้นสารหลังจากได้ชดเชยด้วยสนามขั้วตรงข้ามค่านั้น แล้วจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กค้างอยู่ภายในชั้นสารลดน้อยลง ซึ่งอาจพิจารณาได้จากค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารที่มีการจำสภาพแม่เหล็กใน ขณะที่ปราศจากสนามภายนอก จะต่ำลงเข้าใกล้กับในสภาวะเริ่มต้นมากขึ้นด้วย และเมื่อการชดเชยสนามที่จำอยู่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว จะสังเกตเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสาร ในขณะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีค่าต่ำที่สุด โดยจะมีขนาดใกล้เคียงกับค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสาร ที่ไม่มี

การจำสภาพแม่เหล็กในสถานะเริ่มต้น ซึ่งจะพิจารณาได้ว่าปริมาณกระแสที่ทำให้ค่าสนามดังกล่าวก่อให้เกิดมีการชดเชยการจำสภาพแม่เหล็กภายในชิ้นสารพอลิ จะมีค่าเทียบเท่ากับปริมาณกระแสสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เกิดจากการป้อนสนาม  $B_{MAX}$  ซึ่งจากกราฟจะมีค่าเป็น 150 a.u. คำนั้นๆ ถ้าหากมีการชดเชยด้วยสนามชั่วตรงข้ามที่มากเกินปริมาณดังกล่าว แล้วจะส่งผลให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็กในชั่วตรงข้ามกับที่จำอยู่เดิม ทำให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสาร ขณะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กสูงขึ้น มากกว่าขณะที่มีการชดเชยสนามที่จำอยู่อย่างสมบูรณ์

### คุณสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบไอโซโทรปิก<sup>[2]</sup>

โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสนามแม่เหล็กมักจะใช้หลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าหรือปรากฏการณ์ของฮอลล์ ซึ่งผลของสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารในทิศตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแส

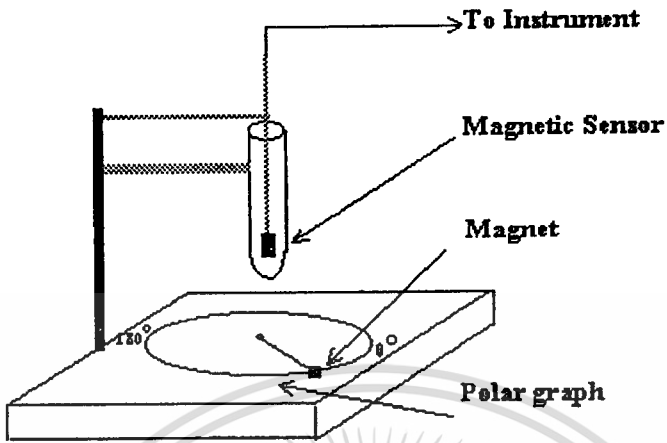
เป็นที่ทราบกันว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตจะมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั่นคือ เมื่อให้กระแสผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่าน้อยๆ จะไม่เกิดค่าแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นๆ แต่ถ้าเราให้กระแสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะกระทั้งมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนั้นๆ ก็จะเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนสูญเสียสภาพนี้ นอกจากการเพิ่มปริมาณกระแสให้กับชิ้นสารแล้ว ยังสามารถจะทำได้โดยการให้สนามแม่เหล็กปริมาณมากพอกระทำชิ้นสารในขณะที่ให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร โดยที่ไม่คำนึงถึงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่มากกระทำกับชิ้นสารนั้นๆ

### การทดลอง และผลการทดลอง

การทดลองวัดผล ของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ทิศทางต่างๆ ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์ และแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

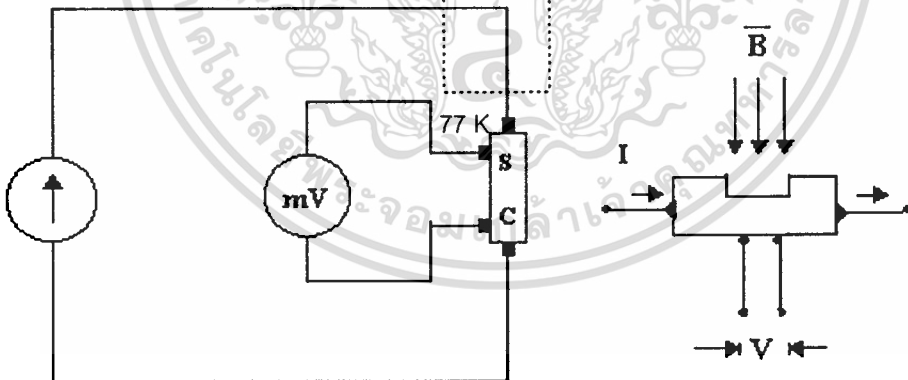
#### 1) วิธีทดลอง

- นำหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์มาติดตั้ง กับชุดทดลองวัดการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กกับทิศทาง ดังรูปที่ 31
- เลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้ามาใกล้หัววัดจนกระทั่งอ่านได้ 100 G
- หมุนแท่งแม่เหล็กรอบหัววัดจาก  $0^\circ$ - $360^\circ$  โดยรักษาระยะห่างจากหัววัดคงที่ บันทึกผล
- ทำการทดลองในข้อที่ 3 ซ้ำ โดยเปลี่ยนขนาดสนามแม่เหล็กเป็น 200 G และ 300 G ตามลำดับ



รูปที่ 31 ชุดทดลองวัดการตอบสนองของหัววัดกับทิศทาง

5. เปลี่ยนหัววัดจากแบบฮอลล์เป็นแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังรูปที่ 32 โดยให้กระแสแสดงที่เป็น 300 mA แล้วทำการทดลองซ้ำ ข้อ 3 และ 4 และขนาดสนามแม่เหล็กเป็น 4, 5, 10, 20 และ 40 G ตามลำดับบันทึกผล

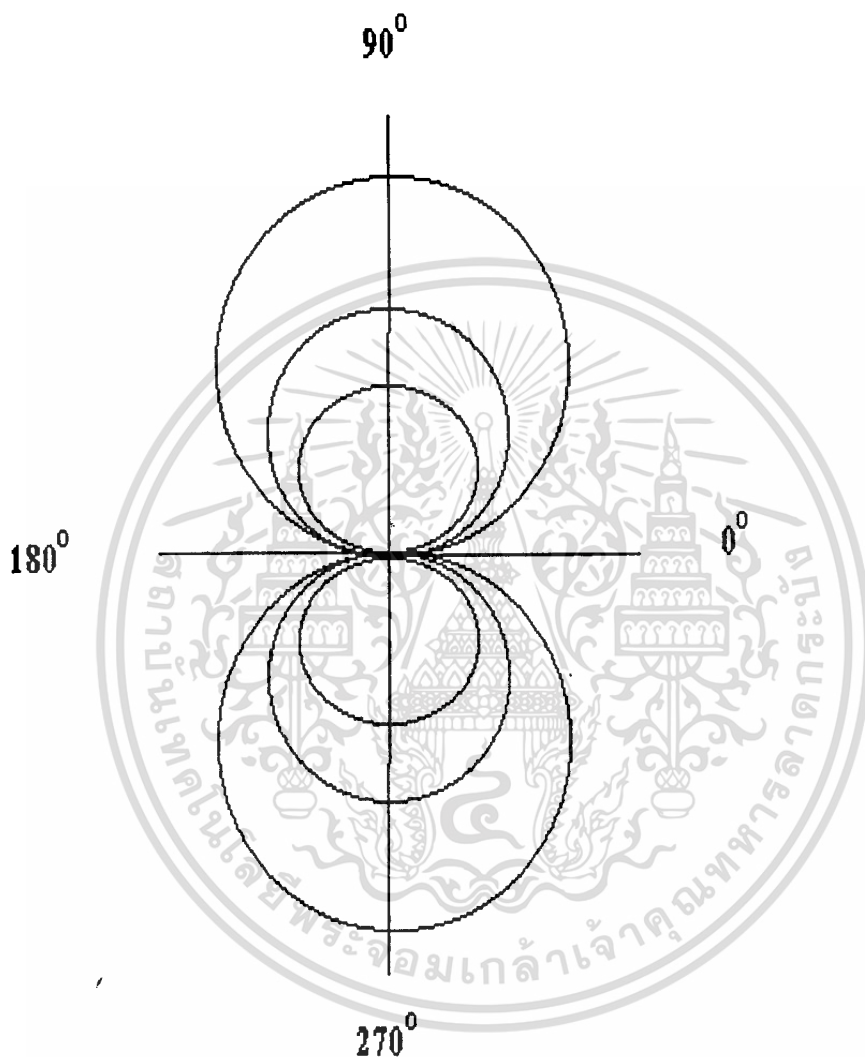


รูปที่ 32 วงจรไบอัสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และรูปร่างชิ้นสารที่ใช้ทดลอง

6. เขียนกราฟเชิงขั้วระหว่างความเข้มของสนามที่วัดได้กับมุมของสนาม แล้วเปรียบเทียบผล
7. เปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆที่กระทำกับหัววัดแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด วัดค่าแรงดันเออร์ท์พท์ที่เกิดจากหัววัดสนามแม่เหล็กแล้วบันทึกผล

## 2) ผลการทดลอง

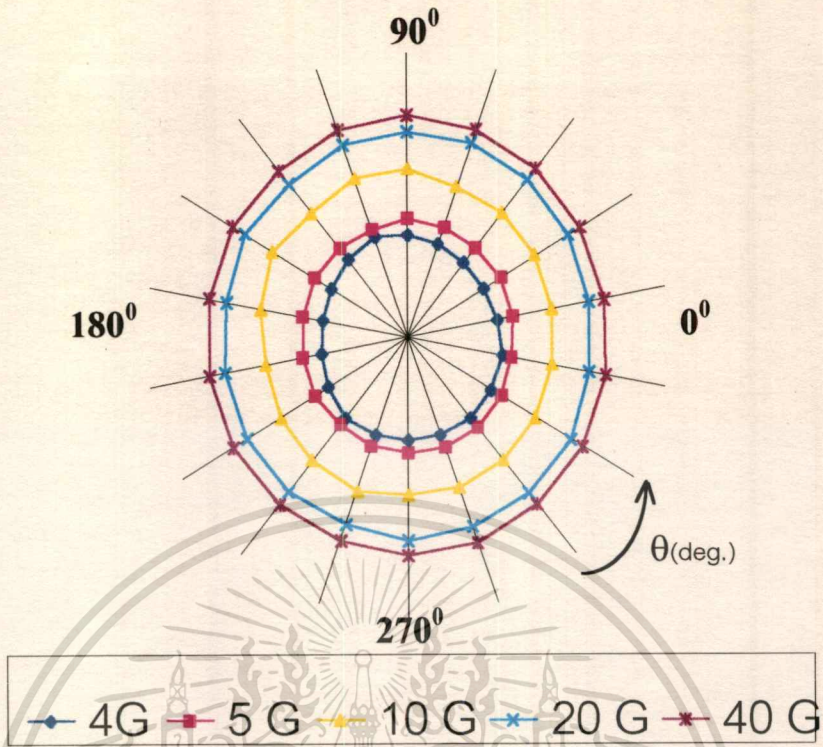
จากการทดลองวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ในทิศทางต่างๆของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์ สามารถนำมาเขียนกราฟเชิงขั้วดังแสดงในรูปที่ 33



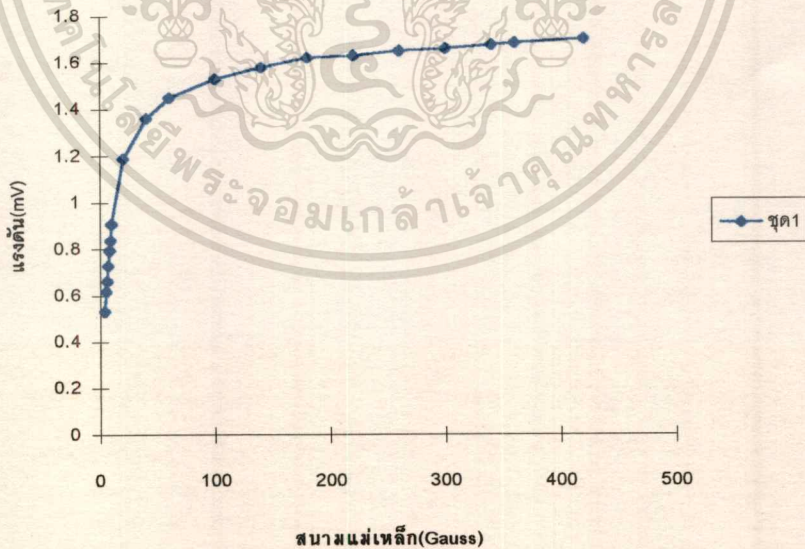
รูปที่ 33 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าสนามแม่เหล็ก ที่อ่านได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์กับมุม ของสนามแม่เหล็กที่มากระทำ

จากการทดลองวัดผลของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆของหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนำมาเขียนกราฟเชิงขั้วดังแสดงในรูปที่ 33 และผลของการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็ก ชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขนาดสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ สามารถนำมาเขียนกราฟดังในรูปที่ 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 กราฟเชิงขั้วแสดงแรงดันที่อ่านได้จากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากกระทำ



รูปที่ 35 กราฟระหว่างแรงดันจากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กับสนามแม่เหล็ก จากแม่เหล็กถาวรขนาดต่างๆกัน

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 33 แสดงผลตอบสนองของหัววัดแบบฮอลล์ที่สนามแม่เหล็ก ความเข้มเท่ากัน กระทำในทิศต่างๆพบว่าค่าของสนามที่วัดได้จะมีค่าสูงสุดในทิศตั้งฉาก กับ ระนาบการไหลของกระแส คือ ที่มุม  $90^{\circ}$  และ  $270^{\circ}$  แต่ในทิศเดียวกับระนาบการไหลของกระแส คือที่มุม  $0^{\circ}$  และ  $180^{\circ}$  ค่าของสนามที่วัดได้จะมีค่าต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 34 แสดงผลตอบสนองของหัววัดแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่มี สนามแม่เหล็กความเข้มเท่ากันกระทำในทิศต่างๆกัน พบว่าเป็นกราฟวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่จุด กำเนิด แสดงว่าค่าของสนามที่วัดด้วยหัววัดชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะมีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง

เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 35 แสดงผลตอบสนองของหัววัดแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต่อ สนามแม่เหล็กความเข้มต่างๆที่มุมใด ๆ พบว่าการตอบสนองจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยจะมีความ ไวสูงที่ค่าสนามแม่เหล็กต่ำๆ และความไวจะค่อยๆลดลงที่ค่าสนามแม่เหล็กสูงขึ้น โดยความไว ของหัววัดจะได้จากความชันของเส้นกราฟในรูปที่ 35

