

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง
แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Study and Fabrication
of
 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ High Temperature Superconductor



ดุษฎีจันทร์ จอมแสง
DULYAWAT JOMSAENG

เลขหมู่ _____
เลขทะเบียน 17536
วัน, เดือน, ปี 10 ก.ค. 2535

อาจารย์ที่ปรึกษา
พศ.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง
ADVISOR

ASST. PROF. WISUT TITIROONGRUANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2535

ISBN 974-8157-70-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
คำนำ	III
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	X
ศัพท์เทคนิค	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การค้นพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	1
1.2 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก	4
1.3 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	8
1.3.1 งานทางอิเล็กทรอนิกส์	8
1.3.2 งานด้านระบบกำลัง	9
1.3.3 ด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์	10
1.3.4 การคมนาคม	11
1.3.5 การทหาร	13
บทที่ 2 คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	14
2.1 การเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	14
2.2 ปรากฏการณ์การไร้ความต้านทานไฟฟ้า	16
2.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	16
2.4 วงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	17
2.5 ทฤษฎีจุลภาคของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	19
2.6 การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก	23
2.7 ประเภทของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	24

บทที่ 3	การเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	27
3.1	การเตรียมห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวัดคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ	28
3.1.1	เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	28
3.1.2	สารเคมีที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	33
3.1.3	ถังเก็บไนโตรเจนเหลวขนาด 35 ลิตร และ 10 ลิตร	34
3.1.4	แม่เหล็กถาวรความเข้มสูง	34
3.1.5	ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	35
3.1.6	ชุดเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	36
3.1.7	ชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	38
3.2	การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงตระกูลอิตเทรียม	39
3.3	อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้เผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O	41
3.4	การทดลองเพื่อกำหนดเวลาที่ใช้ในการเผา	44
3.5	การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์	52
3.6	การเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ จากสารประกอบไนเตรตโดยกระบวนการผสมแบบเปียก	54
3.7	การเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ จากสารประกอบสำเร็จรูป	57
3.8	การทดลองสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก Y-Ba-Cu-O อัตราส่วนผสมต่าง ๆ	60
3.9	เทคนิคการหาปริมาณออกซิเจนในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง โดยวิธีไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน	63
3.10	การทดลองหาชนิดของพาหะนำประจุเอกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O	69

บทที่ 4	แนวทางการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ชนิดเซรามิก	70
4.1	แนวทางการประยุกต์ เป็นหัววัดความเข้มสนามแม่เหล็ก	71
4.2	แนวทางการประยุกต์ เป็นหน่วยความจำสนามแม่เหล็ก	77
4.3	แนวทางการประยุกต์ เป็นตัวตรวจสอบขั้วแม่เหล็ก	80

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	83
กิติกรรมประกาศ	86
หนังสืออ้างอิง	87
ภาคผนวก ก หน่วยและสัญลักษณ์ที่น่าสนใจ	90
ภาคผนวก ข ตารางเทียบแรงดันออกของเทอร์โมคัปเปิลกับอุณหภูมิ	92
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของธาตุที่เกี่ยวข้อง	95
ภาคผนวก ง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตระกูลต่างๆ ที่มีการวิจัยอยู่ในปัจจุบัน	98
ประวัติผู้เขียน	100



หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
 นักศึกษา นายดุลยวัจน์ จอมแสง
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง
 ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 ปี พ.ศ. 2535

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ เสนอการพัฒนาระบบการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงตระกูลอิตเทรียมแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ โดยใช้สารประกอบเริ่มต้น Y_2O_3 , BaCO_3 และ CuO ในอัตราส่วนผสมของ Y:Ba:Cu เป็น 1:2:3 เพื่อกำหนดกระบวนการสร้างมาตรฐาน สำหรับเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่จะ ใช้ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้งาน ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงคุณสมบัติที่สำคัญคือ ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ การไร้ความต้านทาน ปรากฏการณ์วิลสันมีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 92 K กระบวนการมาตรฐานที่ได้ เสนอนี้สามารถใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตระกูลอิตเทรียมที่สร้างจากสารประกอบไนเตรต ซึ่งทดลองใช้การผสมสารประกอบแบบเปียก สารประกอบสำเร็จรูปแบบ 1230G และสารประกอบออกไซด์ในอัตราส่วนผสมอื่น ๆ ได้ด้วย ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่สร้างขึ้นนี้หาปริมาณของออกซิเจนที่รวมอยู่ใน โมเลกุล ได้ประมาณ 6.7 - 6.9 อะตอม โดยมีน้ำหนักนำประจุ ออกเป็น โสไล นอกจากนี้ยัง ได้ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งนำไปสู่การพัฒนากฎการตรวจสอบสนามแม่เหล็กความไวสูง โดยการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันพบว่า สนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้เกิดแรงดัน ไฟฟ้าตกคร่อม เนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่ค่าแรงดัน ไฟฟ้าที่ตกคร่อมนั้นจะมีค่ามากขึ้นถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ผลของสนามแม่เหล็กยังทำให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก ไฟฟ้าขึ้น และสามารถบอกชื่อของสนามแม่เหล็กอ่อนที่ เข้ามาใกล้ได้ นอกจากนี้ยังได้ เสนอสมมติฐานแบบจำลอง โครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบเซรามิก เพื่ออธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นด้วย

II

THESIS TITLE STUDY AND FABRICATION OF $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ HIGH TEMPERATURE
SUPERCONDUCTOR

NAME DULYAWAT JOMSEANG

THESIS ADVISOR ASST.PROF. WISUT TITIROONGRUANG

LEVEL OF STUDY MASTER'S IN ELECTRICAL ENGINEERING

YEAR 1992

ABSTRACT

This thesis describes the development of the fabrication process of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ High Temperature Superconductor (HTSC-123). First, HTSC-123 is prepared by mixing Y_2O_3 , BaCO_3 and CuO powder with the ratio of Y:Ba:Cu equal to 1:2:3. This fabrication process is then used as the standard process for preparation of HTSC which will be employed in applications. HTSC-123 exhibited Meissner effect, Zero resistance and Silsbee effect with 92 K critical temperature. Additionally, the preparation of HTSC-123 from Nitrate compound and ready mixed commercial product 1230G compound are experimented by using this standard process. HTSC-123 that prepared from standard process have following properties oxygen 6.7-6.9 Atom, and majority carriers are holes. In examining the magnetic effect of HTSC-123, the measurement of current-voltage characteristics, and the voltage drop across the superconducting sample is observed when applying and external magnetic field. The voltage drop increases with an increasing field in magnetic flux. In addition, high magnetic flux can produce an electromagnetic memory phenomenon in HTSC-123 and demonstrate magnetic pole of weak magnet. A hypothesis of ceramic superconductor macrostructure model in order to explain its properties is presented.

คำนำ

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทาน ไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ถูกค้นพบตั้งแต่ พ.ศ. 2454 ที่อุณหภูมิ ต่ำมาก คือที่ 4.2 เคลวิน หรือ จุดเดือดของฮีเลียมเหลว แม้จะสร้างความตื่นเต้นให้กับนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก แต่การค้นคว้าวิจัยก็ยังจำกัดเนื่องจาก ฮีเลียมเหลวหายากและมีราคาแพง การพัฒนา ค่อย ๆ ดำเนินมาเรื่อย ๆ จุดประสงค์หลักก็อยู่ที่การเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตให้สูงขึ้น จนกระทั่งปัจจุบัน ตัว นำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกพัฒนามาถึงขั้นที่สามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว ซึ่งหาได้ง่าย และราคาถูก การวิจัยจึงแพร่กระจายออกไปอย่างมาก เกือบทุกประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประ เทศอุตสาหกรรม ได้มีการทุ่มเททั้งกำลังคนและเงินจำนวนมาก เชื่อกันว่า เฉพาะในประเทศญี่ปุ่น ค่าใช้จ่ายในงานวิจัยสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น สูงถึงประมาณสี่พันห้าร้อย 4 ล้านเหรียญสหรัฐ หรือ ประมาณ 104 ล้านบาท

สาเหตุที่ทำให้มีการทุ่มเทให้กับงานวิจัยนี้จำนวนมาก ในระหว่างประเทศอุตสาหกรรมก็คือ การแข่งขันเพื่อเป็นผู้นำทางด้านอุตสาหกรรมยุคใหม่ ได้มีการเปรียบเทียบลำดับความ สำคัญของการค้นพบสิ่งประดิษฐ์ของวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ก่อให้เกิดการปฏิวัติทางอุตสาหกรรมและความเป็นอยู่ของมนุษย์มี 3 สิ่งด้วยกัน คือ 1. หลอดไฟฟ้า 2. ทรานซิสเตอร์ และ 3. ก็คือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นักวิทยาศาสตร์หลายคนเชื่อว่าการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะก่อให้เกิด การเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีมากกว่า 2 ครั้งก่อน เพราะว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ได้มากกว่า 15 สาขา ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้การประยุกต์สภาพการนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดได้ เช่น สายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะก่อให้เกิดการสูญเสียในสายส่งจากโรงไฟฟ้าถึง แหล่งผู้บริโภค อุปกรณ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่จะสามารถลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ เร็วขึ้นไปอีก ยานขนส่งที่ลอยอยู่เหนือราง โดยอาศัยสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่ทำจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เครื่องมือทางการแพทย์หลายชนิด นอกจากนี้ยังมีสาขาอื่นอีกมาก

สำหรับงานวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้เริ่มต้นทำ วิจัยอย่างจริงจังมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 โดยทำการศึกษา ทดลอง สร้างชุดทดลองที่จำเป็นขึ้นเอง อาทิเช่น ชุดเตาเผาความร้อนสูง เครื่องอัดเม็ด กระจบอกรเก็บความเย็นสำหรับใส่ชิ้นงานในการ ทดสอบ รวมทั้งวงจรไฟฟ้าต่างๆ ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูล

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นสาร เซรามิก เตรียมจากสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นเมื่ออุณหภูมิวิกฤตประมาณ 92 K สามารถแสดงคุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้อย่างสมบูรณ์ อันได้แก่ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect) การไร้ความต้านทาน (Zero Resistance) และ ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee effect)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเริ่มจากการแนะนำให้รู้จักตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การเตรียมห้องปฏิบัติการ การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยกระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้นมา การวัดคุณสมบัติต่างๆ ตลอดจนการศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้งาน โดยมีรายละเอียดที่สามารถสรุปเป็นบทดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวแนะนำให้รู้จักตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก และความสำคัญของสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดในด้านต่างๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์ ระบบกำลัง วิทยาศาสตร์ แพทย์ศาสตร์ เป็นต้น

บทที่ 2 เป็นการเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยอาศัย ผลการทดลองและทฤษฎียุคเก่ามาเป็นแนวทาง โดยจะกล่าวถึง การเกิดสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวด ปรากฏการณ์การไร้ความต้านทาน การทำลายสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวด วงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ประเภทของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทฤษฎีจุดภาคของสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่กล่าวถึงทฤษฎีของลอนดอนและสมการลอนดอน

บทที่ 3 เป็นการเสนอการทดลอง เตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยจะเริ่มจาก การเสนอการเตรียมห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือวัดคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ จากนั้นจะได้เสนอ การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ตระกูลอิตเทรียม การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง การหาอุณหภูมิสูงที่สุดที่สามารถใช้ได้ในการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O การทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในสารเผา การเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากสารประกอบไนเตรต การเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากสารประกอบสำเร็จรูป การทดลองสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง Y-Ba-Cu-O โดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆกันเสนอเทคนิคหาปริมาณออกซิเจนในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง โดยวิธีไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน และสุดท้ายของบทนี้เป็นการทดลองเพื่อหาชนิดของพาหะนำประจุเอกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O นำไปใช้

บทที่ 4 จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง เป็นอุปกรณ์ตรวจจับทางสนามแม่เหล็ก โดยจะทำการศึกษา ผลของความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง การศึกษาปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้า ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ Y-Ba-Cu-O และผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่จะเกิดสภาพการจำสนามแม่เหล็ก

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและวิจารณ์ งานวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้รวมทั้งการเสนอแบบจำลองโครงสร้างเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง อีกด้วย



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes	2
รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้า ของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	4
รูปที่ 1.3 โครงสร้างผลึกของ $(La, Ba)_2CuO_4$	5
รูปที่ 1.4 โครงสร้าง Octaheral Structure ของออกซิเจน จุดดำกึ่งกลาง คือ ทองแดง	6
รูปที่ 1.5 Wave functions ของทองแดงและออกซิเจนแนวระนาบ	6
รูปที่ 1.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O	7
รูปที่ 1.7 แสดงแนวทางการประยุกต์ใช้งานสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในอนาคต	12
รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลม ที่วางอยู่ใน สนามแม่เหล็กขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกวิกฤต จะเห็นว่าเส้นแรงเหนี่ยวนำ แม่เหล็ก(B) ถูกผลักออกจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมทันที	15
รูปที่ 2.2 โลหะรูปร่างแหวนที่ถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก	18
รูปที่ 2.3 การผันแปรของค่าความซึมลึกตามอุณหภูมิ	22
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่าง ๆ	23
รูปที่ 2.5 สถานะต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปแผ่นระนาบวางในสนามแม่เหล็ก ที่ขนานกับผิวระนาบ	25
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแม่เหล็ก (magnetization) กับค่า ความซึมสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	26
รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ทั่วไปที่มีการนำเสนอ	27