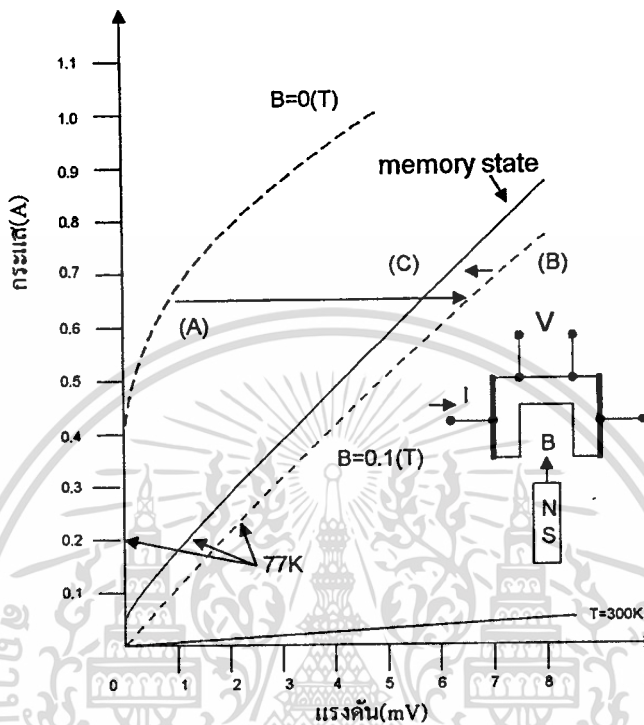
### เงื่อนไขของการเกิดปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก

เป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นมีคุณสมบัติในการตรวจจับสนาม แม่เหล็กภายนอกที่มีค่าต่ำ ๆ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ที่สนามแม่เหล็กค่าสูง ๆ จะทำให้ตัวนำไฟฟ้า ยิ่งยวดนั้นเกิดสภาพแม่เหล็กปรมาณน้อย ๆ ที่ตกค้างอยู่ในตัวมันด้วย หรือเรียกว่าปรากฏการณ์ การจำ จากการเสนอการค้นพบปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ อุณหภูมิต่ำ ทางกลุ่มวิจัยจึงได้ทำการพัฒนาเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กความไวสูง สำหรับการศึกษ ที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขในการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะได้นำเสนอต่อไป

### การทดลอง และผลการทดลอง

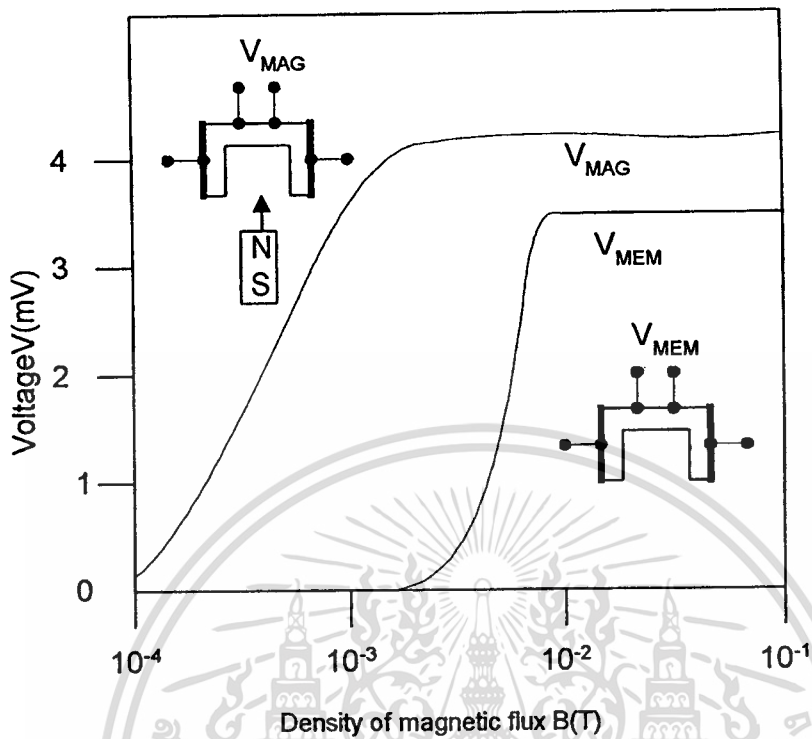
เมื่อให้กระแสกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ หรือมีความ ด้านทานเป็นศูนย์ จนกระทั่งกระแสเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต แรงดันตกคร่อมจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่าง เป็นสัดส่วนกับกระแส หรือปรากฏการณ์ฮิลสปี ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นผลของสนามแม่เหล็กเนื่อง มาจากกระแสที่มีค่ามากกว่ากระแสวิกฤตและกราฟคุณสมบัติกระแส-แรงดัน สามารถย้อนกลับได้ อย่างไรก็ดีตามสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าต่ำๆก็สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้หรือ กระแสวิกฤตจะมีค่าต่ำลงจากเดิม และเมื่อลดสนามแม่เหล็กลง กระแสวิกฤตจะกลับเพิ่มขึ้นมาเท่า กับก่อนให้สนามในขณะที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ หรือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

กระแสกับแรงดันตกคร่อมชั้นสารสามารถย้อนกลับได้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้



รูปที่ 36 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เส้นประ (A) และเส้น (C) ได้โดยปราศจากสนามแม่เหล็ก เส้น (B) ได้มาโดยมีสนามแม่เหล็กภายนอกที่ซึ่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B เป็น 0.1T เส้น (B) กลายเป็นอยู่ใกล้เส้น (C) หลังจากการนำเอาสนามแม่เหล็กออกไป เส้น (C) บ่งชี้ถึงสถานะจำ รูปภาพที่แทรกอยู่แสดงวิธีการให้สนามแม่เหล็กภายนอก

แต่เมื่อพิจารณาที่สนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้มามีค่าเกินกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต จากรูปที่ 36 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สำหรับปรากฏการณ์จำสภาพแม่เหล็กจะได้ค่ากระแสวิกฤตที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ก่อนให้สนาม (กระแสวิกฤตสถานะเริ่มต้น; เส้น(A)) จะสูงกว่าหลังจากให้สนาม (กระแสวิกฤตจำ; เส้น C) หรืออาจกล่าวได้ว่า กระแสวิกฤตจำจะมีค่าต่ำลงอย่างมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าสนามที่สูงกว่าค่าวิกฤตจะก่อให้เกิดการจำสนามแม่เหล็กภายในชั้นสาร ทำให้การนำกระแseyิ่งยวดเป็นไปได้ลำบากขึ้น นั่นคือ กระแสวิกฤตจำจะมีค่าลดลงเนื่องจากเนื้อสารนำไฟฟ้ายิ่งยวดส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ นำกระแseyิ่งยวดเพื่อรักษาเส้นแรงแม่เหล็กภายใน ชั้นสารให้คงที่ในสภาวะจำ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับสนามที่ให้



รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อม  $V$  กับเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  ที่จ่ายให้ภายนอกที่ 77 K สัญลักษณ์  $V_{MAG}$  กับ  $V_{MEM}$  ถูกกำหนดไว้ในรูปที่แนบมาให้ กราฟของ  $V_{MAG}$  กับ  $B$  ได้มาโดยมีสนามแม่เหล็กภายนอก กราฟของ  $V_{MEM}$  กับ  $B$  ถูกวัดหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไป ในช่วงกว้างของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  T แรงดันตกคร่อมกลายเป็นศูนย์หลังจากที่นำเอาสนามแม่เหล็กออก นั่นคือ ปรากฏการณ์การจำไม่เกิดขึ้น

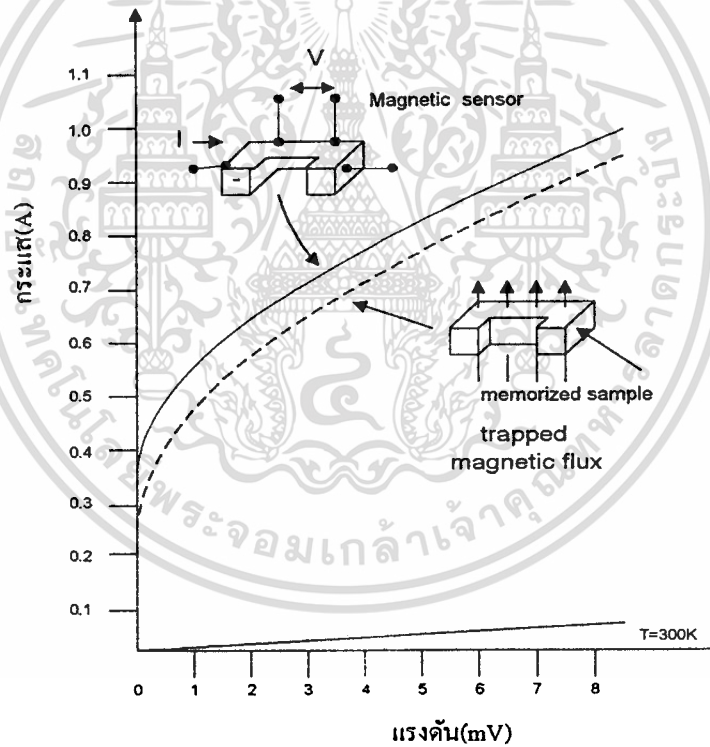
เมื่อพิจารณา รูปที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมขึ้นสสารกับสนามแม่เหล็ก เปรียบเทียบในขณะที่ให้สนามขนาดต่างๆ และขณะที่นำสนามนั้นออก พบว่าที่สนามแม่เหล็กระหว่าง  $10^{-4}$  T ถึง  $2 \times 10^{-3}$  T แรงดันตกคร่อม  $V_{MAG}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็ก แต่  $V_{MEM}$  ยังคงเป็นศูนย์ และที่สนามระหว่าง  $2 \times 10^{-3}$  T ถึง  $10^{-2}$  T แรงดัน  $V_{MAG}$  จะเปลี่ยนแปลงช้าลงแต่  $V_{MEM}$  กับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งสนามที่ให้มากกว่า  $10^{-2}$  T แรงดัน  $V_{MAG}$  จะเปลี่ยนแปลงกับสนามน้อยมากและ  $V_{MEM}$  ก็เช่นเดียวกันแต่ขนาดจะต่ำกว่า  $V_{MAG}$

พฤติกรรม Hysteresis เป็นพฤติกรรมในผลึก ซึ่งมีผลต่อกระแสวิกฤต ( $I_c$ ) อย่างมาก พิสูจน์ได้ว่าที่  $I < I_c$  หรือ  $I \geq I_c$  ยังเกิด Hysteresis

ในช่วงแรกอธิบายได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็ก จะไปทำให้จุดคอดที่มีอยู่ทั้งหมดคดาจากกันโดยสมบูรณ์แต่เส้นแรงแม่เหล็ก ยังไม่สามารถทะลุเข้าไปในวงปิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด หรือจุดแทรกภายในชิ้นสารได้ และในช่วงที่สองอธิบายได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะมีขนาดแรงพอที่จะทะลุเข้าไปในจุดแทรกได้ ซึ่งจะมีปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในจุดแทรกจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก

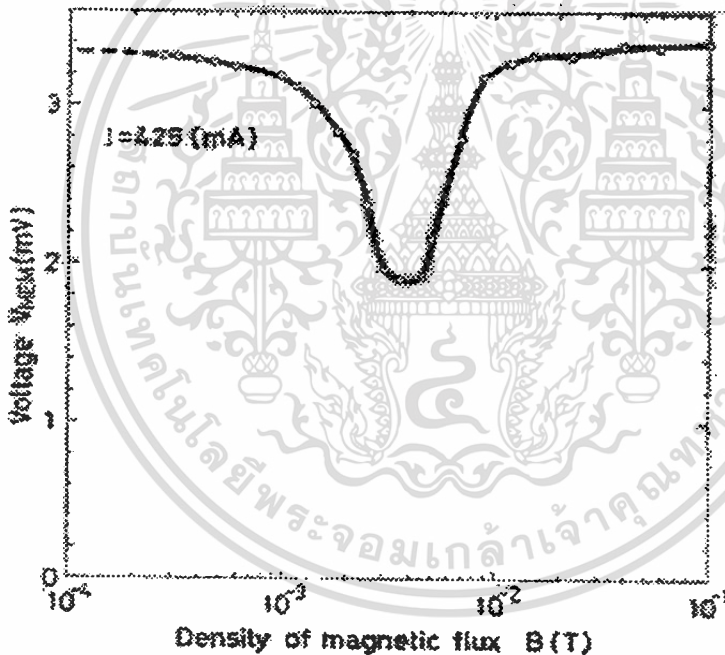
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกที่ให้อย่างมาก และความหนาแน่นของจุดแทรกในชั้นสาร และในช่วงสนามอ้อมตัวคือส่วนนำไฟฟ้าที่ยังขดไม่เปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กอีกต่อไป ซึ่งจะเป็นสภาวะที่จุดยอดทุกจุดขาดหมดโดยสมบูรณ์ และจุดแทรกได้มีเส้นแรงบรรจบอยู่เต็มทุกจุด หรืออีกนัยหนึ่งความต้านทานชั้นสารจะเป็นความต้านทานของตัวนำปกติ จะคงที่ไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กในชั้นสารสามารถตรวจสอบได้โดย หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด ดังได้แสดงในรูปที่ 38 ในการทดลองวัดสนามจำในชั้นสารกราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสแสดกับแรงดันจะเปลี่ยนแปลงโดยกระแสวิกฤต ขณะที่ทำการวัดสนามแม่เหล็กจากชั้นสารจะลดลงจากที่ปราศจากสนามภายนอก 350 mA ไปเป็น 280 mA จะเห็นได้ว่าหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดมีความไวพอเพียงที่ใช้ตรวจจับเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกแทรกภายในชั้นสาร ซึ่งแนวความคิดนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นระบบเก็บและอ่านความจำแบบแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด



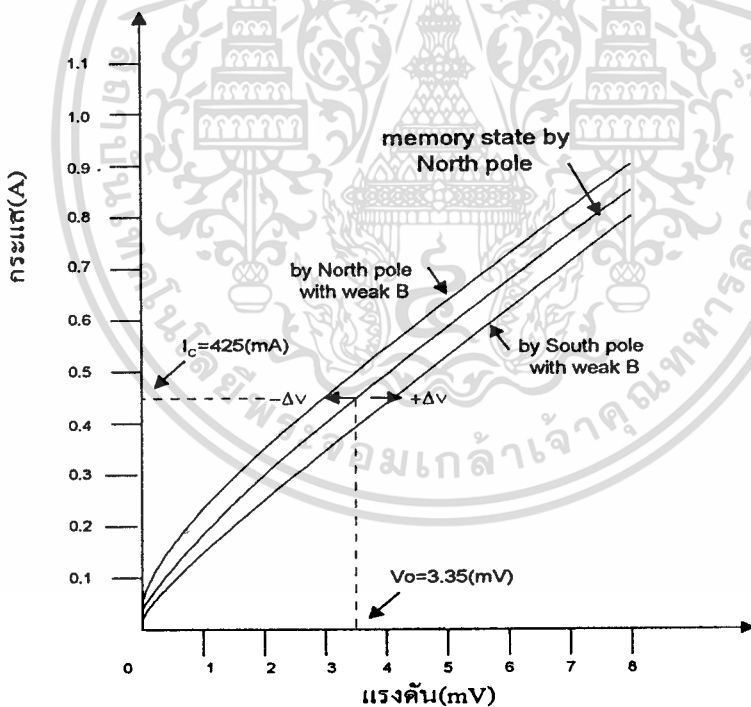
รูปที่ 38 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวอย่างตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด ซึ่งใช้เป็นหัววัดเส้นแรงแม่เหล็กเส้นที่บัพพันรัศกับกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก เส้นประได้มาภายใต้เงื่อนไขที่แสดงโดยรูปที่แทรกไว้ การเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ซึ่งให้เห็นถึงการมีเส้นแรงแม่เหล็กถูกแทรกไว้ในชั้นสารที่ถูกทำให้จำ อุณหภูมิรอบๆเป็น 77 K

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของการจำกัดสนามขั้วตรงข้ามกับที่จำผลที่ได้แสดงในรูปที่ 39 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขณะที่ขึ้นสารอยู่ในสภาวะจำที่กระแสดังที่ค่าหนึ่ง กับสนามที่มีขั้วตรงข้ามขนาดต่างๆกัน พบว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กขั้วตรงข้าม ค่าน้อยๆ แรงดันขณะจำโดยปราศจากสนามภายนอกจะลดลงอย่างช้าๆ และลดลงมากขึ้นเมื่อมีขนาดสนามมากขึ้นจนกระทั่งสนามภายนอกมีค่าถึง  $4 \times 10^3$  T แรงดันจำจะลดลงต่ำสุด และเมื่อให้สนามภายนอกมีค่ามากกว่านี้แรงดันจำจะกลับสูงขึ้นจนมีค่าเกือบจะคงที่ที่สนามสูงๆจากการทดลองจะเห็นได้ว่า ขั้วของสนามที่จำในชั้นสารจะสามารถสังเกตได้จากแรงดันจำซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันจำของทั้งสองขั้วจะสมมาตรกัน ต่อไปจะกล่าวถึงชั้นสารอยู่ในสภาวะจำขณะที่สนามแม่เหล็กอ่อนมากระทำ



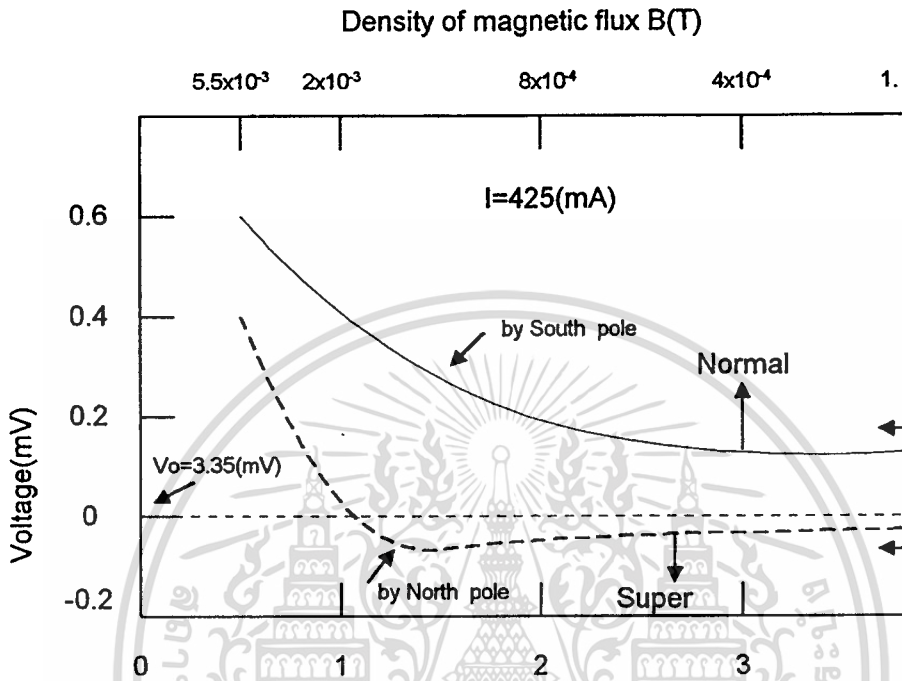
รูปที่ 39 แรงดัน  $V_{MEM}$  ตกรวมชั้นสารที่ถูกทำให้จำกัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้ B ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้มีทิศตรงข้ามกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกแทรกไว้ไนชั้นสารตัวอย่างที่ถูกทำให้จำ ความจำถูกลบโดยเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้ที่ต่ำกว่า  $4 \times 10^3$  T อีกนัยหนึ่ง แรงดันตกรวมเพิ่มขึ้นอีกเนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายให้เป็นสาเหตุของปรากฏการณ์การจำในช่วงที่มากกว่า  $4 \times 10^3$  T อุณหภูมิแวดล้อมเป็น 77 K

สำหรับการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กขนาดอ่อนๆที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นสารที่อยู่ในสภาวะจำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 40 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กที่ให้จำ  $0.1T$  ขณะอยู่ในสภาวะจำชั่วคราวโดยปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอก เปรียบเทียบกันในขณะที่มีสนามแม่เหล็กอ่อนๆทั้งชั่วคราวและจำได้ พบว่าที่กระแสไบอัสคงที่ค่าหนึ่งประมาณค่ากระแสวิกฤตเดิมในสภาวะก่อนการจำกันเมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราว แรงดันตกคร่อมชั้นสารจะมีค่าลดลง แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนจำได้ แรงดันตกคร่อมชั้นสารจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าชั้นสารถูกทำให้จำด้วยสนามแม่เหล็กชั่วคราวเมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราว แรงดันตกคร่อมชั้นสารจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนจำได้ แรงดันตกคร่อมชั้นสารจะมีค่าลดลง นั่นคือถ้าให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวตรงข้ามกับที่จำอยู่แรงดันตกคร่อมชั้นสารจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็วิธส และหากให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวเดียวกับที่จำอยู่แรงดันตกคร่อมชั้นสารจะมีค่าลดลง ต่อไปจะได้ศึกษาถึงผลของขนาดสนามแม่เหล็กอ่อนที่มีต่อการจำแนกชั่วคราวของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 40 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวอย่างที่ทำให้จำโดยชั่วคราวซึ่งมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น  $0.1 T$  เส้นกลางแสดงกรณีที่ปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อให้สนามอ่อนๆชั่วคราวเข้ามาใกล้กับตัวอย่างที่มีกรจำแรงดันตกคร่อมจะลดลงในกรณีของชั่วคราวแรงดันตก

คร่อมจะเพิ่มขึ้นสัญลักษณ์  $+\Delta V$  และ  $-\Delta V$  หมายถึงการเพิ่มและลดลงของแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร โดยลำดับ

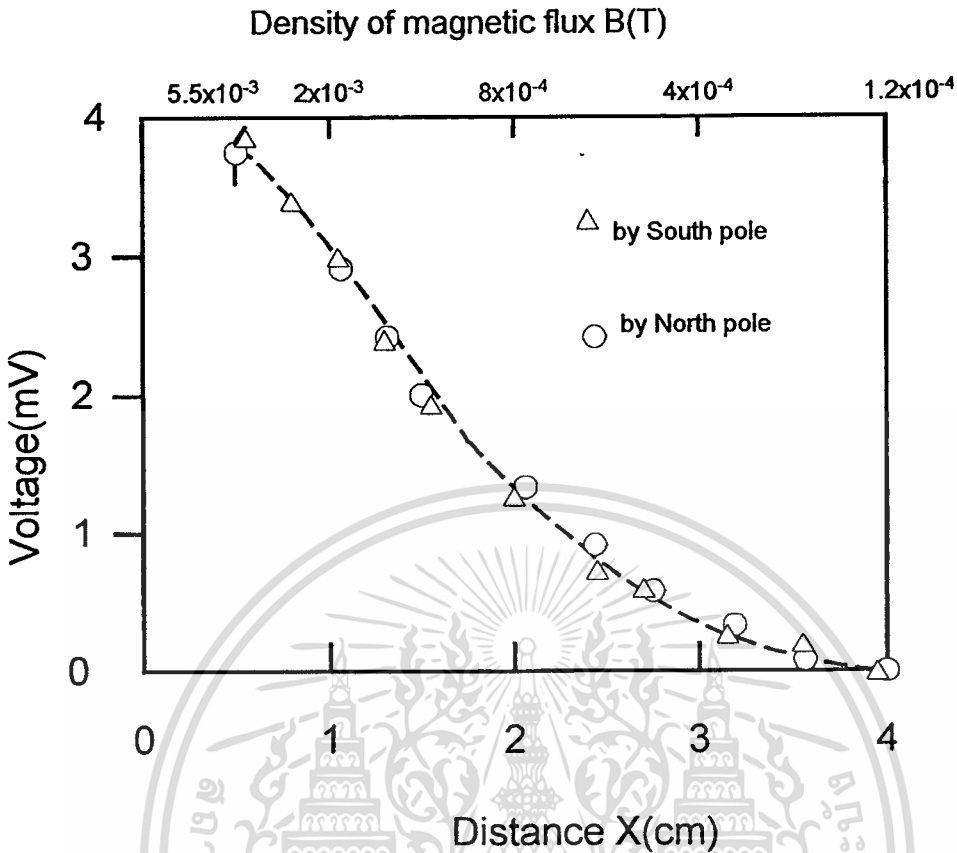


รูปที่ 41 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมชิ้นสารถูกทำให้จำโดยขั้วเหนือ กับระยะห่างระหว่างชิ้นสารตัวอย่างกับขั้วแม่เหล็ก ในบริเวณที่ระยะห่างมากกว่า 1 เซนติเมตร ผลของขั้วทั้งสองตรงข้ามกันและแกนนอนบนแสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่สอดคล้องกับระยะทางในแกนล่าง

ในการศึกษาผลของขนาดสนามแม่เหล็กอ่อนที่มีต่อการจำแนกขั้วของสนามแม่เหล็ก ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จำสนามแม่เหล็ก ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 41 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน กับระยะทางระหว่างชิ้นสารตัวอย่างและขั้วแม่เหล็ก โดยเทียบกับขนาดของสนามแม่เหล็กทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ ที่แกนนอนด้านบนที่กระแสไอสเป็น 425 mA (กระแสวิกฤต) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จำขั้วเหนือพบว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนขนาดตั้งแต่  $1.2 \times 10^{-4} \text{ T}$  จนถึง  $2 \times 10^{-3} \text{ T}$  ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จำขั้วเหนือ สามารถจำแนกขั้วของสนามแม่เหล็กที่มากกระทำได้ โดยดูจากเครื่องหมายเปรียบเทียบกับแรงดันในสภาวะจำขั้วเหนือขณะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอก หากว่าเครื่องหมายเป็นบวก หมายถึงการเสียดทานนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากสนามแม่เหล็กอ่อนที่มากกระทำเป็นขั้วตรงกันข้ามกับขั้วของสนามแม่เหล็กที่จำอยู่ในที่นี้คือขั้วใต้ และหากมีเครื่องหมายเป็นลบจะหมายถึงมีการกลับคืนสู่

สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพิ่มขึ้น จึงทำให้แรงดันลดลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กอ่อนที่มักกระทำเป็น  
 ขั้วเดียวกัน กับขั้วของสนามที่จำอยู่ซึ่งในที่นี้คือขั้วเหนือ อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าที่  
 สนามแม่เหล็กสูงกว่า  $2 \times 10^{-3} \text{T}$  ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่สามารถแยกขั้วของสนามแม่เหล็กที่มักกระทำ  
 ทำได้ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมชั้นสาร จะเป็นเครื่องหมายบวกเพียงอย่าง  
 เดียว และไม่เปลี่ยนเครื่องหมาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขั้วของสนามที่มักกระทำ ซึ่งอธิบายได้ว่าที่  
 สนามแม่เหล็กอ่อนๆในที่นี้คือมีค่าน้อยกว่า  $2 \times 10^{-3} \text{T}$  สามารถใช้บ่งบอกขั้วของสนามภายนอก ที่  
 สัมพันธ์กับขั้วของสนามที่จำได้จาก เครื่องหมายของการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ทั้งนี้เป็นเพราะ  
 ขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอก นั้นมีค่าอยู่ในระดับที่สามารถเสริมหรือหักล้างโดยสนามที่จำอยู่  
 ในชั้นสารได้ หากสนามแม่เหล็กภายนอกขั้วเดียวกันที่เข้มมาก ในที่นี้คือมีค่าสูงกว่า  $2 \times 10^{-3} \text{T}$  ซึ่ง  
 เป็นสนามที่ใช้หักล้างพอดี จะทำให้เกิดเส้นแรงของสนามขั้วเหนือค้ำอยู่ในปริมาณมากขึ้น ทำให้  
 การเปลี่ยนแปลงแรงดันของทั้งสองขั้วมีเครื่องหมายเดียวกัน นั่นคือขอบเขตของการใช้งานในการ  
 จำแนกขั้วของสนามแม่เหล็กมีขนาดจำกัด ขึ้นอยู่กับขนาดของสนามแม่เหล็กที่จำอยู่ภายในชั้นสาร  
 ต่อไป จะได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมชั้นสารที่  
 ปราศจาก การจำสภาพแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกัน ทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้

เมื่อให้สนามแม่เหล็กที่มีขั้วแตกต่างกันแก่ชั้นสาร ที่ปราศจากการจำสภาพแม่เหล็กมี  
 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป จะแสดงได้ดังรูปที่ 42 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง  
 ดันตกคร่อมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กับระยะห่างระหว่างชั้นสารตัวอย่างกับแม่เหล็กโดยมีค่า  
 สนามแม่เหล็ก ที่ระยะห่างนั้นๆระบุที่แน่นอนด้านบน พบว่าแรงดันตกคร่อมชั้นสาร จะมีการตอบ  
 สสนองต่อสนามแม่เหล็กเหมือนกันทั้งสองขั้ว โดยจะมีแรงดันที่มากกว่าในสภาวะที่มีการจำสภาพ  
 แม่เหล็กในรูปที่ 41 จึงอาจกล่าวได้ว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะให้แรงดันตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก  
 โดยไม่คำนึงถึงขั้วของสนามแม่เหล็กที่มักกระทำ หรือจะมีแรงดันตอบสนองที่สัมพันธ์กับขนาด  
 ของสนามแม่เหล็กเท่านั้น