รูปที่ 3.2	ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.	28
รูปที่ 3.3	เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อุณหภูมิสูงถึง 1,050 องศาเซลเซียส	29
รูปที่ 3.4	ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาความร้อนสูง 1,200 องศาเซลเซียส กราฟแสดง เวลาที่ใช้ในการอุ่นเตา	30
รูปที่ 3.5	แผนผังแสดงชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผา	30
รูปที่ 3.6	ชุดอัดเม็ดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซรามิก แบบใช้แรงกด	31
รูปที่ 3.7	เครื่องอัดไฮดรอลิก แรงอัดสูงสุด 10 ตัน	32
รูปที่ 3.8	เบ้าอัดแบบขนาดต่างๆ	32
รูปที่ 3.9	อุปกรณ์สำหรับผสมสารในกระบวนการสร้าง	33
รูปที่ 3.10	ถังเก็บไนโตรเจนเหลว	34
รูปที่ 3.11	ชุดทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	35
รูปที่ 3.12	วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	36
รูปที่ 3.13	เครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	37
รูปที่ 3.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางหัววัดถึง ไนโตรเจนเหลว ของเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตที่สร้างขึ้น	38
รูปที่ 3.15	ชุดอุปกรณ์สำหรับบัดกรี ต่อสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก	38
รูปที่ 3.16	แผนผังแสดงกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ทั้งหมด	39
รูปที่ 3.17	แผนผังกระบวนการสร้างซึ่งถูกกำหนดอุณหภูมิสำหรับเผาสารประกอบแล้ว	43
รูปที่ 3.18	ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)	46
รูปที่ 3.19	วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	47
รูปที่ 3.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิปกติ ($25^{\circ}C$)	47
รูปที่ 3.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน	48
รูปที่ 3.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะเกิดปรากฏการณ์ฮิลส์บี	49
รูปที่ 3.23	ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	49

รูปที่ 3.24	แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการมาตรฐาน สำหรับสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์	51
รูปที่ 3.25	แผนผังกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ จากสารประกอบไนเตรท	55
รูปที่ 3.26	แสดงแผนผังกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยใช้สารประกอบสำเร็จรูป type 1230G	58
รูปที่ 3.27	ภาพถ่ายผิวหน้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O อัตราส่วนต่าง ๆ	62
	ก. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	
	ข. $Y_2Ba_3Cu_5O_{7-x}$	
	ค. $YBaCu_3O_y$	
	ง. $Y_5Ba_6Cu_{11}O_y$	
	จ. $YBa_2Cu_4O_{7-x}$	
รูปที่ 3.28	การไตเตรตเพื่อหาปริมาณออกซิเจนในเนื้อสาร ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก	65
รูปที่ 3.29	แผนผังแสดงขั้นตอนการหาปริมาณออกซิเจนในเนื้อสาร ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดเซรามิก โดยวิธีไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน	66
รูปที่ 3.30	การหาชนิดของพาหะนำประจุเอกในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	69
รูปที่ 4.1	วงจรการทดลองวัดสนามแม่เหล็ก ด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	71
รูปที่ 4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะได้รับสนามแม่เหล็กความเข้ม 10 เกาส์	73
รูปที่ 4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะได้รับสนามแม่เหล็กความเข้มต่างกัน	74
รูปที่ 4.4	ชุดทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะเกิดการจำสภาวะแม่เหล็กไฟฟ้า	78
รูปที่ 4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะแสดงการตรวจจับนิวตรอนแม่เหล็กอ่อน	81
รูปที่ 5.1	สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างภายในของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อุณหภูมิสูง ชนิดเซรามิก ส่วนที่เกิดสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด เรียกว่า ส่วนการนำไฟฟ้ายิ่งยวด (superconductor part)	85
รูปที่ 5.2	แสดงการใช้แบบจำลองโครงสร้างอธิบาย การเสียสภาพการนำไฟฟ้า ยิ่งยวด	85
ก.	แสดงสภาพที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	
ข.	แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารขนาด V_{ext} เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอก B_{ext} ขณะที่มีการแสวกฤตไหล	
ค.	แสดงให้เห็นว่า ไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสาร เนื่องจากมี เส้นทางเดินของกระแสต่อเนื่องกัน	
ง.	แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารขนาด V_{trap} เนื่องจากการมีแทรปสนามแม่เหล็กไว้ก่อน	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	แสดงผลการทดลองเผาสารประกอบ Y-Ba-Cu-O ที่อุณหภูมิสูง นาน 10 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการสร้าง สำหรับห้องปฏิบัติการฯ	42
ตารางที่ 3.2	แสดงเวลาที่ใช้ทดลองเผาสารแตกต่างกัน	45
ตารางที่ 3.3	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ทั้ง 4 ชุด	50
ตารางที่ 3.4	ผลการวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	53
ตารางที่ 3.5	ผลการวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สร้างจากสารประกอบไนเตรต	56
ตารางที่ 3.6	ผลการวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สร้างจากสารประกอบสำเร็จรูป 1230G	59
ตารางที่ 3.7	แสดงปริมาณสารประกอบที่จะใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ตามอัตราส่วนต่าง ๆ	60
ตารางที่ 3.8	ผลการทดสอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ที่อัตราส่วนต่างกัน ทั้ง 5 ชุด	61

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กระแส	current
กระแสไฟฟ้ายิ่งยวด	supercurrent
กระแสไฟฟ้าคงสภาพ	persistent current
กระแสไฟฟ้าวิกฤต	critical current
การกระเจิงของอิเล็กตรอน	electron scattering
การไร้ความต้านทาน	zero resistance
กัลวานอ์มิเตอร์	galvanometer
เกาส์	gauss
ความเหนี่ยวนำ	inductance
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	current density
ความต่างศักย์	voltage
ความต้านทาน	resistance
เคลวิน	kelvin
เครื่องกำเนิดแรงดัน	generator
เครื่องบันทึก 2 แกน	x-y recorder
ค่าความซึมลึกเฉพาะ	characteristic penetration depth
ค่าความซึมลึกของลอนดอน	London penetration depth
ค่าความซ่านซึมได้	permeability
ค่าสภาพอ่อนไหว	susceptibility
เซรามิก	ceramic
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	superconductor
ตัวขีปนาวุธ	rial guns
เตตระทราโกนอล	tetragonal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ทองแดง (คอปเปอร์)	Copper
เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K	type K thermocouple
ไนโตรเจนเหลว	liquid nitrogen
แบเรียม	Barium
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	Meissner effect
ปรากฏการณ์ซิลส์บี	Silsbee effect
ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก	Memory effect
ไฟฟ้าพาหะนำประจุเอก	majority carrier
เพอโรวสกีต	perovskite
แมกนีโตมิเตอร์	magnetometer
แม่เหล็กขามาเรียมโคบอลต์	Samarium-Cobalt magnet
รอยต่อโจเซฟสัน	Josephson junction
รอยต่อโอห์มมิก	Ohmic contact
ระบบ SMES	Superconductor Magnetic Energy Storage system
ระบบ MRI	Magnetic Resonance Imaging
ระบบ NMR	Nuclear Magnetic Resonance
ระบบ CAT	Computerized Axial Tomography
รถไฟแมกเลฟ	Magnetically Levitated Train
การสวิตช์	switching
สควิด	SQUID : Superconducting Quantum Interference Device
สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	superconductivity
สภาพแม่เหล็ก	magnetization
สภาพแม่เหล็กไดอา	diamagnetic

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
เส้นแรงแม่เหล็ก	magnetic flux
ส่วนที่เกิดการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor part
แหล่งจ่ายกำลัง	power supply
อินเดียม	Indium
ออสซิลโลสโคป	Oscilloscope
ไอโอดิเมตริก ไตเตรชัน	iodometric titration
อุณหภูมิวิกฤต	Critical temperature
ออร์โธรมบิค	orthorhombic
อภินาตด้วยแม่เหล็กนิวเคลียร์	nuclear magnetic resonance
ฮีเลียมเหลว	liquid helium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

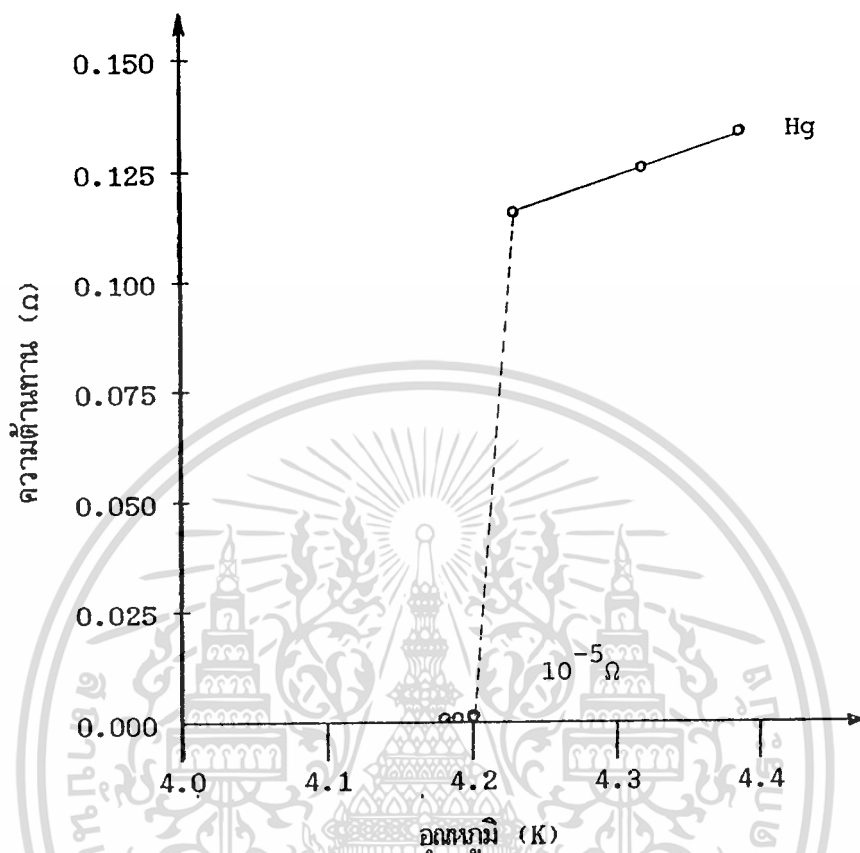
โดยปกติตัวนำไฟฟ้าทั่วไป จะมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เนื่องจากผลของความต้านทานไฟฟ้าที่มีอยู่ในตัวนำนั้นๆ แม้แต่ทองแดงซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวนำที่ดีมากที่สุดตาม ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือ ตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทานไฟฟ้า สามารถนำไฟฟ้าปริมาณสูง ๆ ได้ โดยที่ไม่เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนดังที่เกิดกับตัวนำธรรมดา สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2454 แต่ในยุคแรก ๆ นี้ เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมักจะอยู่ในช่วงที่ไม่เกินจุดเดือดของฮีเลียมเหลว (อุณหภูมิ 4.2 K) จนมาถึงช่วงปี พ.ศ. 2530 นักวิจัยสามารถทำสารเซรามิกเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิจุดเดือดของ ไนโตรเจนเหลว

ปัจจุบันการวิจัย ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้แพร่กระจายไปทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอุตสาหกรรม สาเหตุสำคัญที่ทำให้มีการทุ่มเทวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกันเป็นอย่างมาก เนื่องจาก ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำนั้น จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเทคโนโลยีอย่างมากและรวดเร็วเกินคาด คล้ายกับที่ทรานซิสเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2490 ได้เคยเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ให้เกิดขึ้นมากมาย

1.1 การค้นพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักฟิสิกส์ชาวดัตช์ชื่อ Heike Kamerlingh Onnes หลังจากที่เขาส่งสามารถเตรียมฮีเลียมเหลวได้สำเร็จในปี พ.ศ. 2451 ด้วยวิธีการลดอุณหภูมิและเพิ่มความดันให้กับก๊าซฮีเลียม ปี พ.ศ. 2454 Onnes ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ เขาพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท ลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 K (K แทน องศาเคลวิน เป็นมาตราของอุณหภูมิ ซึ่งศูนย์องศาเคลวิน ประมาณ -273 องศาเซลเซียส) หรือเรียกว่า เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 K เรียกอุณหภูมิต่ำสุดที่สารตัวนำสามารถเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature : T_c) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) กับอุณหภูมิ (T) ของปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes แสดงในรูปที่ 1.1 นอกจากนี้ Onnes ยังพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะอื่นๆ ทำให้ Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2454

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้า กับ อุณหภูมิของปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

หลังจากการทดลองของ Onnes ก็มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมาก ได้หันมาทดลองค้นคว้า เพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงชันกว่าเดิม ปี พ.ศ.2506 ได้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 K จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) ปี พ.ศ.2512 ก็สามารเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตเป็น 20 K และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 20 K นับเป็นครั้งแรกที่ใช้ตัวทำความเย็นตัวอื่นที่ไม่ใช่ฮีเลียมเหลว

เวลาผ่านไปอีกกว่า 30 ปี อุณหภูมิวิกฤตถูกทำให้เพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากสารประกอบของธาตุ ไนโอเบียมกับเจอร์เมเนียมคือ Nb₃Ge เป็น 23.2 K ในปี พ.ศ.2516 ไม่วากรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

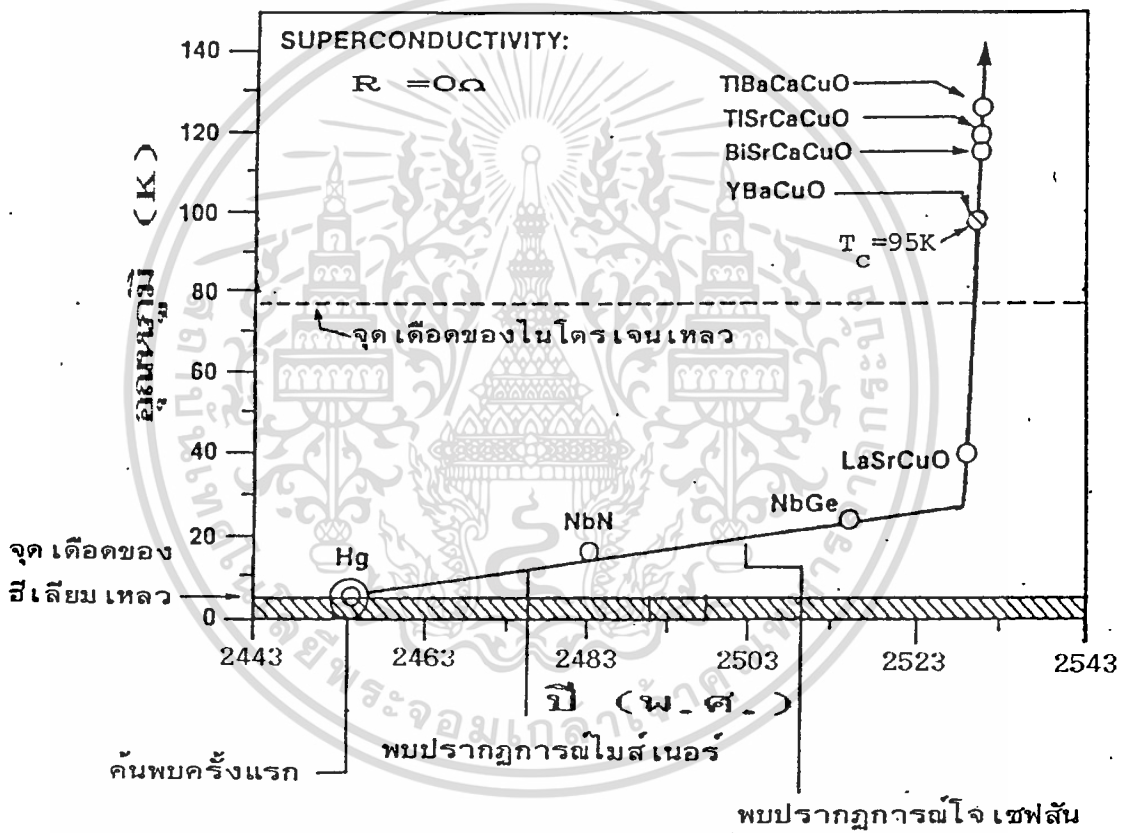
และในปีนี้เองที่นาย Johnston ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในกลุ่มของ ชาติลิเทียม - โทเทเนียม- ออกซิเจน คือ LiTi_2O_4 ที่อุณหภูมิวิกฤต 13.7 K ในปี พ.ศ.2518 Slight ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภท Perovskite คือ $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ ที่ $T_c = 13\text{ K}$ ทั้ง 2 ตัวนี้ต่างจากปกติตรงที่ ออกไซด์ของสารประกอบเหล่านี้มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าที่ควรจะเป็น จากการวิจัยพบว่า $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ จะให้อุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่ค่า X ต่าง ๆ กัน ทำให้เป็นที่คาดหวังว่า ออกไซด์ดังกล่าวจะเป็นหนทางนำไปสู่การค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

จนกระทั่งปี พ.ศ. 2526 Karal Alex Muller และ Johannes George Bednorz นักวิจัยของ IBM Zurich Research Laboratory ทำการทดลองโดยใช้ส่วนผสมจากอัลลอยด์ของโลหะ มาเป็นโลหะออกไซด์ (Metallic oxide) ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะหลายชนิดกับออกซิเจน หรือคือวัสดุเซรามิก และในเวลา 3 ปี ก็ได้ค้นพบสารประกอบที่สามารถเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้จาก ชาติแบเรียม - แลนทานัม - ทองแดง - ออกซิเจน คือ $\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_5\text{O}_{5(3-x)}$ โดยการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อ $X = 1$ และ $X = 0.75$ ได้อุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 35 K

ในปี พ.ศ.2530 Paul C.W. Chu และทีมวิจัยของมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองเปลี่ยน ชาติแบเรียม เป็น สตรอนเชียม ที่มีขนาดของอะตอมที่เล็กกว่า แบเรียม ปรากฏว่าทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นเป็น 54 K จากนั้น กลุ่มวิจัยของ C.W.Chu ก็ได้ทดลอง เปลี่ยน ชาติแลนทานัม เป็น ชาติอิตเทรียม สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95 K สร้างความตื่นเต้นให้กับวงการฟิสิกส์ทั่วโลก เพราะว่าสามารถที่จะใช้ไนโตรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 K ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของ Chu ไนโตรเจนเหลวนี้มันมีราคาถูกมากและเตรียมได้ง่ายกว่าตัวทำความเย็นอื่นที่เคยใช้มา

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มของ แบเรียม - อิตเทรียม - ทองแดง - ออกซิเจน มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ซึ่งโครงสร้างแบบนี้คล้ายคลึงกับโครงสร้างทางเซรามิกประเภท K_2NiF_4 ที่เรียกว่า Perovskites แต่เซรามิกแบบนี้เป็นชนิดที่จำนวนออกซิเจนมีไม่ครบ หรือเรียกว่า Oxygen Defect Perovskites อุณหภูมิวิกฤตของธาตุในกลุ่มนี้มันว่าสูงมากเมื่อเทียบกับที่เคยสร้างมา จะเห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่พบนี้ เป็นการทำทดลองที่อาศัยข้อมูลที่มีอยู่แล้วมิใช่เป็นการพบโดยบังเอิญ ช่องทางนี้ถ้าเป็นเอกสารที่ส่งมอบสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าที่จะเน้นอุณหภูมิวิกฤตจึงยังมีทางเป็น ไป ได้ นักวิทยาศาสตร์ยังคงตั้งเป้าที่ตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

หรือประมาณ 293 K ปัญหาอีกจำนวนมากยังคงต้องถูกแก้ไขใหม่ เช่น สันามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสจำนวนมาก ความยากลำบากในการทำให้เป็น เส้น วง และรูปร่างอื่น ๆ แต่นักวิจัยส่วนใหญ่เชื่อว่าปัญหานี้จะผ่านพ้นไปได้ ความก้าวหน้าของการพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสรุปเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 1.2

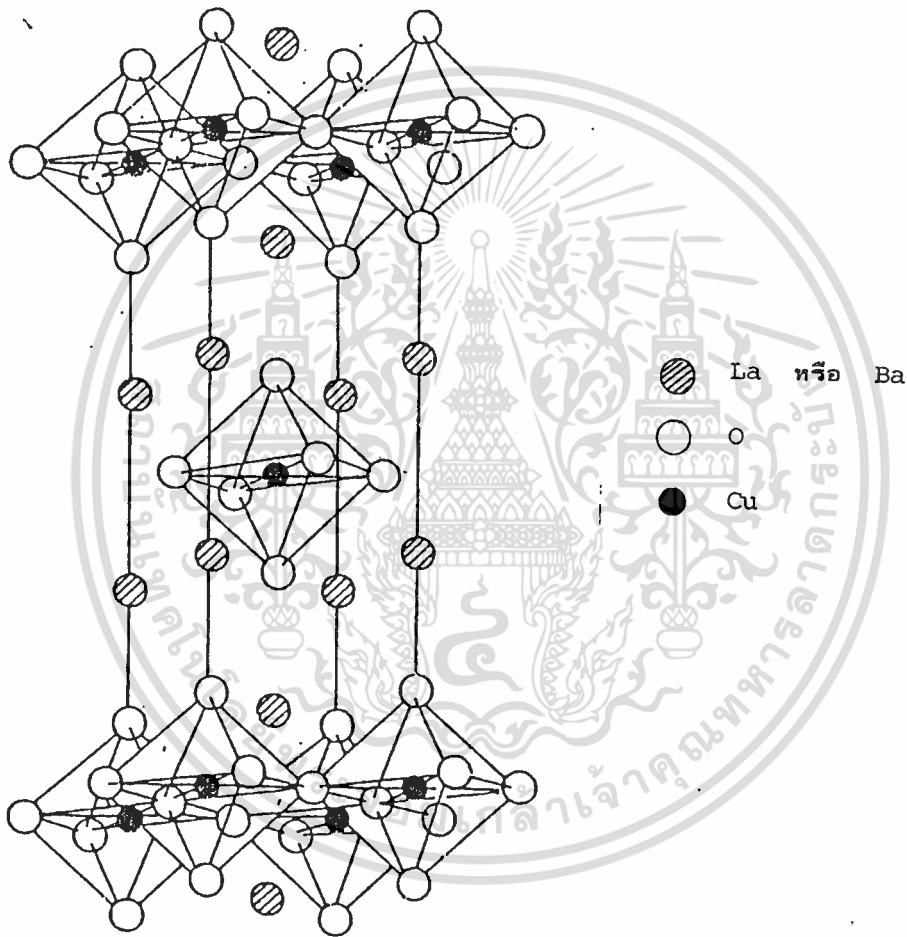


รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้า ของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.2 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

จากการที่ทีมนักวิจัยของบริษัทIBM ได้ค้นพบสูตรสารประกอบของเซรามิก ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เกิดการเปลี่ยนแปลงมาก ความสนใจและการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นักวิทยาศาสตร์ต่างนำสูตรของบริษัท IBM ซึ่งประกอบด้วย ธาตุแบเรียม ธาตุแลนทานัม ธาตุทองแดงและธาตุออกซิเจน ไปทดลองดัดแปลงเพิ่มขึ้น ต่อมาก็มีผู้คิดค้นใช้ธาตุอิตเทรียมแทนแลนทานัม สารเซรามิกที่ได้รับรายงานว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง ที่น่าสนใจคือ La-oxide และ Y-oxide โดย La-oxide จะมีสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 40 K และ Y-oxide จะมีสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 95 K

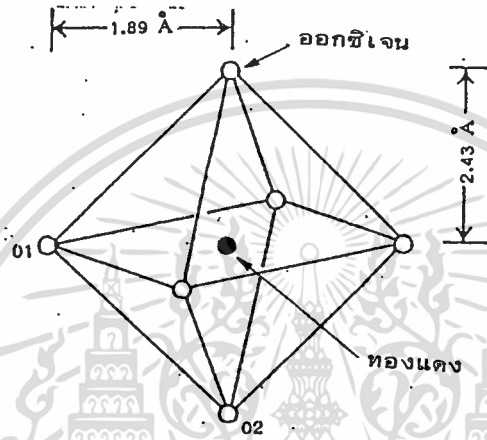


รูปที่ 1.3 โครงสร้างผลึกของ $(La, Ba)_2CuO_4$

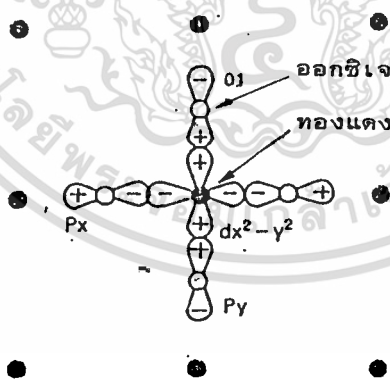
La-oxide

La_2CuO_4 เป็นสารประกอบที่มีสภาพเป็นฉนวน มีโครงสร้างทางเคมีเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เมื่อผสมแบเรียม (Ba) เข้าไปแทนส่วนของแลนทานัม (La) ในเปอร์เซ็นต์ที่สูง สารประกอบนั้นจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยมีโครงสร้างทางเคมีเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเตตระทราโกนอล (Tetragonal) รูปที่ 1.3 แสดงถึงรูปโครงสร้างผลึกของ $(La, Ba)_2CuO_4$ ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ Perovskite Structure จะเห็นว่าอะตอมของทองแดง (Cu) เป็นแกนผลึกรูปตาข่าย ลักษณะแบบเตตระทราโกนอล แต่ละอะตอมของทองแดงจะล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน (O) 6 อะตอม ในรูปลักษณะรูปเหลี่ยมแปดด้าน (Octahedron) อะตอมของทองแดงจะเรียงกันเป็นชั้นในระหว่างอะตอมของทองแดง จะมีอะตอมของแลนทานัม (La) แทรกอยู่