รูปที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้จำสภาพแม่เหล็ก กับระยะห่างระหว่างชิ้นสารตัวอย่าง และแม่เหล็กแกนอนด้านบนแสดงความหนาแน่น ของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งสัมพันธ์กับระยะห่างโดยเปรียบเทียบทั้งชั่วเหนือชั่วได้

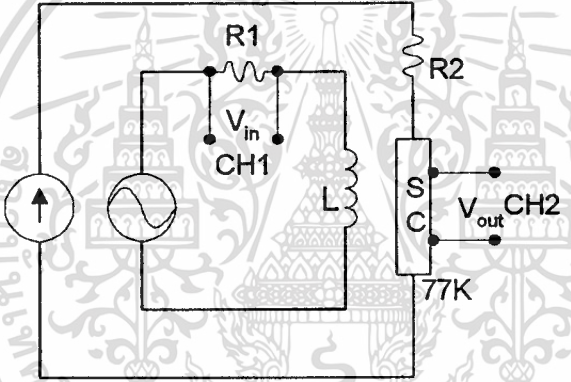
### ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์ไฟ

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุท ที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ กับแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมชิ้นสารที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ในบทที่ 2 จะเห็นว่า แรงดันเอาต์พุตจะมีการตอบสนองแบบฟูลเวฟเรกติไฟ ซึ่งเป็นการตอบสนองในช่วงสนามแม่เหล็กที่ต่ำกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต<sup>[5]</sup> อย่างไรก็ตามถ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาว ได้รับสนามแม่เหล็กคงที่จากภายนอกในปริมาณที่สูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตแล้ว การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่ได้ จะแตกต่างจากการตอบสนองแบบฟูลเวฟเรกติไฟ ซึ่งจะได้อธิบายต่อไปในหัวข้อนี้

### การทดลอง และผลการทดลอง

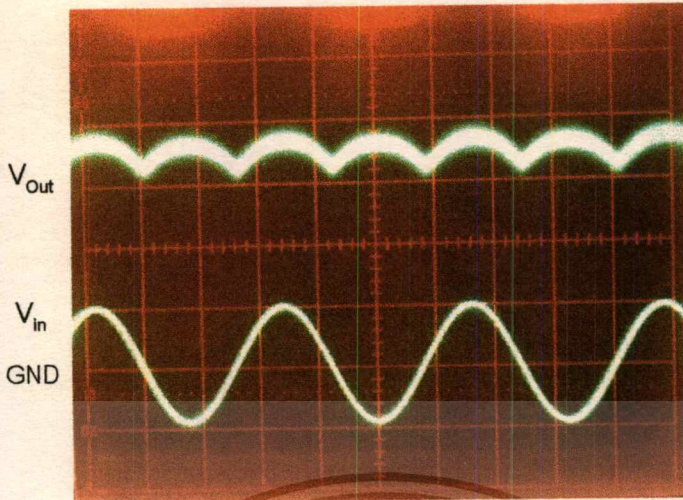
ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการศึกษาการตอบสนองค่าสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาด ที่มีของการจำสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาขนาดมากกว่ากระแสวิกฤตเล็กน้อยคือประมาณ 230 mA สามารถทำได้โดยใช้วงจรดังรูปที่ 43 สำหรับตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาดจะถูกไบอัสด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสตรง จากแหล่งจ่ายกระแสตรงที่และเอาต์พุทของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต่อเข้ากับ CH1 ของ ออสซิลโลสโคป ส่วนแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะใช้เครื่องกำเนิดความถี่รูป ไซน์ที่ปรับระดับแรงดันออฟเซตได้ง่ายสนามผ่าน ขดลวดเหนี่ยวนำ L ขนาด ประมาณ 30  $\mu\text{H}$  ซึ่ง สามารถให้สนามแม่เหล็กซึ่งสามารถให้สนามแม่เหล็กในอัตราประมาณ 10 mT ต่อกระแสที่ใช้ 100 mA โดยต่อ R 0.3  $\Omega$  เพื่อบันทึกแรงดันที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กโดยต่อเข้ากับ CH 1 ของ ออสซิลโลสโคป ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ใช้จะถูกหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว(อุณหภูมิ 77 เคลวิน) แล้วหุ้ดลองวัดการตอบสนอง ขณะที่ปราศจากการจำสภาพแม่เหล็กนั้นทำให้เกิดการจำขึ้น เพื่อ ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ฟเวฟเรกติไฟ จากนั้นถูกเปลี่ยนการจำเป็นขั้วตรงข้ามแล้วปรับสนามให้สูง และต่ำกว่า GND เพื่อดูขนาดสนามที่จำ



รูปที่ 43 วงจรทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ฟเวฟเรกติไฟ

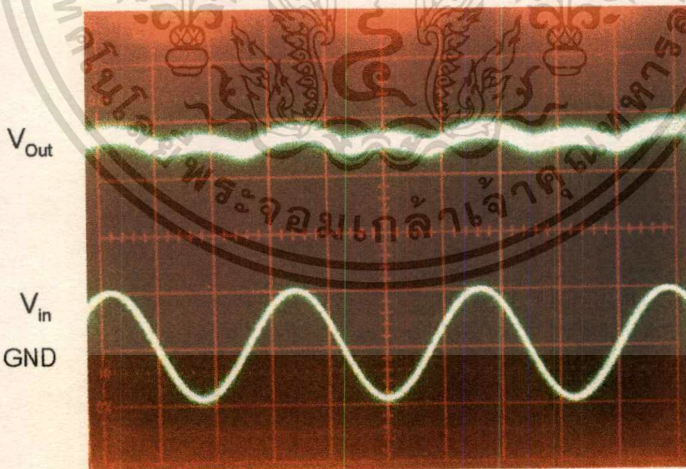
ในการทดลองเริ่มต้นและให้สัญญาณแรงดันแบบสลับขนาด 10 mV (กระแสมีค่าประมาณ 33 mA) ความถี่ขนาด 300Hz โดยให้แรงดันออฟเซต เป็นศูนย์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 44 พบว่ากราฟ ที่ได้สอดคล้องกับปรากฏการณ์ฟลวเฟเรกติไฟ ที่ได้เคยนำเสนอมาแล้ว จากนั้นใช้แม่เหล็กถาวร



Ver : 5 mV/div. Hor : 1 msec/div.

รูปที่ 44 แสดงปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟความถี่ 300 Hz  
ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไบอัสแก้ตัวนำไฟฟ้ายังขด 230 mA

ชนิด Sm-Co จำยสนามแม่เหล็กขั้วเหนือค่าสูงเพื่อที่ให้ตัวนำไฟฟ้ายังขดอยู่ในสภาวะจำ  
ปริมาณน้อยๆ แล้วนำสนามแม่เหล็กนั้นออก ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 45 พบว่ากราฟแรงดัน  
เอาท์พุทจะกลายเป็นฟูลเวฟเรกติไฟแบบไม่สมมาตรแต่มีการตอบสนองต่อสนาม



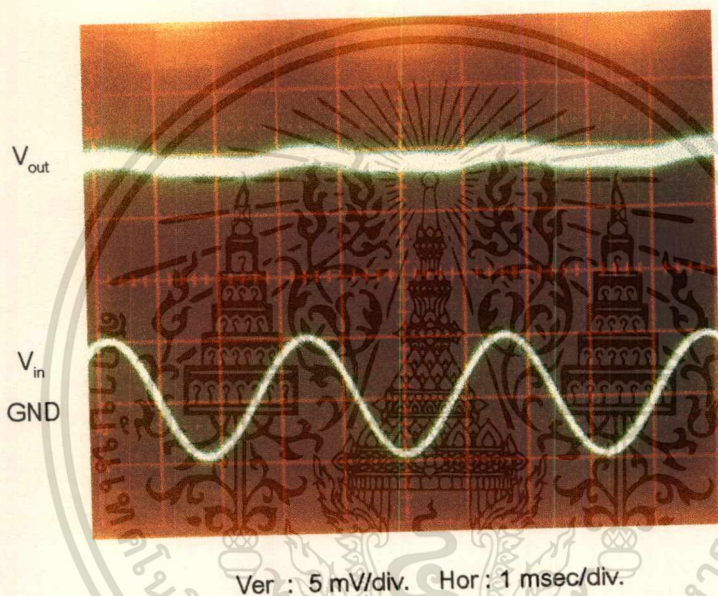
Ver : 5 mV/div Hor : 1 msec/div

รูปที่ 45 แสดงปรากฏการณ์ฟูลเวฟแบบไม่สมมาตรที่ความถี่ 300 Hz

ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไบอัส 230 mA

แม่เหล็กอินพุทซิกบวกละคาบเวลาที่กว้างกว่าซิกลบ หรือเรียกการชดเชยขั้วเหนือที่จำไว้  
เนื่องมาจากขั้วที่จำอยู่เป็นขั้วเหนือ เมื่อให้สนามซิกบวกละคาบเวลาจะมีเส้นแรงเสริม ความเข้มของสนามที่จำ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ภายในชิ้นสาร การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงเพิ่มมากขึ้นพบว่าแรงดันจิกบวคจึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันสนามจิกลบ ซึ่งเป็นขั้วได้ต้องใช้หักล้างเส้นแรงขั้วเหนือให้หมดไปก่อน แล้วส่วนที่เหลือจึงก่อให้เกิดการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่มีปริมาณน้อยกว่า สังเกตได้จากช่วงของคาบจิกลบที่สั้นลงและแรงดันที่ลดลง จากนั้นทดลองให้สนามแม่เหล็กขั้วเหนือที่แรงมากขึ้นแก่ชิ้นสาร โดยใช้แม่เหล็กถาวรเช่นเดิม เพื่อให้ชิ้นสารเกิดสภาวะการจามากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับเวลา ในสนามแม่เหล็กแบบสลับ ดังแสดงในรูปที่ 46 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นฮาล์ฟเวฟเรกติไฟ ที่มียอดคลื่นสัมพันธ์กับคลื่นจิกบวค

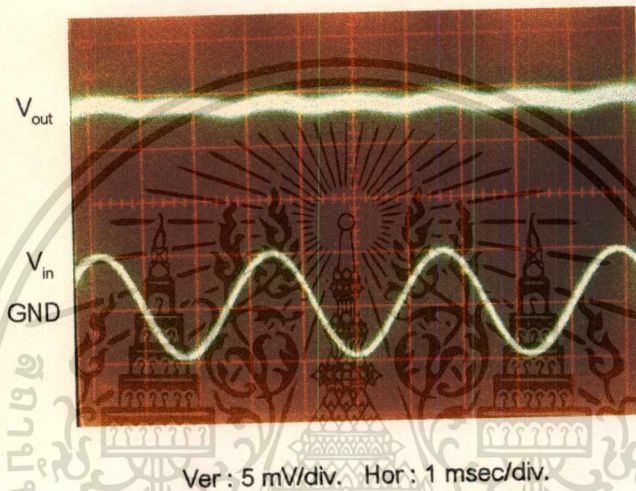


รูปที่ 46 แสดงปรากฏการณ์ฮาล์ฟเวฟเรกติไฟของชิ้นสารที่จําขั้วสนามแม่เหล็กเหนือ ในปริมาณสูง ที่ความถี่ 300 Hz ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไอส์ 230 mA

ของสนามแม่เหล็กสลับหรือขั้วเหนือ เนื่องจากสาเหตุที่ว่าในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีเส้นแรงแม่เหล็กขั้วเหนือจําอยู่ในปริมาณสูง เมื่อมีสัญญาณสนามแม่เหล็กอ่อน จิกบวคหรือขั้วเหนือ ซึ่งเป็นขั้วเดียวกันกับที่จํากระทำกับชิ้นสาร จะทำให้มีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กมากขึ้น ไฟฟ้ายิ่งยวด สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะถูกทำลายมากขึ้น จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงข้ามเมื่อให้สัญญาณสนามแม่เหล็กอ่อน จิกลบหรือขั้วใต้ซึ่งเป็นขั้วตรงข้ามกับที่จําเป็นการหักล้างเส้นแรงภายในชิ้นสารให้ลดลง ทำให้มีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายน้อยลง แต่เนื่องจากว่าปริมาณสนามแม่เหล็กขั้วใต้ไม่พอเพียง ที่จะทำให้เกิดขดคลื่นใหม่ที่เป็นผลจากขั้วใต้จึงเป็นเพียงสนามที่ จะไปชดเชยเส้นแรงแม่เหล็กขั้วเหนือ โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด แรงดันตกคร่อม

ชิ้นสารยังคงเป็นศูนย์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

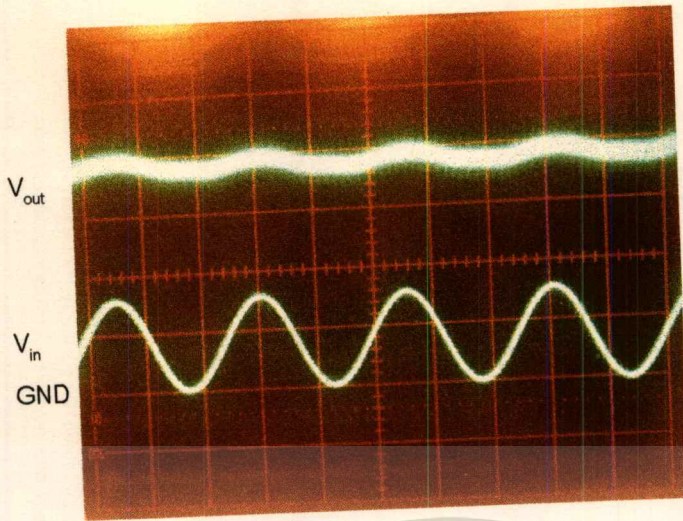
จากนี้ได้ทดลองให้สนามแม่เหล็กขั้วได้ที่ความเข้มสูงเพื่อให้เกิดการจำสนามแม่เหล็กขั้วได้ในปริมาณน้อยๆ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 47 พบว่า สัญญาณแรงดันคกคร่อมขั้วในสารที่ได้จะมี



รูปที่ 47 แสดงปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟ แบบไม่สมมาตรของขั้วในสารที่มีการจำขั้วได้ที่มีความถี่ 300 Hz ขนาดแรงดัน 10 mV และกระแสไบอัส 230 mA