รูปที่ 1.4 โครงสร้าง Octahedral Structure ของออกซิเจน จุดดำกึ่งกลางคือทองแดง



รูปที่ 1.5 Wave functions ของทองแดงและออกซิเจนบนแนวระนาบ

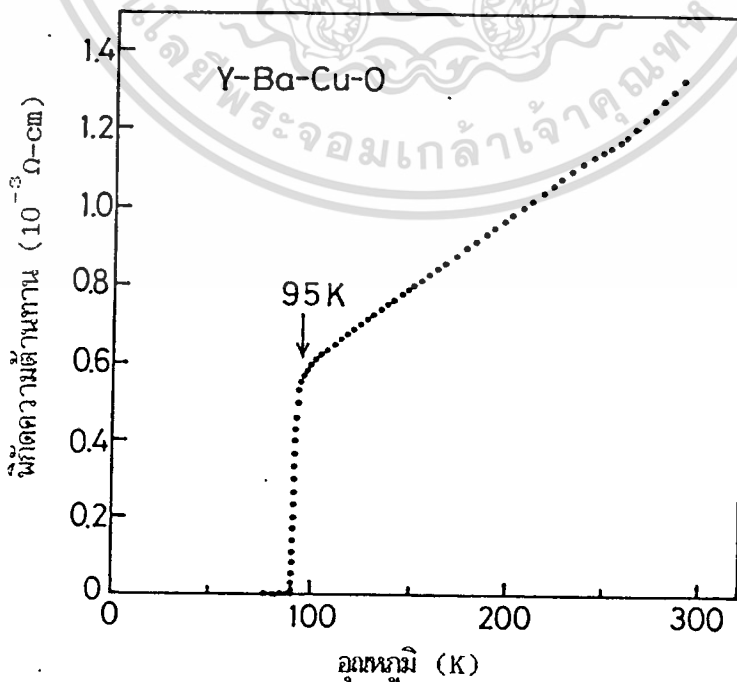
อย่างไรก็ตามอะตอม 6 ตัว ของออกซิเจนที่อยู่รอบอะตอมของทองแดง ก็ไม่ได้วางตัวเป็นรูปแปดด้านที่เท่ากันหมดทุกด้าน ระยะระหว่างอะตอมของออกซิเจนในแนวระนาบ ค่อนข้างจะอยู่ใกล้ชิดกันมาก (ประมาณ 1.89 \AA) เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมของออกซิเจนในแนวตั้ง (ประมาณ 2.43 \AA) ดังรูปที่ 1.4 อาจจะด้วยเหตุที่ว่า เมื่ออะตอมของทองแดงและอะตอมไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของออกซิเจนเคลื่อนตัวมาซ้อนทับกันในแนวระนาบ ทำให้เกิดสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดชั้นในระนาบนั้น ดังรูปที่ 1.5

ต่อมาได้มีผู้ศึกษาเอาธาตุแบเรียม (Ba), สตรอนเชียม (Sr) และแคลเซียม (Ca) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่ต่างกันโครงสร้างของอะตอม มาใช้ในสารเซรามิกในรูปของ $(Ba, Sr, Ca)_2LaCuO_4$ จากการศึกษาอย่างละเอียดได้พบว่า ค่าอุณหภูมิวิกฤตของสตรอนเชียม (Sr) จะมีค่าสูงที่สุด และรองลงมาคือ แบเรียม (Ba) และแคลเซียม (Ca)

Y-oxide

หนังสือพิมพ์ญี่ปุ่นฉบับประจำวันที 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2530 ได้รายงานว่ กลุ่มวิจัยนำโดย ด็อกเตอร์ พอล ซี. ดับบลิว. จู (Paul C.W. Chu) แห่งมหาวิทยาลัยฮุสตัน สหรัฐอเมริกา ได้ค้นพบสารออกไซด์ซึ่งเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิ 95 K แต่ก็ไม่ได้แจ้งว่าเป็นสารชนิดใด จากนั้น 1 อาทิตย์ ศาสตราจารย์ ฮิกามิ (Professor Higami) แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียวได้ประกาศว่า กลุ่มวิจัยของเขาได้ค้นพบสารออกไซด์ที่สามารถนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวและต่อมาก็เป็นที่ทราบชั้ดว่าสารออกไซด์นั้นคือ Y-Ba-Cu-Oxides ซึ่งก็คือ La-oxide นั้นเอง แต่เปลี่ยนเอาธาตุอิตเทรียม (Yttrium) เข้าไปแทนธาตุแลนทานัม รูปที่ 1.6 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัตินำไฟฟ้ายิ่งยวดของ Y-oxide



รูปที่ 1.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิจัยต้องประสบกับปัญหายุ่งยากในการกำหนดโครงสร้างผลึกของ Y-oxide ซึ่งค่อนข้างจะซับซ้อนกว่าที่กำหนดให้กับ La-oxide ในตอนแรกเป็นที่เข้าใจว่ามันน่าจะมีสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อมันมีโครงสร้างแบบ Brown millerite ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$) structure ต่อมาก็คิดกันว่ามันน่าจะเป็น double-layered perovskite Structure แต่จากการทดลองหลายครั้งก็เป็นที่แน่ใจว่าโครงสร้างของมันคือ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (มีรายงานว่าค่า $x=0.3$) และอัตราส่วนของ Y และ Ba เท่ากับ 1:2 จะให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูงที่สุด ปัจจุบันค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ทดลองได้สำหรับ Y-oxide ที่จะมีสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ คือ ประมาณ 100 K ซึ่งคาดว่าจะสูงกว่านี้ในไม่ช้า

1.3 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นมีความสามารถเหนือกว่าตัวนำธรรมดา 3 ข้อ ได้แก่

1. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีความต้านทานไฟฟ้าหรือความต้านทานเป็นศูนย์
2. ไม่มีผลของความร้อน เนื่องจากพลังงานที่สูญเสีย
3. ไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านทะลุ

ข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงได้รับความสนใจอย่างมาก ในการที่จะประยุกต์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงมาใช้งานด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น ความไวสูงขึ้นและรวดเร็วขึ้น ตัวอย่างที่พอจะเห็นได้ในตอนนี้ ได้แก่

1.3.1 งานทางอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของงานทางอิเล็กทรอนิกส์ น่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาก เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะพวกวงจรรวม ซึ่งมักจะเป็นวงจรรสำเร็จในตัวเดียว ซึ่งได้เปรียบในการใช้งานเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ใหญ่ ๆ ในกระบวนการสร้างวงจรรวมนั้น ซับซ้อนทั้งเรื่องลวดลายและการโคปซิงที่ทำการบรรจุลงตัวถัง การต่อขาโดยใช้ลวดออกสกรูเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โลหะเชื่อมต่อก จากวงจรรวมออกมาข้างกายนอก ความร้อนนับเป็นสิ่งสำคัญต่อวงจรรวม โดยเฉพาะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างยิ่งวงจรรวมที่มีรายละเอียดมากๆ ความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรรวม ขณะทำงาน ดังนั้นในการออกแบบผู้ออกแบบวงจรรวมจึงต้องมีการเว้นระยะห่างของตัวอุปกรณ์เพื่อให้มีพื้นที่ที่จะกระจายความร้อน ทำให้ต้องสูญเสียพื้นที่ในส่วนนั้นไป แต่ในกรณีที่นำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวมาใช้ในวงจรรวม จะไม่เกิดปัญหาของความร้อนตัวอุปกรณ์ในวงจรจึงสามารถออกแบบให้อยู่ใกล้กันได้มากซึ่งในกรณีนี้ยังช่วยลดเวลาของการส่งผ่านสัญญาณอีกด้วย

การใช้งานอีกแบบหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ คือรอยต่อโจเซฟสัน ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในลักษณะของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ที่สามารถทำงานเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ได้ เป็นร้อยเท่า ถ้านำมาใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้ความสามารถของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นมากขณะที่ขนาดเล็กลงมาก รอยต่อโจเซฟสันนี้ถูกพัฒนาขึ้นในปีพ.ศ. 2505 โดย Brian Josephson รอยต่อโจเซฟสันประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาว 2 ส่วนที่ถูกแยกด้วยชั้นกันฉนวนบาง ๆ อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านชั้นฉนวนได้โดยการสร้างกระแสสูง ๆ เราใช้การเปลี่ยนแปลงระดับของกระแสในกรณีที่ใช้รอยต่อโจเซฟสัน เป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์

1.3.2 งานด้านระบบกำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเริ่มจาก เครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่ภาคจ่ายกำลังผ่านเครือข่ายไปสู่ผู้บริโภคนั้น สามารถจะลดค่าใช้จ่ายและพลังงานไปได้มากเมื่อใช้สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยาวแทนระบบทั่วๆ ไปที่ใช้กันอยู่

เครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่พันด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวขณะที่ให้กระแสเท่ากับที่ให้ตัวนำธรรมดา จะทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่าและทำงานน้อยกว่ากระแสที่ผลิตได้จะถูกจ่ายออกไปตามโครงข่ายที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวเป็นหลัก ทำให้ความสิ้นเปลืองลดลงจากระบบทำงานปกติ ซึ่งจะต้องสูญเสียไปประมาณ 20 % ของไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดขึ้น

เมื่อพลังงานไฟฟ้าถูกผลิตขึ้นครั้งหนึ่ง ๆ จะถูกส่งไปยังผู้บริโภคเท่าที่มันผลิตได้ เป็นส่วนมาก เนื่องจากปัจจุบันไม่มีวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานจำนวนมากจึงจำเป็นต้องมีการประมาณว่าผู้บริโภคจะใช้กระแสไฟฟ้าปริมาณเท่าใด และปรับการผลิตให้เหมาะสมกับความ ต้องการตามการคาดการณ์ล่วงหน้า กรณีที่ผู้บริโภคต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าปกติจะมีพลังงานบางส่วนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเหลือ การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้เพื่อลดการสูญเสียเปล่าได้ ระบบ SMES หรือ Superconductor Magnetic Energy Storage ซึ่งเหมือนกับการทดลองของ Onnes ที่ได้เห็นว่าการกระแสไฟฟ้าให้ไหลในวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยที่กระแสไฟฟ้าไม่ลดลงเลย เมื่อเวลาผ่านไป เราจึงสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ยาวนาน ระบบ SMES จะถูกต่ออยู่กับโครงข่ายกำลัง ในช่วงเวลาที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีจำนวนน้อย พลังงานส่วนใหญ่จะถูกนำเข้าสู่อุปกรณ์ SMES และในระหว่างที่ปริมาณไฟฟ้ามีความต้องการอย่างมากกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในระบบ SMES ก็จะกลับไปสู่ระบบโครงข่ายกำลัง

ประโยชน์ของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเก็บและการกระจายพลังงานเท่านั้น สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ยังมีประโยชน์ในการพัฒนาระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย ตัวอย่างเช่น เครื่องซักผ้า เครื่องล้างจาน และเครื่องเป่าผม ในวันหนึ่งข้างหน้า อาจจะสร้างด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งใช้พลังงานน้อยลง และมีขนาดเล็กลงมาก

1.3.3 ด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์

สาขาวิทยาศาสตร์และการแพทย์ จะได้รับผลดีอย่างมากจากสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรง และการตรวจจับสนามแม่เหล็กอ่อนๆ

นักฟิสิกส์นั้นได้ใช้ประโยชน์ของแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมานานแล้ว สำหรับใช้กำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรงเพื่อศึกษาการชนกันของอะตอม ในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ นักฟิสิกส์ได้พยายามสร้าง magnetic bottle เพื่อเก็บปฏิริยาฟิวชั่น โดยใช้แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยหวังว่าในอนาคตอันใกล้นี้ จะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่สามารถเก็บปฏิริยาฟิวชั่นได้

สควิดส์ (SQUIDS) เป็นชื่อย่อของ Superconducting Quantum Interference Device สควิดส์ประกอบด้วยรอยต่อโจเซฟสัน 2 รอยต่อที่ประกบต่อเข้าด้วยกัน เป็นวงแหวน รอยต่อโจเซฟสันเป็นชั้นแบบแซนด์วิชของฉนวนชั้นบาง ๆ ที่อยู่ระหว่างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ชั้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามชั้นบาง ๆ ได้ตามขบวนการที่เรียกว่า tunneling

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสควิดส์นี้ถูกวางไว้ในสนามแม่เหล็ก แรงดันของกระแสที่มีการไหลผ่านตัวมัน จะเปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก สควิดส์เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูงสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็ก สควิดส์จึงมักถูกอ้างถึงบ่อย ๆ เช่น ในแมกนีโตมิเตอร์ (magnetometer)

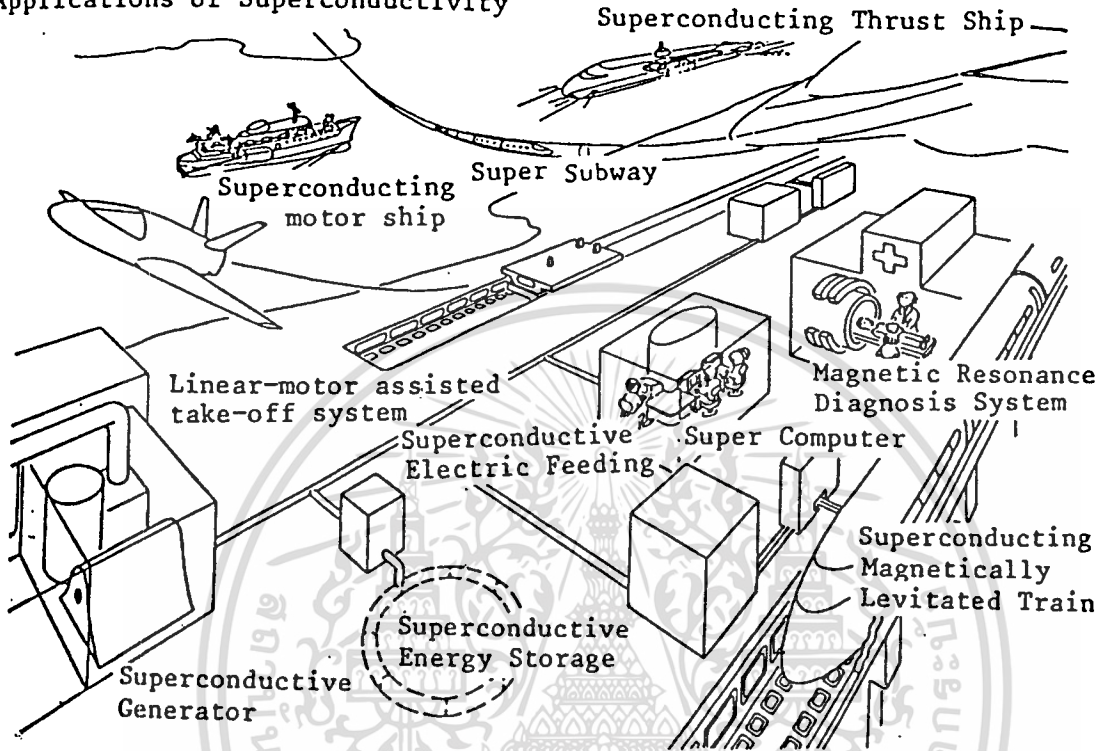
เมื่อเร็ว ๆ นี้บริษัท IBM ได้ทดลองสร้างสควิดส์โดยใช้วัสดุการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง ประกอบด้วยรอยต่อ thin-film โจเซฟสัน 2 ชั้น มีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ 68 K โดยใช้ไนโตรเจนเหลวที่ลดความดันลงแล้วเป็นตัวหล่อเย็น

ในทางการแพทย์สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกนำมาใช้ในเครื่องมือสร้างภาพ ได้แก่ เครื่อง NMR (Nuclear Magnetic Resonance) หรือ MRI (Magnetic Resonance Imaging) ซึ่งสามารถสร้างภาพรายละเอียดของอวัยวะภายใน ภาพของ MRI คล้ายกับ CAT (Computerized Axial Tomography scanning) เป็นระบบที่ใช้ข้อมูลจากรังสีเอ็กซ์ในหลาย ๆ มุม แต่ CAT ไม่มีความไวต่อเนื้อเยื่ออ่อน และต้องใช้ในการแผ่รังสี ส่วน MRI นั้นมีความไวสูงมากกับเนื้อเยื่ออ่อน และไม่ต้องผ่านการแผ่รังสี เพราะใช้สนามแม่เหล็กแรง ๆ ที่สร้างขึ้นโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าการนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อร่างกายของคนถูกฉายด้วยสนามแม่เหล็กนั้น โปรตอนในน้ำและอนุภาคอื่น ๆ จะเรียงตัวเองให้มีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก จากนั้นจะปล่อยพลังงานความถี่วิทยุที่ความถี่ที่แน่นอนที่เหมาะสมเพื่อทำให้โปรตรอนถูกกระตุ้น เมื่อลดการปล่อยพลังงานลง โปรตอนจะกลับมายังสถานะเดิมและคายพลังงานออกมา พลังงานนี้จะถูกตรวจจับและนำมาสร้างภาพ อุปกรณ์ MRI ปัจจุบันใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก นอกจากนี้ MRI ยังสามารถใช้เป็นเครื่องวัดการไหลของเลือดในบริเวณศีรษะและคอ โดยไม่มีผลกระทบต่อคนไข้ ทำให้สะดวกในการวินิจฉัยโรคที่เกี่ยวกับเส้นโลหิตในสมองและระบบประสาท การใช้ MRI ร่วมกับ การวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อตรวจเนื้อเยื่อหัวใจ เพื่อรักษาผู้ป่วยโรคหัวใจ

1.3.4 การคมนาคม

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถนำมาใช้กับการคมนาคมได้หลายทาง แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถใช้กับรถไฟแม็กเลฟที่วิ่งเหนือราง สามารถเคลื่อนที่ไปได้เร็วมาก มอเตอร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะถูกนำไปใช้ในเรือ และเรือดำน้ำ

Applications of Superconductivity



รูปที่ 1.7 แสดงแนวทางการประยุกต์ใช้งานสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

รถไฟแมกเลฟ (Maglev Trains) เป็นคำย่อของ Magnetically Levitated Trains เป็นรถไฟที่มีความเร็วสูงมาก มันจะลอยอยู่เหนือรางประมาณ 4 นิ้ว บนเบาะรองแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ไม่มีความเสียดทานที่ล้ามาจำกัดความเร็ว รถไฟแมกเลฟใช้กฎแม่เหล็กธรรมดา คือ ขั้วของแม่เหล็กที่เหมือนกันผลักกัน ระบบของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นกับการออกแบบแม่เหล็กส่วนหนึ่ง ถูกใช้เพื่อยกตัวรถไฟ และอีกส่วนถูกใช้เพื่อการขับเคลื่อนทางทิศทางการที่ต้องการ ในรถไฟแมกเลฟของญี่ปุ่นนั้น ได้ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำ ซึ่งต้องมีอุปกรณ์ทำความเย็นขนาดใหญ่ และมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อมีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงก็จะสามารถลดอุปกรณ์ทำความเย็นที่หนักมากนี้ได้ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงระยะหลังนี้ใช้ระบบทำความเย็นจาก ไนโตรเจนเหลวก็พอเพียง แต่มันก็ยังมีปัญหาด้านคุณสมบัติบางอย่างที่ยังจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.5 การทหาร

การใช้ประโยชน์ในด้านการทหารก็เกี่ยวข้องกับหลักการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว งานวิจัยในด้านการทหารยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถนำไปใช้ได้บนเรือรบทหาร และเรือดำน้ำ เรือขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์ซึ่งมีส่วนประกอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อุณหภูมิต่ำได้เคยถูกสร้างขึ้นทดสอบ เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

Rial guns หรือตัวขับมวล ใช้เพื่อเร่งลูกกระสุนปืนใหญ่เพื่อให้ความเร็วสูงมาก หลักการง่าย ๆ คือ กระสุนจะถูกเร่งอย่างทันทีตามทางที่ใช้วงแหวนสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Rial guns นี้อาจจะถูกนำไปติดตั้งบนรถถัง หรือเรือ นอกจากนี้ก็ยังมี Lasers และอุปกรณ์พวกตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นต้น

จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีความสำคัญมาก สามารถถูกนำไปใช้งานได้กว้างขวาง และนับว่าเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่กำลังจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีปัจจุบัน สถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการค้นคว้าและค้นพบ ขยายวงกว้างออกไปทั่วโลก ขณะที่นักวิทยาศาสตร์เร่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ค้นพบได้ใหม่ ๆ ในแต่ละวัน วิศวกรก็กำลังพยายามเปิดช่องทางเข้าสู่เทคโนโลยีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อการใช้งาน บริษัทเอกชนต่าง ๆ กำลังมองหาโอกาสและช่องทางการค้าที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นการแข่งขันระหว่างห้องปฏิบัติการ บริษัทและนักวิจัย จึงเพิ่มมากขึ้น

การพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อให้ใช้ได้กับอุณหภูมิห้องจะเป็นสิ่งที่ เป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมเทคโนโลยีสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นอย่างมาก ซึ่งห้องปฏิบัติการหลายแห่งกำลังศึกษาและรายงานอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อพยายามสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องจริง ๆ นอกจากนี้ความพยายามส่วนมาก ยังมุ่งตรงไปที่การพัฒนาประยุกต์ใช้งานสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดในอนาคต นักวิทยาศาสตร์อีกส่วนหนึ่งก็พยายามอธิบายว่าทำไมสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงจึงเกิดขึ้นได้

บทที่ 2 คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโลหะสารกึ่งตัวนำและสารประกอบต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ ทำให้สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ทันที อุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ หรือเกิดการเปลี่ยนสถานะ เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) และสารที่มีการเปลี่ยนสถานะ เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor)

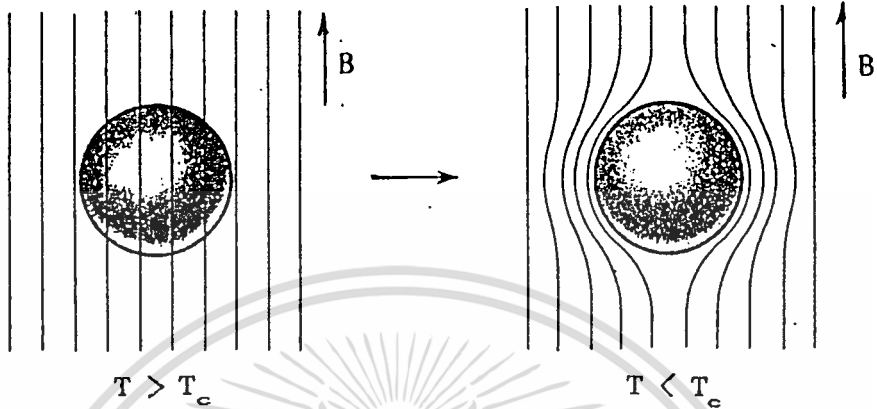
มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่า ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์หรือเกือบจะเป็นศูนย์ และได้สังเกตกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตลอดระยะเวลามากกว่าหนึ่งปี ปรากฏว่ามันยังคงไหลอยู่เช่นเดิม เรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนเป็นกระแสไฟฟ้าคงสภาพ (persistent current) ไฟล์ (File) และ มิลล์ (Mills) ได้ทำการทดลองและวัดเวลาสลายตัว (decay time) ของกระแสไฟฟ้า โดยใช้วิธีอภินาตด้วยแม่เหล็กนิวเคลียร์ (nuclear magnetic resonance) วัดสนามแม่เหล็กสัมพันธ์กับกระแสนิ่งยวด (supercurrent) เขาทั้งสองสรุปว่า เวลาสลายตัวของกระแสนิ่งยวดนี้มีไม่น้อยกว่าหนึ่งแสนปี

การศึกษาสมบัติทางสนามแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีผลมากเหมือนกับสมบัติทางไฟฟ้า กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กอ่อน ๆ มันจะประพาดตัวเหมือนกับสารแม่เหล็กไดอา (diamagnetic) อย่างสมบูรณ์ด้วยสนามแม่เหล็กภายในเป็นศูนย์ โดยผลึกความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กออกจากตัวมันทันทีเมื่อเราลดอุณหภูมิลงผ่านอุณหภูมิวิกฤต ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1 การเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด เป็นสถานะที่อิเล็กตรอนการนำของโลหะ อยู่ในลักษณะของอิเล็กตรอนเป็นคู่ ๆ อิเล็กตรอนจะเป็นระเบียบเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต และมันจะไม่เป็นระเบียบเมื่ออยู่เหนืออุณหภูมิวิกฤต

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถเกิดขึ้นในธาตุบริสุทธิ์ที่เป็นโลหะ สารประกอบระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังเกิดในสารประกอบพวกเซรามิก (ceramics) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต จะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ถูกผลักออกจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมทันที

ช่วงอุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งปัจจุบันทำได้สูงถึง $T_c = 155 \text{ K}$ สำหรับสารประกอบ Y-Ba-Cu-O-F ซึ่งเป็นพวกเซรามิก ต่อมาสร้างเป็นฟิล์มบางซึ่งเป็นผลึกเดี่ยวของ SrTiO_3 นอกจากนี้ยังมีพวกสารประกอบ อิทเทรียมแบเรียมคิวเปรต ($\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{9-x}$) มีอุณหภูมิวิกฤตที่ 91 K สำหรับสารกึ่งตัวนำจะมีอุณหภูมิต่ำ บางตัวต่ำถึง 0.01 K โลหะบางตัวไม่สามารถเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ถึงแม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1 K เช่น Li, Na, K ได้เคยมีการทดลองโดยลดอุณหภูมิต่ำกว่า 0.08 K , 0.09 K และ 0.08 K ตามลำดับ โลหะทั้งสามก็ยังคงเป็นสารตัวนำธรรมดา ทำนองเดียวกัน Cu, Ag และ Au ได้ถูกทำการทดลองจนอุณหภูมิต่ำกว่า 0.05 K , 0.35 K และ 0.05 K ธาตุทั้งสามยังคงเป็นสารตัวนำธรรมดา จากการคำนวณทางทฤษฎีทำนายได้ว่า ธาตุโซเดียมและโปแตสเซียมจะกลายเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตลอดทั้งก้อน จะต้องมียุณหภูมิต่ำกว่า 10^{-5} K แต่ซีเซียม (Cesium) เป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ $T_c = 1.5 \text{ K}$ ความดัน 110 กิโลบาร์ จากการสังเกตพบว่าธาตุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอม (atomic magnetic moment) ซึ่งเป็นพวกที่มีอิเล็กตรอนสปินไม่จับคู่ ไม่เป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ส่วนพวกที่เป็นตัวนำที่นั่นทำเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ไม่ตี และมีอุณหภูมิต่ำมาก สำหรับสารประกอบของโลหะ จะทำให้เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ง่ายกว่าพวกธาตุบริสุทธิ์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปรากฏการณ์การไร้ความต้านทานไฟฟ้า