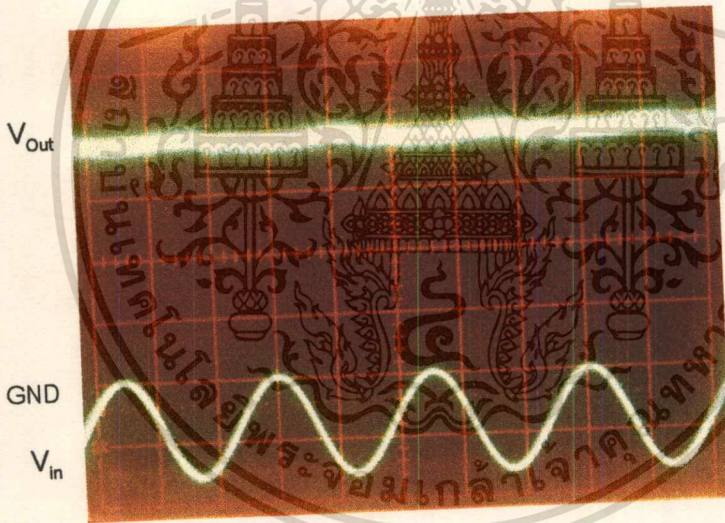
ลักษณะเป็นฟูลเวฟเรกติไฟแบบไม่สมมาตร โดยที่ยอดคลื่นของซีกลบจะมีความกว้าง ของถูกคลื่นที่มากกว่าซีกบวก เนื่องจากตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้วจำสนามไฟฟ้าขั้วได้ในปริมาณน้อยๆ เมื่อมีคลื่นสนามแม่เหล็กซีกบวก ที่เหลือมีค่าน้อยลงจึงเกิดการทำลายสภาพนำไฟฟ้าเชิงขั้วน้อยลง แรงดันไฟฟ้าคกคร่อมขั้วจึงลดลง และคาบเวลาจะมีขนาดแคบลงด้วย แต่เมื่อให้คลื่นสนามแม่เหล็กซีกลบหรือขั้วได้ซึ่งเป็นขั้วเดียวกับที่จะอยู่ มากกระทบกับขั้วในสารเส้นแรงแม่เหล็กภายในขั้วในสารจะเสริมกันมากขึ้น ทำให้เกิดการทำลายสภาพนำไฟฟ้าเชิงขั้วเพิ่มขึ้น และแรงดันไฟฟ้าคกคร่อมขั้วจึงเพิ่มขึ้น อีกทั้งคาบเวลาจะมีขนาดกว้างขึ้นด้วย

ในการทดลองต่อไปจะได้ศึกษาผลของการปรับระดับไฟตรงของสัญญาณสนามแม่เหล็กปริมาณน้อยๆ ที่มีต่อขั้วในสารที่อยู่ในสถานะจำขั้วได้ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 48



Ver : 5 mV/div. Hor : 1 msec/div.

(ก) ระดับไฟตรงของสัญญาณแม่เหล็กอินพุทเหนือกราวนด์



Ver : 5 mV/div. Hor : 1msec/div

(ข) ระดับไฟตรงของสัญญาณแม่เหล็กอินพุทที่ต่ำกว่ากราวนด์

รูปที่ 48 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของระดับไฟตรงของสัญญาณสนามแม่เหล็กอินพุท-ปริมาณน้อยๆที่มีต่อชิ้นสารในสภาวะจำขั้วได้ ที่ความถี่ 400 Hz ขนาดแรงดัน 8 mV และกระแสไบอัส 230 mA

พบว่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จำสนามแม่เหล็กขั้วได้ปริมาณน้อยๆ มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับระดับแรงดันไฟตรง ของสัญญาณแม่เหล็กสลับสูงกว่ากราวนด์ และ เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำกว่ากราวนด์ กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่จำสนามแม่เหล็กขั้วได้ในขณะที่ ระดับแรงดันไฟตรงไปเหนือกราวนด์ แรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะมีลักษณะเป็นฮาล์ฟเวฟเร็กติไฟ นั่นคือ ระดับ แรงดันไฟตรงขั้วเหนือที่ผสมอยู่กับสัญญาณแม่เหล็กจะไปชดเชยสนามขั้ว ใต้ที่ทำให้คลื่นซีกล่างบางส่วน ไม่ส่งผลให้เกิดการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายังขวดแรงดันจึงไม่เปลี่ยนแปลง จึงยังคงเหลือคลื่นซีกบนที่ทำให้เกิดการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายังขวดแรงดันซีกบนปรากฏขึ้นในทางตรงข้าม หากเปลี่ยนระดับไฟตรงลงไปต่ำกว่ากราวนด์ แรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะเข้าสู่สถานะอิมิตัว โดยจะมีแรงดันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เพิ่มแรงดันจากศูนย์จนถึงยอดค่านางของอินพุท เนื่องจากปริมาณสนามขั้วใต้ที่เข้มมากแต่ขณะที่ลดสนามลง แรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง แรงดันเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย แล้วจึงลดลงตามปกติจนค่าแรงดันเป็นศูนย์ เนื่องมาจากเมื่อสนามแม่เหล็กลดลงกระแสไดอานแม็กเนติกในวงปิดของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายังขวดไหลในทิศตรงข้ามกับทิศทางของกระแส ในขณะที่เพิ่มสนามแม่เหล็กทำให้ปริมาณเส้นแรงลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่า เนื่องจากเป็นวัสดุไดอานแม็กเนติก ซึ่งจะมีเส้นแรงแม่เหล็กที่ค้างอยู่ในวงจรปิดตัวนำไฟฟ้ายังขวดในขณะที่ลดสนามแม่เหล็กลงจึงมีน้อยกว่าปกติ



## บทที่ 4

# การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

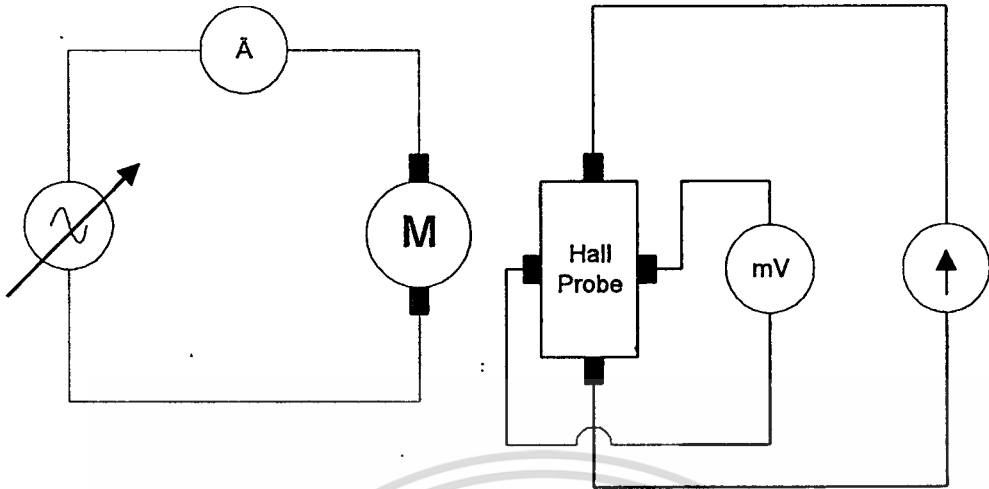
การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิด HTSC ในบทนี้ จะเป็นการนำหลักการต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอมาในบทก่อนหน้าทั้งหมดมาเป็นพื้นฐาน สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิด HTSC ต่าง ๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอเป็น 3 รูปแบบด้วยกัน ได้แก่การประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์วัดกระแสแบบไม่สัมผัส การประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำแบบนอนโวลตาไทล์ และการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจหาทิศทางของแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป

### การประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์วัดกระแสแบบไม่สัมผัส

ในการประยุกต์นี้อุปกรณ์ที่เป็นขดลวดอาทิ เช่น มอเตอร์ เมื่อมีกระแสไหลผ่าน ขดลวดของมอเตอร์จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ นั้นเมื่อเรานำหัววัดที่ทำจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ให้กระแสไบอัสพอเหมาะใกล้เคียงกับขดลวด จะพบว่ามีแรงดันตกคร่อม จินสาร์ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์แล้วจะพบว่า แรงดันที่วัดได้จากหัววัดสามารถบอกค่าปริมาณกระแสที่ไหลภายในขดลวด เมื่อเราทราบจำนวนรอบ ของอุปกรณ์นั้น ถ้าเราต้องการจะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ที่มีขดลวด เป็นส่วนประกอบก็สามารถใช้สัญญาณแรงดันของหัววัดชนิดนี้ ต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมปริมาณกระแส หรือแรงดันของอุปกรณ์ชิ้นนั้น ๆ ได้

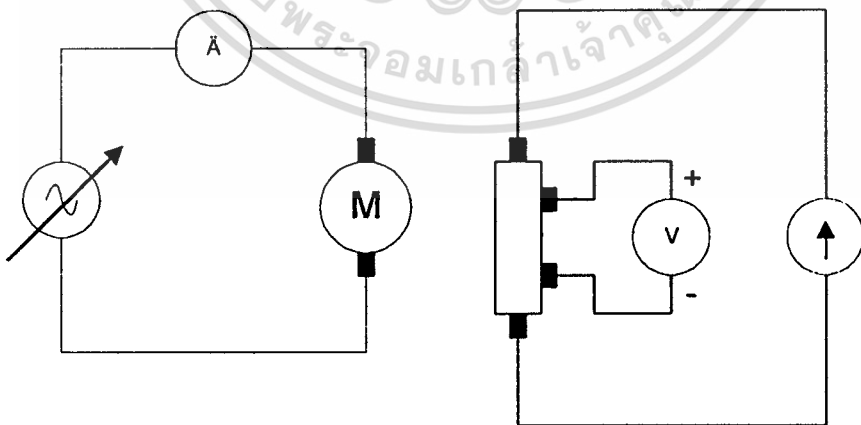
### การทดลองและผลการทดลอง

1) ตัวอย่างรูปที่ 50 โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่ปรับค่าได้เพื่อปรับกระแสค่าต่างๆ ป้อนให้อุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทขดลวด ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้มอเตอร์ และใช้หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดยอกลีในการวัดสนามจากอุปกรณ์



รูปที่ 49 วงจรที่ใช้ทดลองวัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสลัดจากมอเตอร์  
โดยใช้หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดฮอลล์ ในการวัดสนามจากอุปกรณ์

- นำหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดฮอลล์ มาติดตั้งไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กแรงที่สุด โดยให้ระนาบของหัววัดตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กที่จะวัด จากนั้นให้ปรับค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสค่าต่างๆ ตามต้องการ แล้ววัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น บันทึกผล
- เปลี่ยนหัววัดสนามแม่เหล็กจากชนิดฮอลล์ เป็นชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ตั้งกระแสไบอัสไว้ให้สูงกว่าค่ากระแสวิกฤต พอประมาณ แล้วนำมาติดตั้งไว้ที่ระยะห่างเท่ากับในข้อ (2) โดยแสดงผังวงจรรูปที่ 50 แล้ววัดค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่เกิดขึ้น บันทึกผล

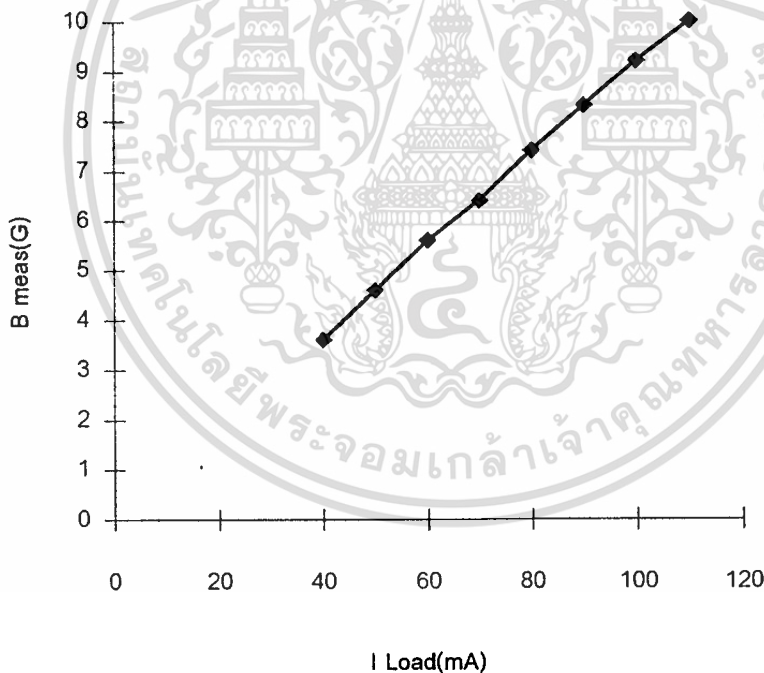


รูปที่ 50 วงจรที่ใช้ทดลองวัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสลัดจากมอเตอร์  
โดยใช้หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

4. เขียนกราฟระหว่างสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเกาส์มิเตอร์ กับค่ากระแสที่ให้กับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 51 เขียนกราฟระหว่างแรงดันจากหัววัดค้วนำไฟฟ้ายังยวด กับสนามแม่เหล็กที่วัดได้หรือกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 52 และนำค่าสนามแม่เหล็กในช่วง 4-10 เกาส์ เขียนกราฟระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร กับค่าสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในรูปที่ 53 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ กับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็ก ชนิดค้วนำไฟฟ้ายังยวด กับหัววัดชนิดฮอลล์

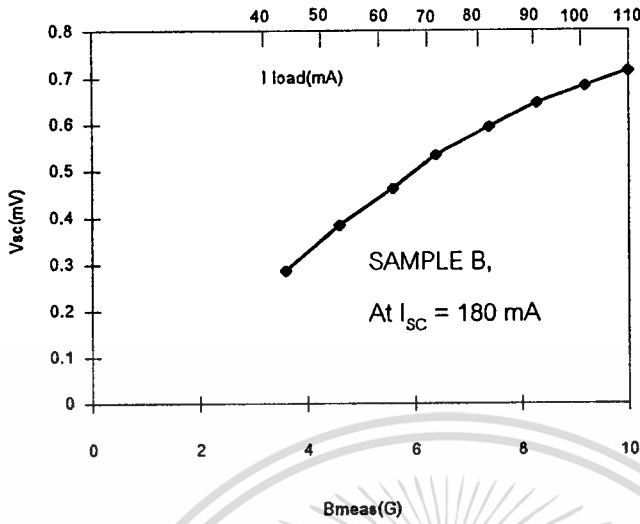
### ผลการทดลอง

จากการทดลองวัดค่ากระแสที่ไหลในมอเตอร์ โดยอาศัยสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดเหนี่ยวนำ ภายในมอเตอร์ กระแสสลับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่วัดได้ในขณะที่ให้กระแสค่าต่างๆกับมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 51