เมื่อวัสดุสารเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น ขณะที่อุณหภูมิของวัสดุนั้น ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของวัสดุนั้นๆ ทำการทดลองวัดค่าความต้านทาน จะได้ค่าที่เป็นศูนย์ หรือประมาณศูนย์ ความต้านทานไฟฟ้าในสารตัวนำจะเป็นไปตามสมการ ที่ 2.1

$$\rho = m/ne^2 \tau_{(T)} \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ = ความต้านทานทางไฟฟ้า m = มวลของอิเล็กตรอน
 n = ความหนาแน่นของจำนวนอนุภาค e = ประจุไฟฟ้าของอนุภาค
 ไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตร $\tau_{(T)}$ = ช่วงเวลาปลอดการชนของอิเล็กตรอน

จากสมการ ค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เพราะเมื่ออุณหภูมิลดลง การสั่นของโครงผลึก ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิจะน้อยลง การกระเจิงของอิเล็กตรอนก็จะลดลงด้วย จำนวนอิเล็กตรอนชนกันน้อยลงช่วงการชนก็จะยาวขึ้นค่าความต้านทานจึงน้อยลง อุณหภูมิยิ่งต่ำมากช่วงปลอดการชนก็จะยาวขึ้นจนแทบไม่ชนกันเลย ความต้านทานทางไฟฟ้าจึงมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวต้นั้นค่าความต้านทานจะหายไปอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

2.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ในปีพ.ศ. 2476 ไมส์เนอร์ (W.Meissner) และ โอเชินเฟลด์ (R.Ochsenfeld) ได้ทดลองเกี่ยวกับสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสนามแม่เหล็กพบว่า ตัวนำในสภาพปกติจะยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปได้ แต่ถ้าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะผลักสนามแม่เหล็กออกไปจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)

จากผลการทดลองของไมส์เนอร์ แสดงว่า ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic) จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กนี้เองที่อนุภาคนิวตรอนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งมีสมการเป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

17

$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{H} + \bar{M}) \quad (2.2)$$

$$\bar{M} = \bar{H} \chi \quad (2.3)$$

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (2.4)$$

\bar{B} แทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

\bar{H} แทนความเข้มสนามแม่เหล็ก

\bar{M} แทนสภาพแม่เหล็ก (magnetization)

χ แทนค่าสภาพอ่อนไหว (susceptibility) ของแม่เหล็ก

μ_0 และ μ_r แทนค่าความซึมซับได้ (permeability) ของสุญญากาศ และค่าความซึมซับได้สัมพัทธ์

สำหรับกรณีตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้ว สมการ(2.2) , (2.3) และ(2.4) จะเขียน

ได้เป็น

$$\bar{M} = -\bar{H} \quad (2.5)$$

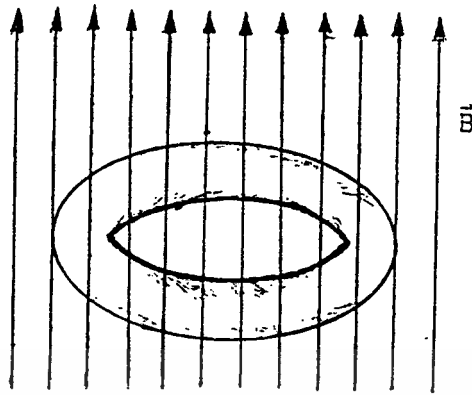
$$\chi = -1 \quad (2.6)$$

$$\mu_r = 0 \quad (2.7)$$

จากการที่ตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้ว แสดงอำนาจแม่เหล็กได้อันเอง จึงทำให้ตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้วมีคุณสมบัติทาง ไฟฟ้า-แม่เหล็ก แตกต่างไปจากตัวนำธรรมดา คือ นิจารณาวงแหวนตัวนำธรรมดาและวงแหวนตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้ว ขนาดเท่ากันวางในสนามแม่เหล็กภายใต้เงื่อนไขเดียวกันพบว่า เมื่อหยุดผ่านสนามแม่เหล็กเข้าไป วงแหวนตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้วจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาเอง ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไหลวนในวงแหวน สำหรับวงแหวนตัวนำธรรมดา จะไม่ปรากฏสนามแม่เหล็กเลย

2.4 วงแหวนตัวนำไฟฟ้าเชิงขั้ว

พิจารณาโลหะรูปวงแหวนถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์ (B) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา อันเป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I ไหลวนในวงแหวนนั้น โดยจะเป็นไปไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โลหะรูปวงแหวนที่ถูกรวมอยู่ในสนามแม่เหล็ก

ตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ที่เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$-A(dB/dt) = RI + L(dI/dt) \quad (2.8)$$

โดยที่ R แทนค่าความต้านทานของวงแหวน

t แทนเวลา

L แทนค่าความเหนี่ยวนำ(inductance) ของวงแหวน

A แทนพื้นที่หน้าตัดภายในวงแหวน

สมการ (2.8) ยังคงเป็นจริงในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งจะเขียน

สมการได้เป็น

$$0 = RI + L(dI/dt) \quad (2.9)$$

ถ้าให้ I_0 แทนกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น ค่าตอบของสมการ (2.9) จะเป็น

$$I = I_0 \exp(-Rt/L) \quad (2.10)$$

จากสมการ(2.10) จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงแหวนจะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล แต่ถ้าวงแหวนเกิดสภาพการนำไฟฟ้าที่ยาวด ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ สมการ (2.10) ก็จะเขียนได้เป็น

$$I = I_0 \quad (2.11)$$

จากสมการ(2.11) จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงแหวนจะคงที่ตลอดเวลา เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไฟฟ้าคงสภาพ (persistent current) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไหลในวงแหวนจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ LI ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกด้วย ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านภายในวงแหวนจะเป็น

$$\phi = AB + LI \quad (2.12)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (2.12) เทียบกับเวลาจะได้

$$(d\phi/dt) = A(dB/dt) + L(dI/dt) \quad (2.13)$$

จาก สมการ(2.8) และสมการ (2.13) จะได้

$$(d\phi/dt) = -RI \quad (2.14)$$

เมื่อบางวงแหวนอยู่ในสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด สมการ(2.14) จะเขียนได้เป็น

แสดงว่า $\phi =$ ค่าคงที่ $(d\phi/dt) = 0$

2.5 ทฤษฎีจุลภาคของสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เนื่องจากสภาวะการนำไฟฟ้า เป็นผลึกกรรมของความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร สำหรับสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็เช่นเดียวกัน คือ จะเป็นผลึกกรรมของอิเล็กตรอนที่พิเศษไปกว่าอิเล็กตรอนธรรมดา ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ผ่านโลหะไปโดยปราศจากการกีดขวางทุกชนิด ในการอธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนพิเศษ ในระดับจุลภาคนี้จะอาศัยกฎทางไฟฟ้าแม่เหล็ก (electromagnetism) และกฎทางอุณหพลศาสตร์ เป็นพื้นฐาน ทฤษฎีจุลภาคหนึ่งที่อธิบายสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดี คือ ทฤษฎีของลอนดอน (London theory)

ในปี พ.ศ.2477 สองพี่น้องตระกูลลอนดอน (F. London and H. London) ได้ตั้งทฤษฎีสำหรับอธิบายสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า E ซึ่งจะมีสมการของการเคลื่อนที่เป็น

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = -e\bar{E} \quad (2.15)$$

m แทนมวลของอิเล็กตรอน

\bar{v} แทนความเร็วของอิเล็กตรอน

e แทนประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

t แทนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะเป็น

$$\bar{J} = ne\bar{v} \quad (2.16)$$

\bar{J} แทนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

n แทนความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

ดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (2.16) เทียบกับเวลา t แล้วแทนค่า v ใน สมการ (2.15) จะได้

$$d\bar{J}/dt = - (ne^2/m)\bar{E} \quad (2.17)$$

ความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า จะสามารถหาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) คือ

$$\mu_0 (d\bar{H}/dt) = -\nabla \times \bar{E} \quad (2.18)$$

และ $\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + (d\bar{D}/dt)$ (2.19)

และ $\nabla \cdot \bar{H} = 0$ (2.20)

$d\bar{D}/dt$ แทนกระแสการขจัด (displacement current)

สำหรับในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่ากระแสการขจัดมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่มาก ๆ ดังนั้นสมการ (2.19) จึงเขียนได้เป็น

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (2.21)$$

แทนค่า \bar{E} จากสมการ (2.17) ในสมการ (2.18)

$$d\bar{H}/dt = \{m/(\mu_0 ne^2)\} \nabla \times d\bar{J}/dt \quad (2.22)$$

แทนค่า \bar{J} จากสมการ (2.21) ในสมการ (2.22)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d\bar{H}}{dt} = \left\{ m/\mu_0 n e^2 \right\} \nabla \times \nabla \times \bar{H}/dt \quad (2.23)$$

อินทิเกรตสมการ (2.23) จะได้

$$\bar{H} = \left\{ m/\mu_0 n e^2 \right\} \nabla \times \nabla \times \bar{H} \quad (2.24)$$

จากกฎทางเวกเตอร์วิเคราะห์ (vector analysis) ที่ว่า

$$\nabla \times \nabla \times \bar{H} = \nabla (\nabla \cdot \bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} \quad (2.25)$$

จากสมการ (2.20) , (2.24) และ (2.25) จะได้

$$\bar{H} = - \left\{ m/\mu_0 n e^2 \right\} \nabla^2 \bar{H} \quad (2.26)$$

ในกรณีที่ของ 1 มิติในทิศ X; (2.26) จะเขียนได้เป็น

$$\bar{H} = - \left\{ m/\mu_0 n e^2 \right\} \frac{d^2 \bar{H}}{dx^2}$$

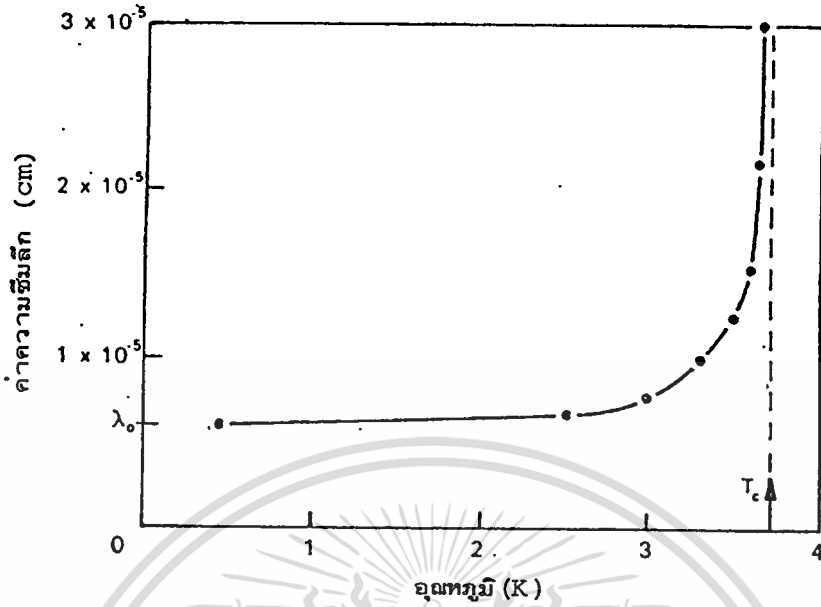
หรือ
$$\frac{d^2 \bar{H}}{dx^2} = - \bar{H}/\lambda^2 \quad (2.27)$$

โดย
$$\lambda = \left[m/\mu_0 n e^2 \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

คำตอบที่สอดคล้องกับสมการ (2.27) จะเขียนได้เป็น

$$H = H_0 \exp (-x/\lambda) \quad (2.29)$$

สมการ (2.29) เรียกว่า สมการลอนดอน (London equation) ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ซึมเข้าไปในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวจะลดลงแบบเอกโปเนนเชียล ตามความลึกจากผิวเข้าไป



รูปที่ 2.3 การผันแปรของค่าความซึมลึกตามอุณหภูมิ

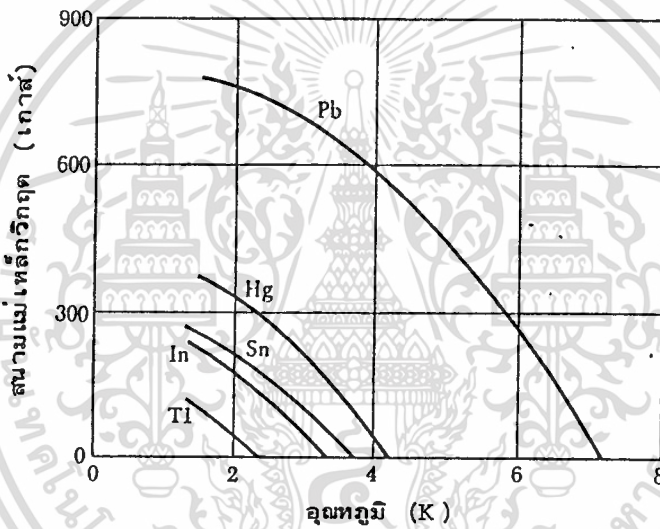
ค่า λ จากสมการ (2.28) เรียกว่า ค่าความซึมลึกของลอนดอน (London penetration depth) ซึ่งเป็นระยะทางเฉลี่ยที่สนามแม่เหล็กสามารถซึมเข้าไปในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีค่า λ น้อยกว่าค่าความหนาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นก็จะ เป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีค่า λ มากกว่าค่าความหนาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะ ไม่เป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้เกิดสภาพแม่เหล็กแต่ไม่เกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ค่าความซึมลึกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิดมีค่าไม่คงที่ โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