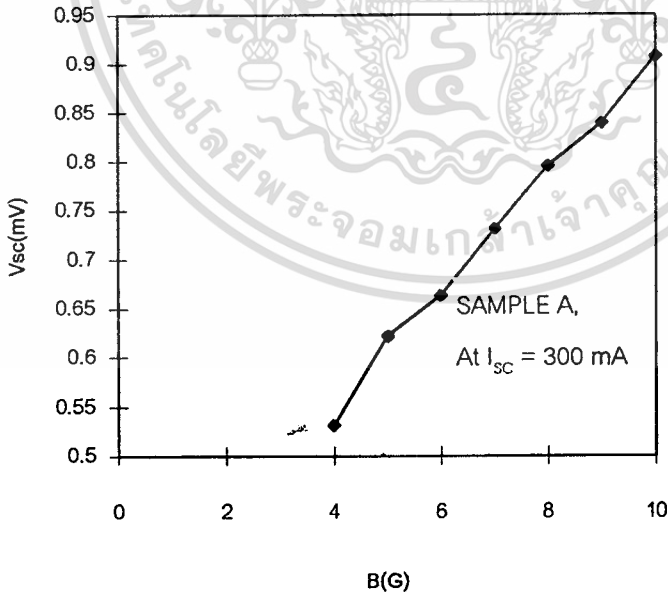
รูปที่ 51 กราฟระหว่างสนามแม่เหล็กที่วัดจากเกาส์มิเตอร์ กับกระแสที่ให้กับมอเตอร์

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากหัววัดค้วนำไฟฟ้ายังยวดกับค่าสนามแม่เหล็ก ในขณะที่มีกระแสค่าต่างๆไหลผ่านมอเตอร์ ดังรูปที่ 52



รูปที่ 52 กราฟแรงดันจากหัววัดตัวนำไฟฟ้าซึ่งขวัดกับสนามแม่เหล็กที่ได้จากเกาส์มิเตอร์

พิจารณาค่าสนามแม่เหล็กที่หัววัดตัวนำไฟฟ้าซึ่งขวัดจะตอบสนองที่ความไวสูงอยู่ระหว่าง 4 -10 เกาส์ แสดงดังรูปที่ 53



รูปที่ 53 กราฟแรงดันจากหัววัดตัวนำไฟฟ้าซึ่งขวัด กับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร  
ค่าระหว่าง 4 - 10 เกาส์

## วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 51 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเกาส์มิเตอร์ กับกระแสที่ไหลภายในขดลวดมอเตอร์ (inductive current) หรือ กระแสโหลด (load current) จะได้กราฟลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งจะนำไปใช้เปรียบเทียบกับในการอ่านค่ากระแสโหลดจากแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายังขวด ในกราฟรูปที่ 52

จากกราฟระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายังขวด กับ สนามแม่เหล็กที่วัดได้ในช่วง 3 -10 เกาส์ ในรูปที่ 52 นั้นสามารถแสดงถึงค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดภายในมอเตอร์ได้โดยตรง

จากการวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร เมื่อให้สนามแม่เหล็กคงที่ค่าต่างๆอันจะพบว่า ถ้าเราพิจารณาเฉพาะส่วนที่มีความไวสูง ที่สนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ ซึ่งอยู่ในช่วงของความเข้มข้นแม่เหล็ก 4 -10 เกาส์ ดังรูปที่ 53 แสดงให้เห็นว่า หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายังขวด มีความสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆได้เป็นอย่างดี

จากผลดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบหาประมาณกระแสที่ไหลในมอเตอร์ ซึ่งแสดงถึงแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายังขวด กับสนามแม่เหล็ก และกระแสที่ไหลในขดลวดมอเตอร์

ตัวอย่าง เช่น ค่าแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายังขวด 0.593 mV จะเกิดจากค่าสนามแม่เหล็กเท่ากับ 7.4 เกาส์ และจากค่าสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะสามารถเทียบค่ากระแสจากมอเตอร์ ได้เท่ากับ 80 mA

## สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตัวนำไฟฟ้ายังขวดนั้นมีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีทั้งสนามคงที่และสนามที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา รวมถึงความสามารถในการวัดสนามแม่เหล็กที่มากระทำ ซึ่งสามารถนำไปใช้วัดขนาดของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดได้เป็นอย่างดี

จากคุณสมบัติที่มีขึ้นกับทิศทางของหัววัดสนามแม่เหล็กดังกล่าว ทำให้นำไปใช้งานได้สะดวกขึ้น กล่าวคือไม่ต้องปรับทิศทางของหัววัด ให้มีการตอบสนองดีที่สุดเหมือนกับหัววัดแบบมีทิศทาง เพียงแต่รักษาระยะห่างของหัววัดชนิดขดลวดให้คงที่เท่านั้น

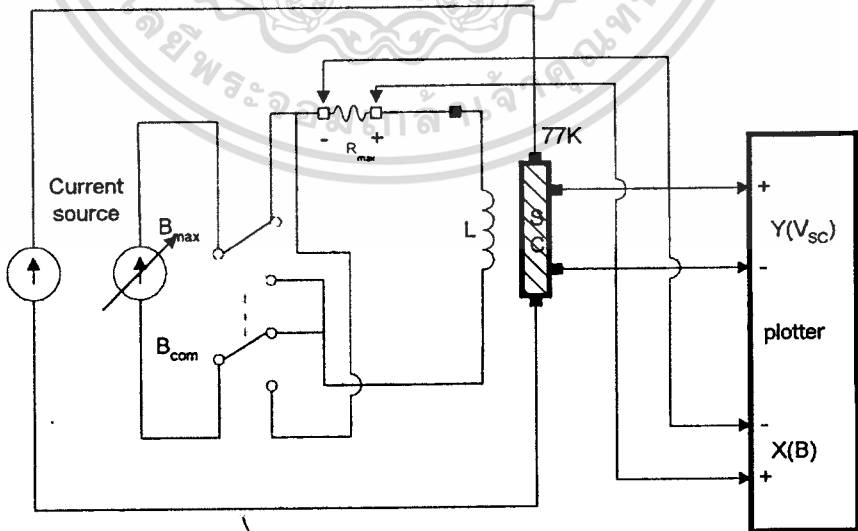
สำหรับแนวทางการประยุกต์ใช้ หัววัดชนิดตัวนำไฟฟ้ายังขวดในการควบคุมปริมาณกระแส หรือแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทขดลวดนั้นได้อาศัยคุณสมบัติของหัววัด ที่สามารถบอกค่าแรงดันที่สัมพันธ์ กับขนาดของสนามแม่เหล็กจากขดลวด ถ้าเราทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายังขวด กับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการไหล

ของกระแสในขดลวด ก็จะสามารถควบคุมการหมุนของมอเตอร์ ได้ด้วยปริมาณของกระแสให้กับขดลวดนั้น โดยอาศัยการทำงานรวมกันกับวงจรเปรียบเทียบสัญญาณและวงจรป้อนกลับ

## การประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำแบบนอนโวลตาไทล์

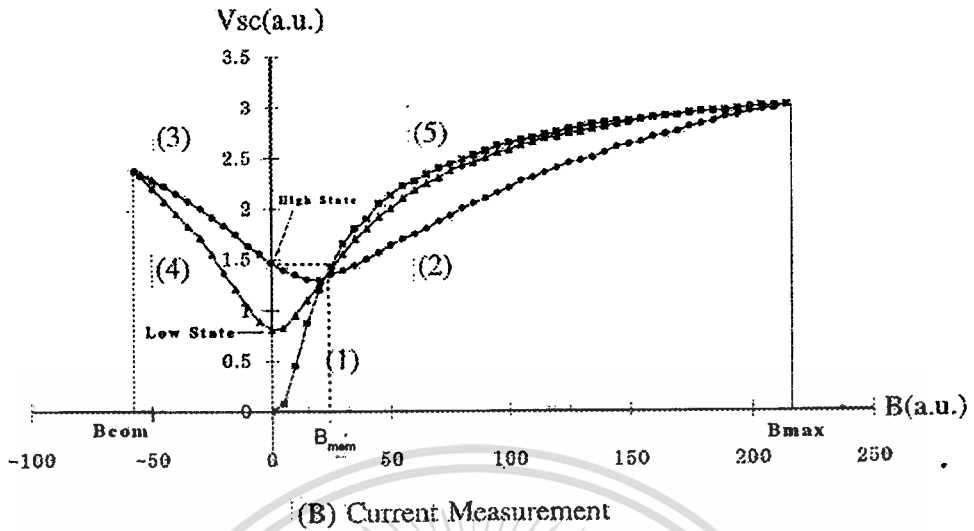
เมื่อได้กล่าวถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในปรากฏการณ์ซีซีเอสเตอร์ริชชีที่ ทำให้ได้ทราบถึงการหาปริมาณกระแสคงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยวิธีการชดเชยกระแสด้วยสนามแม่เหล็กชั่วคราวเข้ามา ในการทดลองดังกล่าวมีสิ่งที่น่าสนใจประการหนึ่งคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถถูกทำให้จำสภาพแม่เหล็กได้ในปริมาณที่แน่นอน ในทางตรงข้ามก็สามารถล้างสภาพแม่เหล็กที่จำอยู่ภายในชั้นสารได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้วิธีชดเชยกระแสด้วยสนามแม่เหล็กชั่วคราว ซึ่งได้ก่อให้เกิดแนวความคิดในการประยุกต์ใช้งาน ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปเป็นหน่วยความจำชนิดนอนโวลตาไทล์

สำหรับขั้นตอนในการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปเป็นหน่วยความจำชนิดนอนโวลตาไทล์ สามารถอธิบายได้โดยใช้วงจรที่ปรับปรุงขึ้นมาจากวงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชั้นสารกับสนามแม่เหล็กใน ไปเป็นวงจรที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของหน่วยความจำชนิดนอนโวลตาไทล์แบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังรูปที่ 54



รูปที่ 54 วงจรที่ใช้สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำแบบนอนโวลตาไทล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมจันสารกับสนามแม่เหล็ก  
สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำแบบนอนโวลตาไทล์

วงจรที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 54 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 55 อธิบายได้ดังต่อไปนี้ในสภาพปกติ ตัวนำไฟฟ้ายังขดยังไม่ได้รับสนามแม่เหล็กจึงยังไม่มี voltage ตกคร่อม ( $V_{sc}=0$ ) ต่อมาเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กให้แก่ตัวนำไฟฟ้าขด (ขั้วเหนือ) ทำให้เกิด  $V_{sc}$  ซึ่งสัมพันธ์กับ  $B$  ดังรูป จนถึงจุด  $B=B_{max}$  จากนั้นลดสนามที่ป้อนให้น้อยลงจนถึงจุด  $B=0$  เราจะพบว่า  $V_{sc}$  จะไม่เป็นศูนย์เหมือนตอนแรกแต่จะมี voltage ตกคร่อมอยู่ค่าๆ หนึ่งซึ่งเป็นสภาพแม่เหล็กที่ตัวนำไฟฟ้าขดจำไว้ (สภาวะ persistent current memory) การชดเชยเพื่อให้  $V_{sc}$  ลดลงเป็นศูนย์โดยการป้อนสนามแก่ตัวนำไฟฟ้าขดในทิศตรงข้าม (ขั้วใต้) สนามที่ป้อนเพื่อชดเชยนี้เรียกว่า  $B_{compensate}$  ( $B_{com}$ ) โดยจะต้องให้  $B_{com} > B_{mem}$

ทำให้  $V_{sc}$  ภายหลังชดเชยมีค่าน้อยลง ซึ่งแรงดันขณะนี้กำหนดให้เป็น state "0" หรือ low state ส่วน  $V_{sc}$  ที่ได้ตอนแรกนั้นกำหนดให้เป็น state "1" หรือ high state

จากรูปที่ 55 พิจารณา voltage ที่  $B=0$

1. 'state "1" โดยการป้อนสนามแม่เหล็กจากจุด  $B=B_{max}$  แล้วย้อนกลับไปหาจุด  $B=0$
2. state "0" โดยการป้อนสนามแม่เหล็กจากจุด  $B=B_{com}$  แล้วย้อนกลับไปหาจุด  $B=0$

จากการทดลองสามารถนำแรงดัน output ( $V_{sc}$ ) ไปใช้งานได้หลากหลายแต่ต้องผ่านวงจรขยายสัญญาณ (AMPLIFIER) ก่อน เพื่อให้ได้ระดับแรงดันตามต้องการไปป้อนให้กับ state ถัดไป เช่น วงจรขับ relay เป็นต้น

ซึ่งการเขียนสถานะทั้งสองนี้สามารถกระทำได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก จากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ส่วนการอ่านหรือการแสดงผลของสถานะทั้งสองทำได้โดยการจ่ายกระแสผ่านตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดแล้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร สำหรับสถานะ “Lo” จะเป็นแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดที่ไม่มีการจำสภาพแม่เหล็กภายใน ส่วนสถานะ “Hi” จะเป็นแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดที่มีการจำสภาพแม่เหล็กภายใน นอกจากนี้สถานะทั้งสองนี้จะมีเสถียรภาพสูงสามารถรักษาสถานะดังกล่าวได้โดยไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง ซึ่งสอดคล้องกับหน่วยความจำชนิดนอนโวลไทล์

### การประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจหาทิศทางของแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก

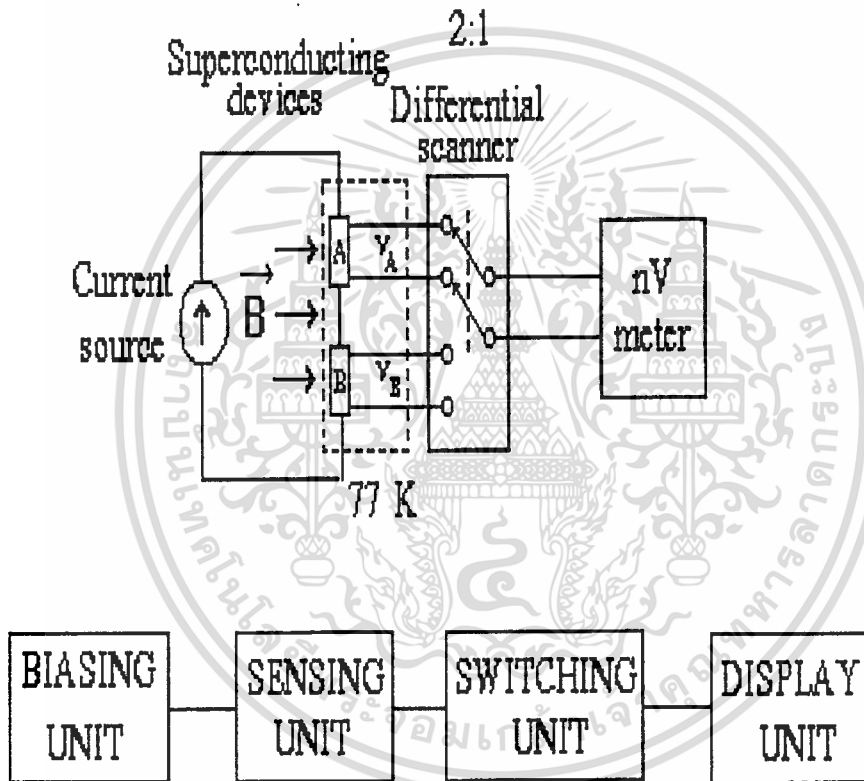
ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเออร์ทพุท กับทิศทางสนามแม่เหล็ก ของหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดสารกึ่งตัวนำเปรียบเทียบกับตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดสารกึ่งตัวนำ ซึ่งใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์จะมีความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขนาดของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับมุม แต่หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด จะมีคุณสมบัติไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic property) ทำให้สามารถนำไปวัดสัญญาณสนามแม่เหล็ก โดยปราศจากความเปลี่ยนแปลงและความสม่ำเสมอของสัญญาณเออร์ทพุทไม่ว่าจะมีสนามแม่เหล็กมากระทำในทิศทางใด

อย่างไรก็ตามหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด มีความเป็นไปได้ในการวัดทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยใช้โครงสร้างของหัววัดแบบคู่ ด้วยเหตุนี้ทางห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด จึงได้คิดค้นอุปกรณ์ตรวจหาทิศทางของแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก ชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดขึ้นมาเพื่อที่จะเป็นแนวทางการพัฒนา การประยุกต์ใช้งานของหัววัดสนามแม่เหล็ก ชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดให้ได้กว้างขวางขึ้น

### การทดลองและผลการทดลอง

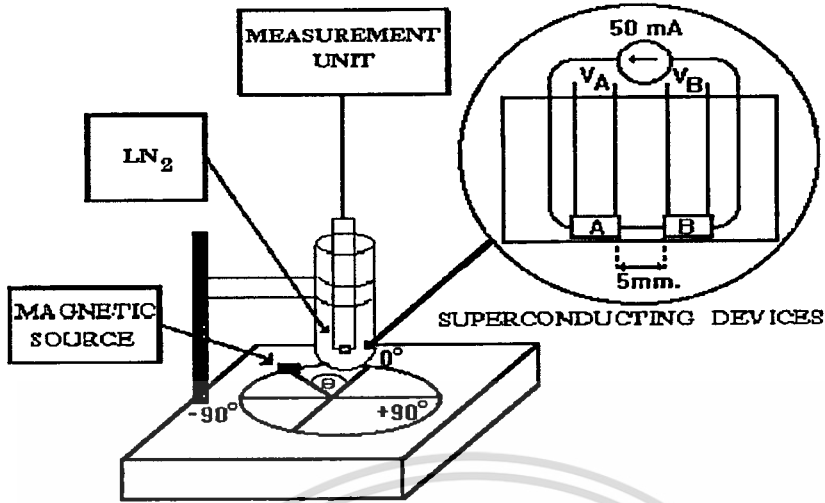
การทดลองเพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติในเชิงทิศทางของหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด สามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 56 และ 57 วงจรวัดสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง ในรูปที่ 56 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสตรงที่ หัววัดสนามแม่เหล็ก สแกนเนอร์เข้า 2 ออก 1 แบบดิฟเฟอเรนเชียลและนาโนโวลต์มิเตอร์ ส่วนชุดเครื่องมือที่ใช้ทดลองและโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็กแสดง ดังรูปที่ 57 ในการทดลองนี้ ใช้กระแสไปอัส 50 mA อุณหภูมิ 77 K ขนาดของชิ้นสาร A และ B เป็น  $3 \times 6 \times 1 \text{ mm}^3$  โดยมีระยะห่างของขั้วของแรงดันเป็น 3 mm. และระยะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห่างระหว่างชั้นสารเป็น 11 mm. โดยวัดความแตกต่างของแรงดันตกคร่อมหัววัดสนามแม่เหล็กชั้น B เทียบกับชั้น A กับมุมระหว่างเส้นแบ่งครึ่งของหัววัดทั้งสองกับแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กจาก  $-90^\circ$  ถึง  $+90^\circ$  ที่ขนาดสนามแม่เหล็ก 1.0, 1.5 และ 2.0 mT ตามลำดับ สำหรับแต่ละค่าสนามแม่เหล็กที่  $\theta = 0^\circ$  พิจารณา ให้เป็นแรงดันออฟเซต ของหัววัดที่จะต้องปรับให้เป็นศูนย์ก่อนที่จะทำการวัดที่มุมต่างๆ

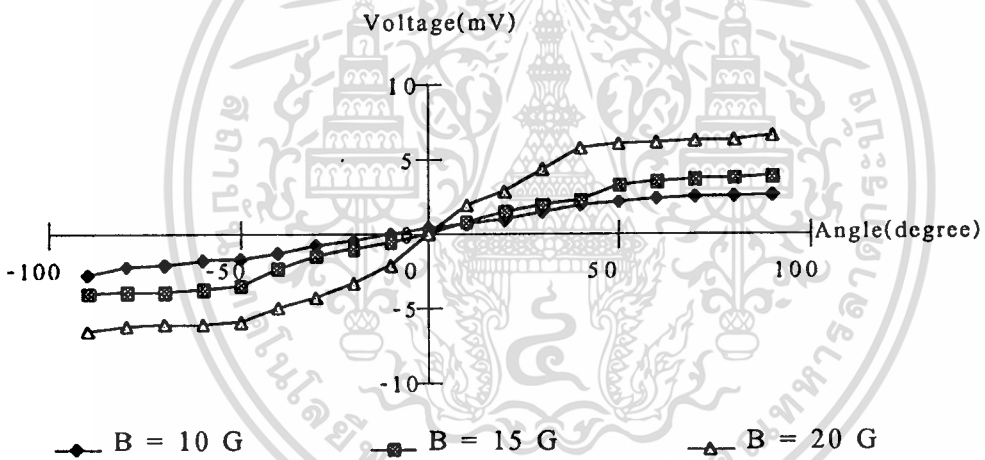


รูปที่ 56 วงจรวัดสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาเขียนกราฟโดยให้ความแตกต่างของแรงดันแสดงด้วยแกน Y และมุมของสนามแม่เหล็กแสดงด้วยแกน X โดยมีพารามิเตอร์คือ ขนาดสนามแม่เหล็ก 3 ค่าดังกล่าว



รูปที่ 57 ชุดเครื่องมือและโครงสร้างของหัววัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของแรงดันหัววัดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มีค่าสนามแม่เหล็ก

ผลที่ได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความแตกต่างของแรงดันของหัววัดทั้งสองกับมุมของสนามแม่เหล็ก ที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆแสดงดังรูปที่ 58 และตารางแสดงค่าความไวของหัววัด (sensitivity) ความละเอียด (resolution) และค่าความกว้างของมุมการวัด (beam width) ที่สัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็กแสดงในตาราง 2

## ตารางที่ 2

แสดงลักษณะสมบัติของหัววัดที่สัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็ก

B(mT) (at $\theta=0^\circ$ )	Sensitivity (mV/deg.)	Resolution (deg.) (at $\Delta V=0.01\text{mV}$ )	Beam Width (deg.) (at $\Delta V/\Delta\theta=0$ )
1.0	0.04	0.25	180
1.5	0.07	0.14	140
2.0	0.12	0.08	100

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ได้รับ การไบอัสแล้ว จะแปรโดยตรงกับสนามแม่เหล็กภายนอกจนกว่าขนาดสนามแม่เหล็กจะเกินกว่า ขนาดสนามแม่เหล็กวิกฤตซึ่งจะทำให้หัววัดอิมิตัว และแรงดันเอาต์พุตจะมีขนาดสม่ำเสมอไม่ขึ้น กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ด้วยเหตุนี้หากใช้หัววัดสองชิ้นในการวัดขนาดสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ มีความแตกต่างของระยะทางจากแม่เหล็ก ไปยังหัววัดทั้งสองที่สัมพันธ์กับมุม ซึ่งก่อให้เกิดความ แตกต่างของสนามแม่เหล็ก และแรงดันที่สัมพันธ์กับมุมของสนามแม่เหล็กด้วย โดยอาศัยหลักการ ดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่มีโครงสร้างของหัววัดคู่ เพื่อตรวจหาทิศทางของสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงจากกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างความแตก ต่างของแรงดัน ของหัววัดทั้งสองกับมุมของสนามแม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ดังรูปที่ 58 พบ ว่าแรงดันจากหัววัดมีการเปลี่ยนแปลง กับมุมของสนามแม่เหล็กที่ชัดเจน กล่าวคือ หัววัดสามารถ จำแนกมุมของแม่เหล็กด้วยเครื่องหมาย และขนาดของแรงดัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากกราฟดัง กล่าวจะเห็นว่าขนาดสนามแม่เหล็ก ที่มุมศูนย์ของสามีผลต่อลักษณะสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็ก ที่พิจารณาได้แก่ ความไวของหัววัด (sensitivity) ความละเอียด (resolution) และความกว้างของมุม การวัด (beam width) ดังแสดงในตารางที่ 2

โดยที่ความไวของหัววัด (Sensitivity;S) เป็นปริมาณที่บอกถึงแรงดันที่เปลี่ยนแปลงเนื่อง จากการตอบสนอง ของหัววัดเมื่อมุมเปลี่ยนแปลงไป 1 องศา

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta \theta} \quad [\text{mV/deg.}] \quad \text{-----(1)}$$

ความละเอียด (Resolution;R) เป็นปริมาณที่บอกถึงมุมที่เล็กที่สุด ที่หัววัดสามารถแสดงผลได้หาได้จากความชัน ของกราฟที่ตัดผ่านมุมศูนย์องศา มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ต่อองศา(mV/deg.)ความละเอียดหาได้จาก ส่วนกลับของความไวของหัววัดคูณกับค่าความละเอียดของเครื่องมือวัด ซึ่งมีหน่วยเป็นองศา(deg.)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Resolution} \\ \text{at } \Delta V = 0.01 \text{ mV} \end{array} \right\} = \left\{ \frac{0.01(\text{mV})}{S} \right\} \quad [\text{deg.}] \quad \text{-----}(2)$$

ความกว้างของมุมการวัดเป็นปริมาณที่บอกถึงช่วงของมุมที่หัววัดสามารถตอบสนองได้ หาได้จากความแตกต่างของมุมของแม่เหล็กที่ทำให้หัววัดอิมตัวหรือที่แรงดันจากหัววัดไม่เปลี่ยนแปลงกับมุมมีหน่วยเป็นองศา(deg.)

$$\begin{aligned} \text{Beam width} &= 2 \theta_{\text{sat}} \quad [\text{deg.}]; \\ \theta_{\text{sat}} &= \theta \quad (\text{at } \Delta V / \Delta \theta = 0); \quad 0 \leq \theta \leq 90^\circ \end{aligned} \quad \text{-----}(3)$$

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2 ซึ่งแสดงลักษณะสมบัติของหัววัดที่สัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าที่สนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ความไวของหัววัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังนั้นจะมีความสามารถจำแนกมุมได้ดีขึ้น ซึ่งแสดงด้วยค่าความละเอียดที่ลดลงแต่จะทำให้มุมของการวัดมีขนาดแคบลงเนื่องจากความอิมตัวของหัววัด โดยที่ข้อดีสำหรับ resolution ที่ไม่ดี ทำให้ไม่ต้องตั้งมุมให้ถูกต้องแม่นยำนักก็สามารถประมวลผลได้ แต่ถ้าต้องการวัด direction ของสนาม resolution ควรจะดี ด้วยเหตุนี้ ในการใช้งานหัววัดทิศทาง ของแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งขูดให้ได้ผลถูกต้อง จึงต้องคำนึงถึงค่าของสนามแม่เหล็ก ความไวของหัววัดความละเอียดและมุมของการวัด เป็นต้น

### บทสรุป

ในรายงานนี้ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งขูดแบบเซรามิก ในการวัดทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยใช้โครงสร้างหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งขูดแบบคู่ ซึ่งจะอาศัยคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง ของสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการตรวจวัดผล ของความแตกต่างของแรงดันจากหัววัด เนื่องจากมุมและขนาดของสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่างๆกัน ผลจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อใช้ตรวจหาทิศทางของแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามบทความที่ได้นำเสนอไปนี้เป็นการศึกษาในแนวกว้างจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาในรายละเอียดของ การจัดโครงสร้างของห้ววัด ลักษณะสมบัติของห้ววัด การจำลองแบบในทางคณิตศาสตร์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม รวมไปถึงการออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดทิศทางที่มีความแม่นยำสูงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การวัดสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ได้มีใช้กันโดยทั่วไปมีอยู่มากมาย ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกกล่าวถึงเพียง 4 ประเภท ซึ่งสามารถแบ่งตามหลักการทำงานได้ดังนี้

1. Magnetic Induction
2. Semiconductor Hall Device
3. Superconducting Magneto-resistive Device
4. SQUID Magnetometer

สำหรับสนามแม่เหล็กที่ศึกษาเป็นทั้งแบบสนามคงที่และแบบสนามที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา โดยที่ปริมาณทางแม่เหล็กที่จะได้กล่าวถึงในการศึกษานี้จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$B = \Phi / A \quad ; \quad A = \text{พื้นที่} \quad [m^2] \quad [1]$$

$$= \mu_0 H \quad ; \quad \mu_0 = \text{ความซึมซับทางแม่เหล็ก} \quad [H/m] \quad [2]$$

โดยมีปริมาณสนามได้แก่

B เป็นมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา [T]  $1T = 10^4 G$

$\Phi$  เป็นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ [Weber]

H เป็นความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมป์ต่อเมตร [A/m]

ในการวัดปริมาณแม่เหล็กในที่นี้จะได้ผลลัพธ์เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B ซึ่งจะได้อธิบายหลักการและข้อเปรียบเทียบต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นพอเป็นสังเขปดังต่อไปนี้