จากรูป 2.3 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ค่าความซึมลึกจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งจะเรียกค่าความซึมลึกนี้ว่า ค่าความซึมลึกเฉพาะ (characteristic penetration depth, λ_0) โดยจะเป็นค่าเฉพาะของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิด และที่อุณหภูมิประมาณ 0.8 เท่า ของอุณหภูมิจุดวิกฤต ค่าความซึมลึกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะมีค่าเป็นอนันต์ที่อุณหภูมิจุดวิกฤต สมการที่สอดคล้องกับการผันแปรค่าความซึมลึกตามอุณหภูมิจะเขียนได้เป็น

$$\lambda = \lambda_0 [1 - (T/T_c)^4]^{-1/2} \quad (2.30)$$

2.6 การทำละลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก

การทำละลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีหนึ่งคือ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า T_c และอีกวิธีหนึ่งก็คือ เพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปมาก ๆ จนกระทั่งมากกว่าสนามวิกฤต $H_c(T)$ ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิ จะสามารถทำละลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิวิกฤต (T_c) ค่าของสนามวิกฤตเป็นศูนย์ คือ $H_c(T_c) = 0$ ความสัมพันธ์ของสนามวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่างๆ ที่แสดงในรูป 2.4 มีความสัมพันธ์กันดังนี้



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่างๆ

- เมื่อ $T < T_c$ สนามภายนอก $H_u = 0$ เป็นสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- $T < T_c$ สนามภายนอก $H_c > H_u > 0$ เป็นสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- $T < T_c$ สนามภายนอก $H_u > H_c$ เป็นสภาวะปกติ คือการทำละลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากรูป 2.4 จะเห็นได้ว่า เมื่อ $T = T_c$ ถ้าให้สนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำละลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ แต่ถ้า $T \ll T_c$ ต้องใช้สนามแม่เหล็กมาก ๆ สำหรับ $T = T_c$ ได้ $H_c = 0$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤต สามารถเขียนเป็น

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.31)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตถูกใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะให้ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มากจนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่อุณหภูมินั้นๆ

นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิ และให้สนามแม่เหล็กค่าสูงๆ สามารถจะทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว เราอาจจะทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้อีกด้วยกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากๆ จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมากกว่าสนามวิกฤตก็จะทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee effect)

2.7 ประเภทของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการทดลองพบว่า ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสามารถแสดงสภาพใดสภาพหนึ่งเพียงสภาพเดียวเท่านั้น คือ แสดงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต และแสดงสภาพปกติเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะเกิดสภาวะที่บางส่วนแสดงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และบางส่วนแสดงสภาพปกติ ซึ่งรูปแบบของการเกิดบริเวณที่แสดงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดและบริเวณที่แสดงสภาพปกติ จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะ คือ สถานะปานกลาง (intermediate state) สถานะผสม (mixed state) และสถานะผิวตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (surface superconductivity) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5

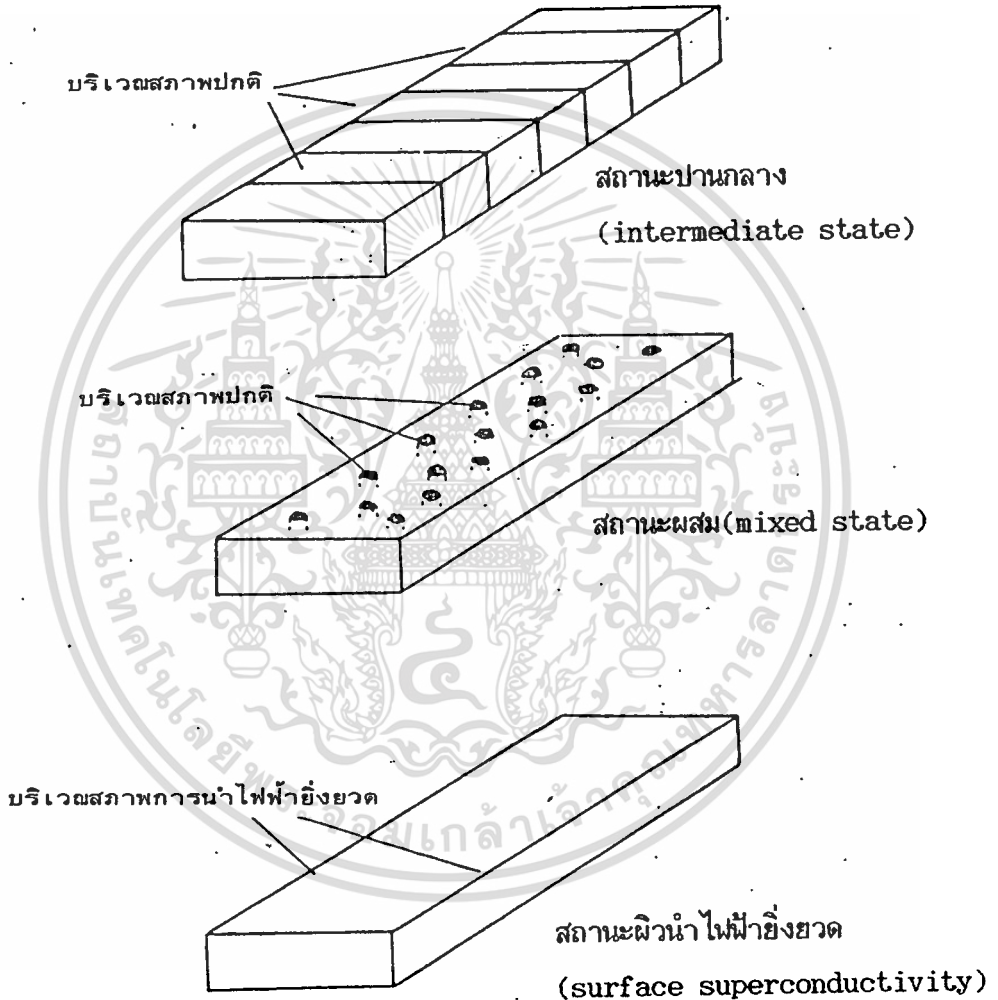
จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าสถานะปานกลาง จะมีบริเวณของสภาพปกติเกิดเป็นแถบกว้าง ส่วนสถานะผสมจะมีบริเวณของสภาพปกติเกิดเป็นรูปเส้นท่อนแยกกันอยู่ โดยมีระยะห่างกันประมาณ 10^{-5} mm. หรือน้อยกว่านี้ ส่วนสถานะผิวตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีบริเวณของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดต่อกันไปเป็นพื้นที่บริเวณกว้าง

จากการศึกษาค่าสนามแม่เหล็ก ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ กันดังรูปที่ 2.6 ผลที่ได้ทำให้สามารถแบ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

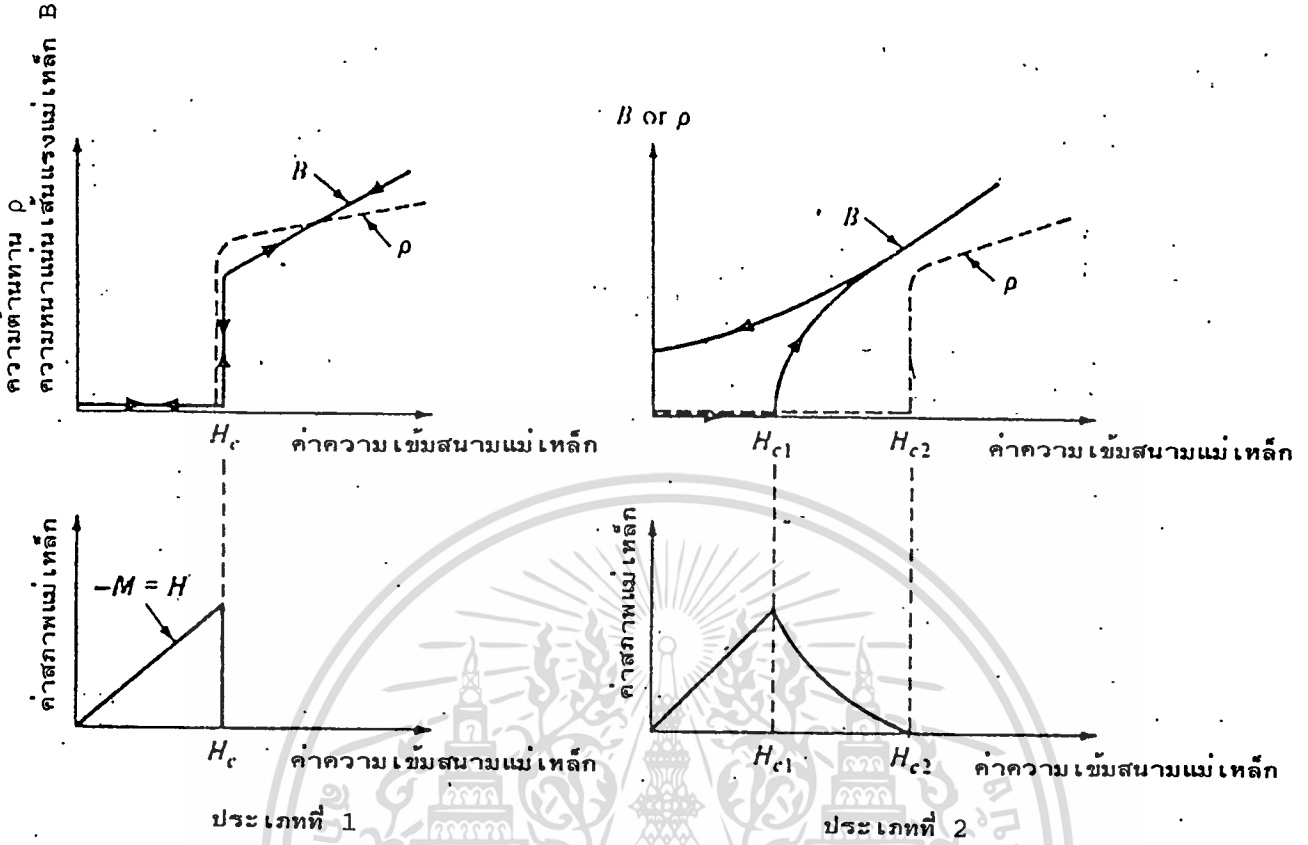
1. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 หรืออย่างอ่อน (type 1 or soft superconductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกธาตุต่าง ๆ เช่นปรอท(Hg) อินเดียม(In) โซเดียม(Na) เป็นต้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 หรืออย่างแข็ง (type 2 or hard superconductor)
 ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกอัลลอยด์และสารประกอบ เช่น $V_3Si, Nb_3Ge, YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 สถานะต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปแผ่นระนาบ
 วางในสนามแม่เหล็กที่ขนานกับผิวระนาบ



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแม่เหล็ก (magnetization) กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในปี พ.ศ. 2504 ได้มีการค้นพบว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สามารถแสดงสถานะปานกลางได้ ก็จะไม่แสดงสถานะผสม และในทางกลับกันตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แสดงสถานะผสมได้ก็ไม่สามารถแสดงสถานะปานกลางได้ก็คือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และยังมีอีกว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 ทั้งหมดสามารถแสดงสถานะฉนวนนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ แต่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 มีเพียงบางธาตุเท่านั้นที่สามารถแสดงสถานะฉนวนนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

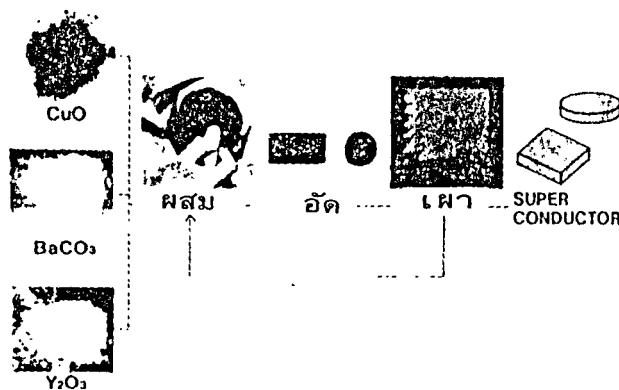
บทที่ 3 การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ซึ่งจะเตรียมขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. เริ่มต้นจากการศึกษาข้อมูลจากรายงานการวิจัยที่มีการนำเสนอ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับเตรียมห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ข้อมูลที่ได้จะถูกปรับปรุงให้เหมาะสม ในส่วนแรกของบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงการเตรียมห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง และการตรวจสอบคุณสมบัติที่สำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่จะเตรียมขึ้น

ในขั้นต้นนี้ เราจะศึกษาการเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดเซรามิก แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ จากกระบวนการที่ได้มีการรายงานในต่างประเทศ เพื่อปรับกระบวนการสร้างที่เหมาะสมกับห้องปฏิบัติการ สาเหตุที่เลือกเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เพราะว่า

1. เป็นสารประกอบตัวแรกของตระกูลอิตเทรียม ที่ถูกค้นพบและเผยแพร่
2. อุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าจุดเดือดของ ไนโตรเจนเหลว ($77^\circ K$)
3. กระบวนการสร้าง ไม่ซับซ้อนมากนักสะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสาร ไม่สูงนัก
5. สารประกอบที่ใช้คือ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อร่างกายในระหว่างการสร้าง

จากเหตุผลที่กล่าวมา จึงได้ทำการศึกษา ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบนี้ โดยกระบวนการสร้างทั่วไปจะมีขั้นตอนดังแผนภาพในรูปที่ 1



รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ทั้งหมดที่มีการนำเสนอ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การเตรียมห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือวัดคุณสมบัติที่สำคัญต่าง ๆ

ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อุณหภูมิสูง ที่เตรียมขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีเครื่องมือที่จัดสร้างขึ้นใช้เพื่อการเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก และเครื่องมือที่จะใช้วัดคุณสมบัติต่างๆของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของตัวอย่างที่เราได้สร้างขึ้น



รูปที่ 3.2 ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่เตรียมขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ก. เตาเผาอุณหภูมิสูง $1,050^{\circ}\text{C}$

ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

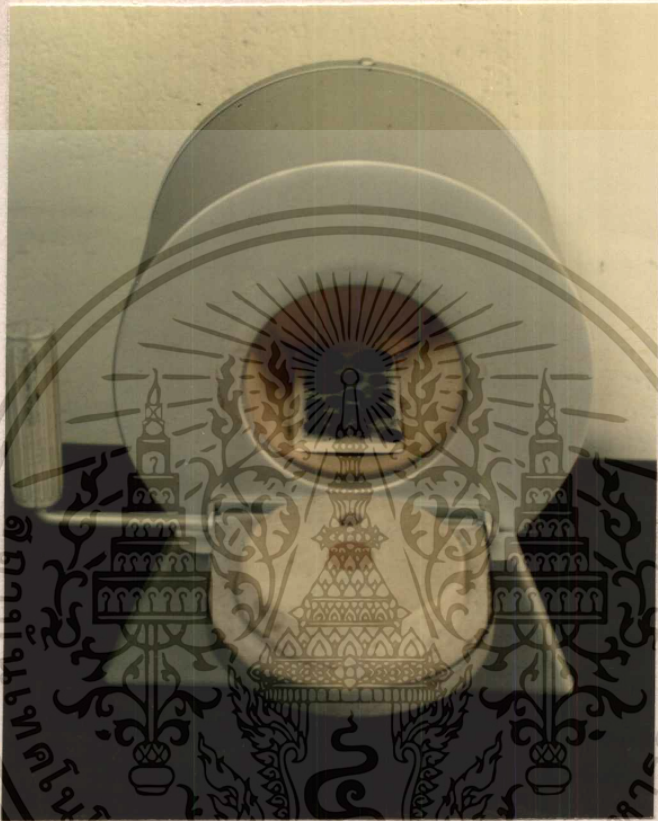
1. ตัวเตาเผาชนิดลดความร้อน
2. หัววัดอุณหภูมิเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3. ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

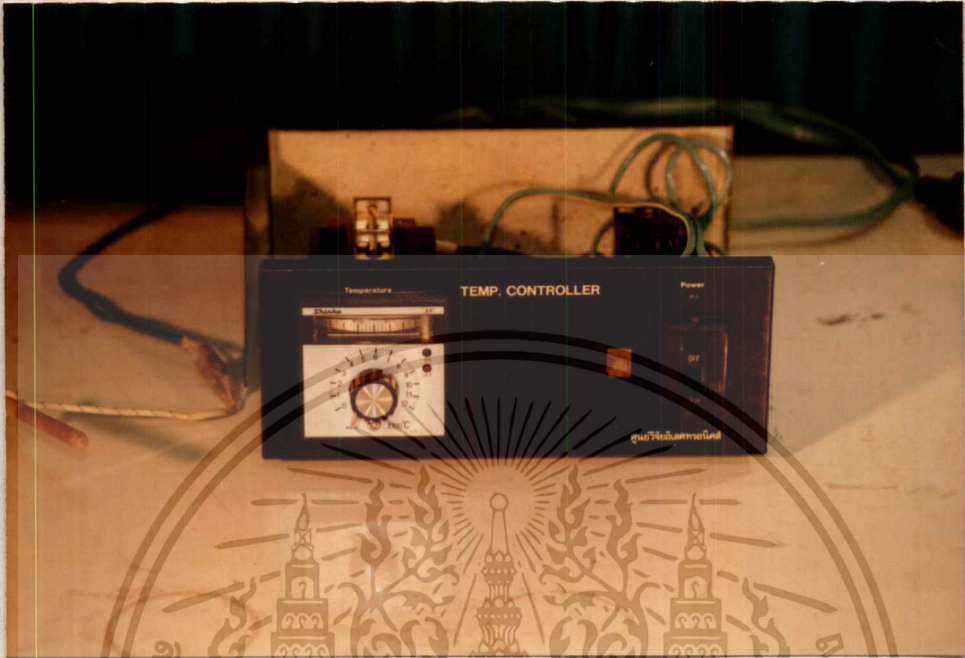
1. เตาเผาขนาดเล็กที่ใช้ชุดลดความร้อนแบบ VTR - E ผลิตโดย บริษัท MIHM - VOGT ประเทศเยอรมัน ลักษณะของเตา เป็นทรงกระบอก ประกอบด้วย เบ้าเซรามิกทนความร้อน ผนังด้วยชุดลดความร้อน เตาเผาแบบชุดลดความร้อนนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ไม่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อุณหภูมิสูงถึง 1,050 องศาเซลเซียส

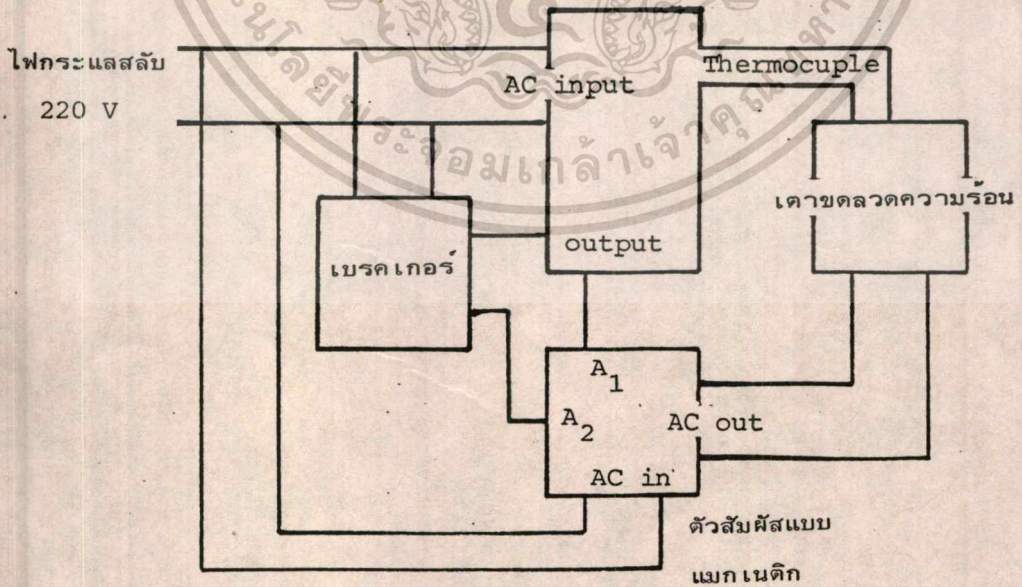
2. หัววัดอุณหภูมิเตา หัววัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย หลอดเซรามิกทนความร้อนสำหรับใส่หัววัดเข้าไปในเตาเผา และหัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Type K , Chromel - Alumel)

3. ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดควบคุมอุณหภูมิใช้ Electronic Temperature Controller รุ่น AF - 720 ของ Shinko Electric Instrument Co., Ltd. Japan ซึ่งจะใช้ได้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 องศาเซลเซียสถึง 1,200 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิของเตาให้คงที่ ด้วยการส่งสัญญาณ ON - OFF จาก Controller ไปยัง Electromagnetic switch เพื่อทำการ ตัด - ต่อ ไฟเลี้ยงชุดลดความร้อนของเตาเผา ความผิดพลาดของอุณหภูมิของเตาประมาณไม่เกิน ± 20 องศาเซลเซียส ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาความร้อนสูง 1,200 องศาเซลเซียส

ชุดควบคุมอุณหภูมิ เตา

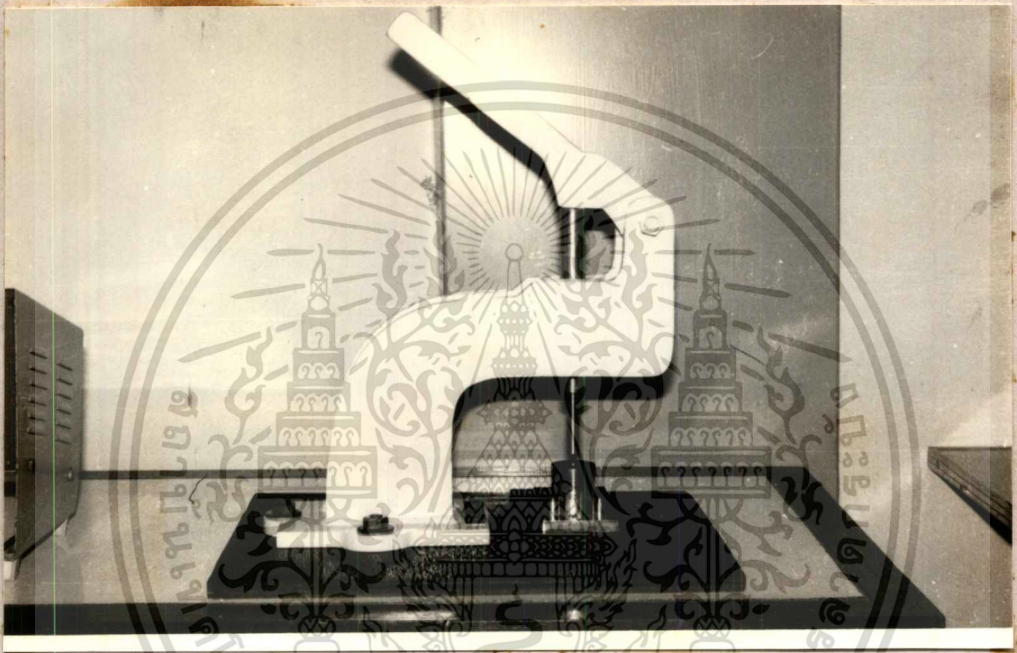


รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ชุดอัดเม็ดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1. ชุดอัดเม็ดแบบใช้แรงกด เป็นชุดอัดต้นแบบ ซึ่งออกแบบสร้างขึ้นเอง ใช้กำลังคนโยกกดน้ำหนักลง ไปบนหัวเบ้าอัดที่บรรจุผงสารประกอบ ข้อดีคือราคาถูก และใช้งานได้ดี ลักษณะรูปร่างจะเป็นดังรูป 3.6

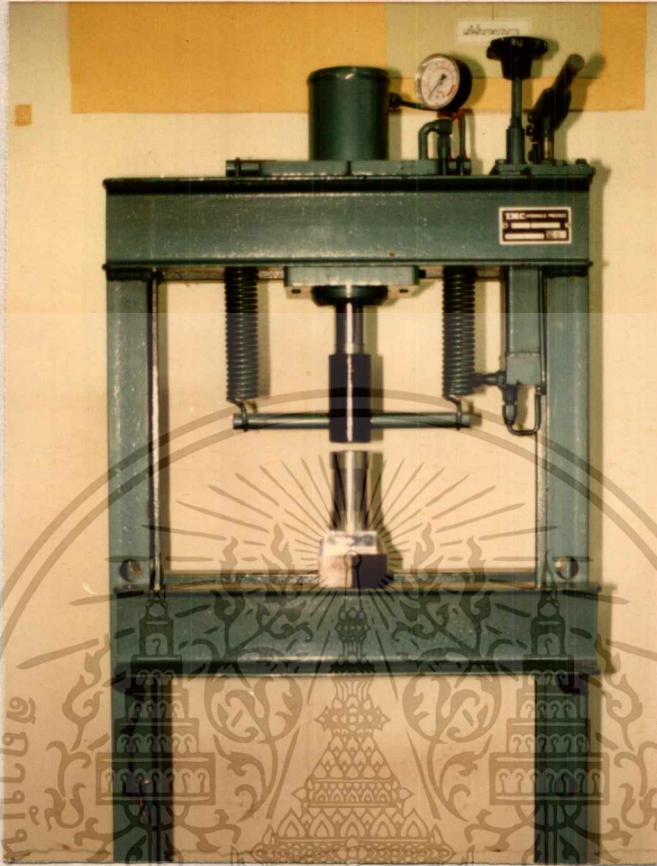


รูปที่ 3.6 ชุดอัดเม็ดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซรามิก แบบใช้แรงกด