1. **Magnetic Induction** เป็นวิธีการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก อธิบายได้ด้วยกฎของฟาราเดย์ที่ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงดัดขดลวดปิดของตัวนำ จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือมีกระแสไหลภายในขดลวดนั้น การใช้งานโดยทั่วไปจะเป็น pick-up coil สำหรับทาบแม่เหล็ก เทปวีดีโอ เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะไม่สามารถวัดสนามแม่เหล็กคงที่ได้ และจะต้องมีการปรับมุมของระนาบหัววัดให้ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ได้ขนาดสัญญาณพอเหมาะ และลดความถี่ขึ้น

2. **Semiconductor Hall Device** เป็นวิธีการตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยวัสดุ สารกึ่งตัวนำ อธิบายได้ด้วยกฎของฮอลล์ที่ว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่ชิ้นสารกึ่งตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในปริมาณที่ขึ้นกับสนามและในทิศตั้งฉากกับทิศของกระแส และทิศ

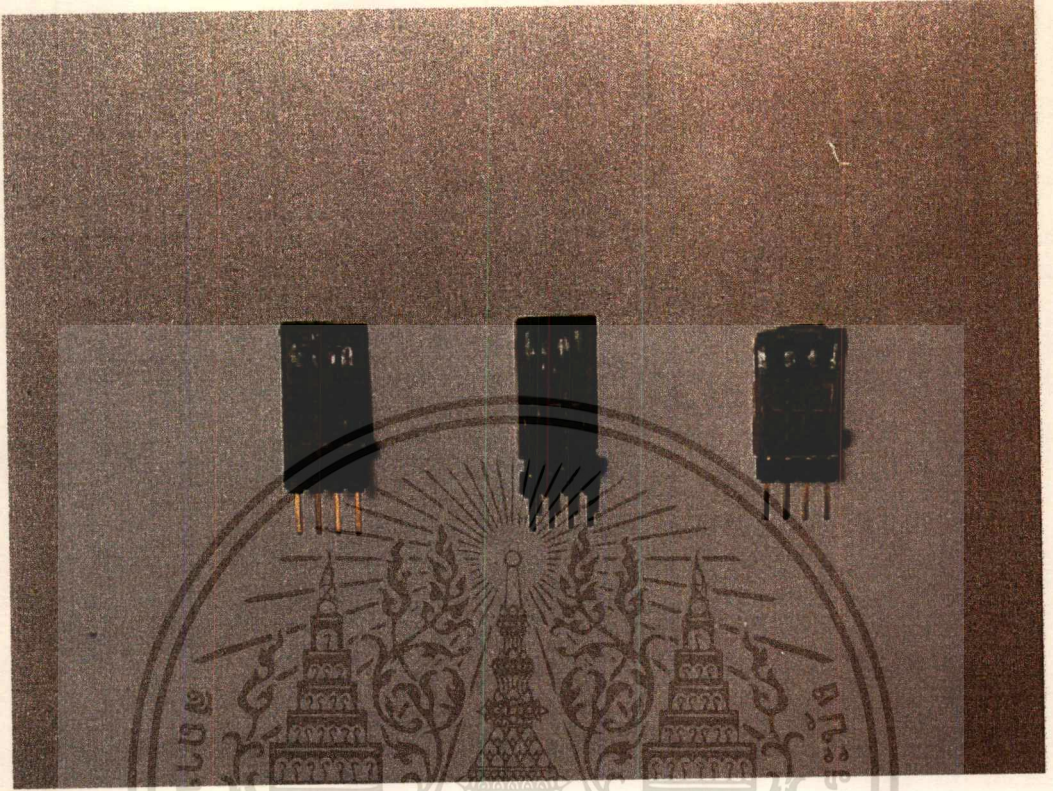
สนามแม่เหล็ก โดยปริมาณแรงดันจะสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็ก การใช้งานมีตัวอย่าง เช่น หัววัดสนามแม่เหล็กสำหรับวัดรอบการหมุนของมอเตอร์ สอกลต์สวิทช์สำหรับคีย์บอร์ด เป็นต้น ข้อดีคือวัดสนามคงที่ได้ แต่วิธีนี้ยังคงต้องปรับทิศทางของหัววัดให้ตั้งฉาก กับสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ได้ขนาดสัญญาณแรงที่สุดโดยไม่เพี้ยน

**3. Superconducting Magnetoresistive Device** เป็นวิธีตรวจวัดปริมาณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยอาศัยคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์แม็กนิโตรีซิสติฟ ที่มีหลักการคือ เมื่อขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะมีสภาพต้านทานที่เปลี่ยนแปลง ขึ้นกับขนาดของแม่เหล็กภายนอกอย่างเป็นสัดส่วน โดยตรง การใช้งานของหัววัดนี้เหมาะสมกับการวัดสนามแม่เหล็กขนาดต่ำ ๆ ทั้งแบบ DC และ AC ได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีนี้จะมีความไวสูง อีกทั้งยังสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงทิศทางของสนามที่มากระทำด้วย รวมทั้งยังมีปรากฏการณ์ฟูลเวฟเรกติไฟเกิดขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามหากสนามแม่เหล็กที่ถูกวัดมีค่าสูงเกินกว่าค่าสนามวิกฤต จะทำให้ขึ้นสารเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นหน่วยความจำชนิดนอนโวลตาไทล์ได้ รวมถึงมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กกลับเป็นแบบฮอลล์เวฟเรกติไฟได้ด้วย

#### **4. SQUIDS (Superconducting Quantum Interference Devices)**

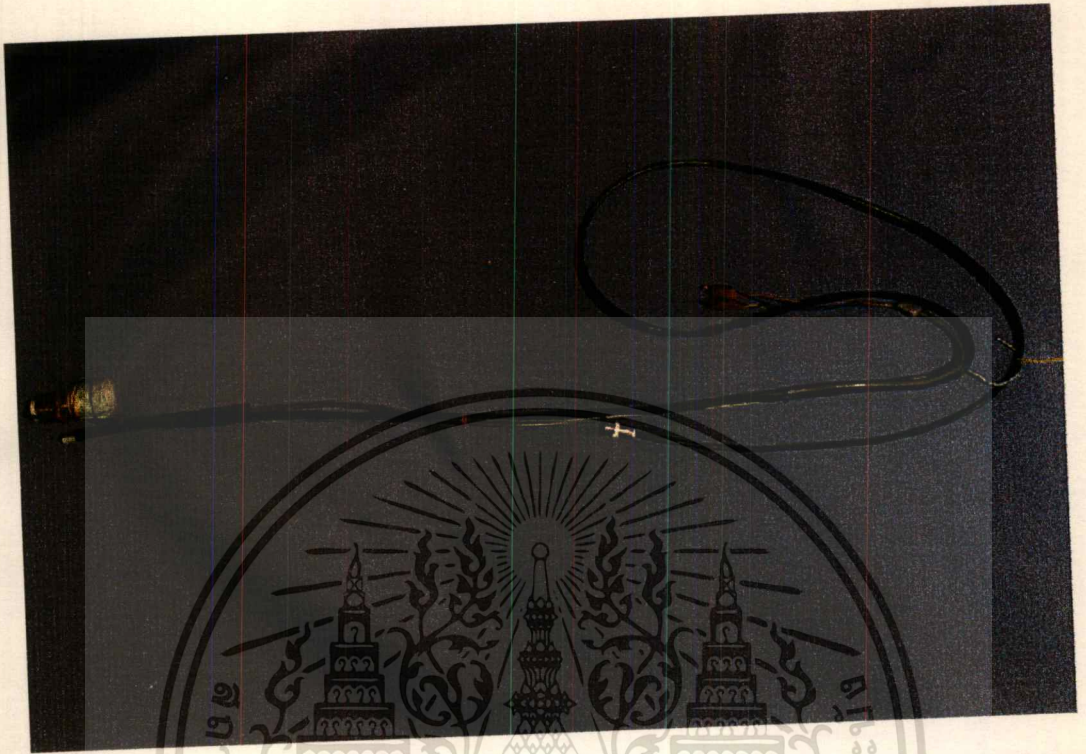
Squid วัดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขนาดเล็กโดยมีความละเอียดสูงมาก ด้วยความไวสูงมากเป็นพิเศษ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ได้แก่ การประยุกต์ใช้งานทางไบโอแม็กเนติก ซึ่งเป็นสัญญาณแม่เหล็กจากสมอง หัวใจ เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานทางการปรับเทียบมาตรฐาน และการวัดปริมาณทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก การประยุกต์ใช้งานในการสำรวจน้ำมัน และแร่ธาตุ การตรวจความแปรเปลี่ยนวิถีคลื่นความโน้มถ่วงของโลก และดาวเคราะห์ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานไปในอุปกรณ์ประมวลสัญญาณดิจิทัลความถี่สูงมาก อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ชนิดนี้จะต้องใช้เทคโนโลยีที่สูงมากทั้งในกระบวนการสร้าง และการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งหมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นด้วย

## ภาคผนวก ข



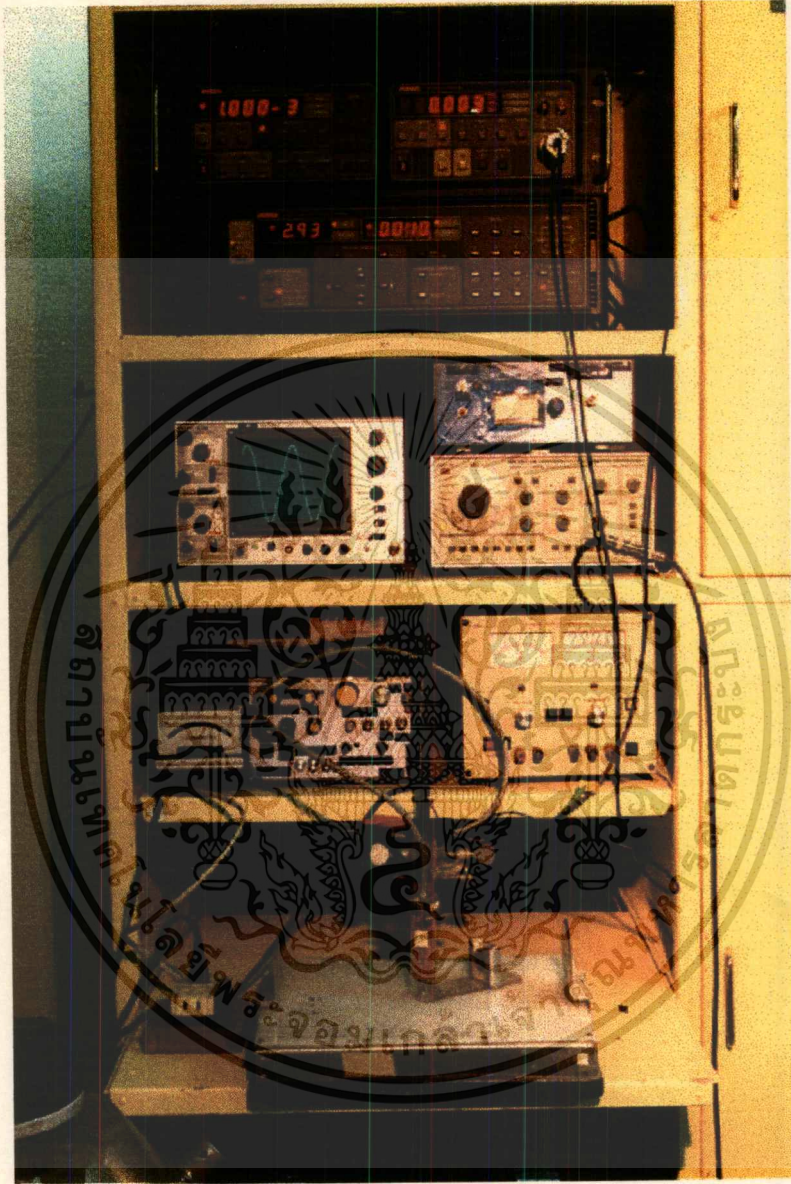
แสดงรูปร่างชิ้นสารตัวอย่างที่ใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

## ภาคผนวก ก



แสดงชุดสายนำสัญญาณสำหรับเชื่อมต่อหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด  
เข้ากับเครื่องมือวัด และแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กประกอบรวมอยู่ด้วย

## ภาคผนวก ง



แสดง ชุดเครื่องมือที่นำมาใช้ศึกษาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

- (1) แหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้แบบดิจิทัล
- (2) นาโนโวลต์มิเตอร์
- (3) ออสซิลโลสโคป
- (4) แหล่งกำเนิดสัญญาณ
- (5) แหล่งจ่ายกระแส/แรงดันที่ปรับค่าได้แบบอนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

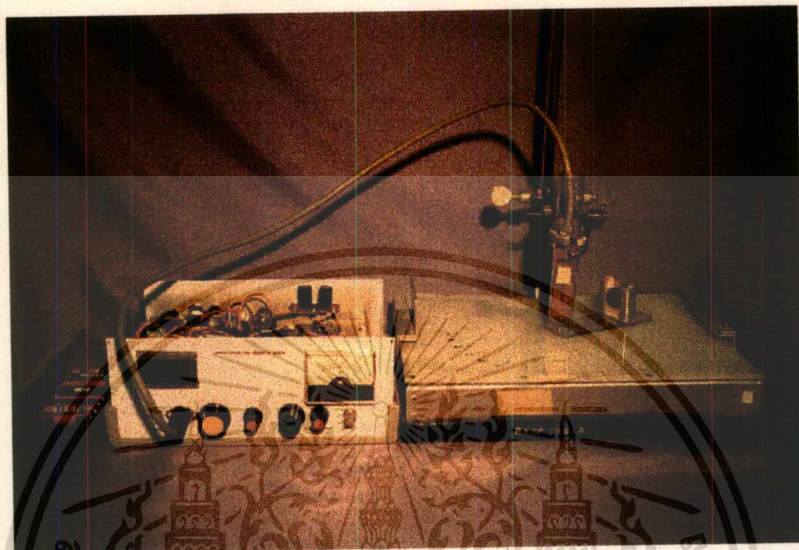
ภาคผนวก ง



แสดงชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์ กับแม่เหล็กปรับเทียบ



## ภาคผนวก จ



แสดงชุดวัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ต่อเข้ากับชุดทดลองวัดความสัมพันธ์  
กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายสมศักดิ์ ชงยิ่งศักดิ์ถาวร
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ.2511
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2532
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	

1. การประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิกเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก
2. แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก
3. การควบคุมคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
4. หัววัดสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง ชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
5. ปรากฏการณ์เรคตีไฟในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
6. การวิเคราะห์การวัดสนามแม่เหล็กด้วยวงจรวีทส โคนบรีดจ์ชนิด HTSC
7. การศึกษาคุณสมบัติการป้องกันสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBaCuO
8. อุปกรณ์ตรวจหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กโดยใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด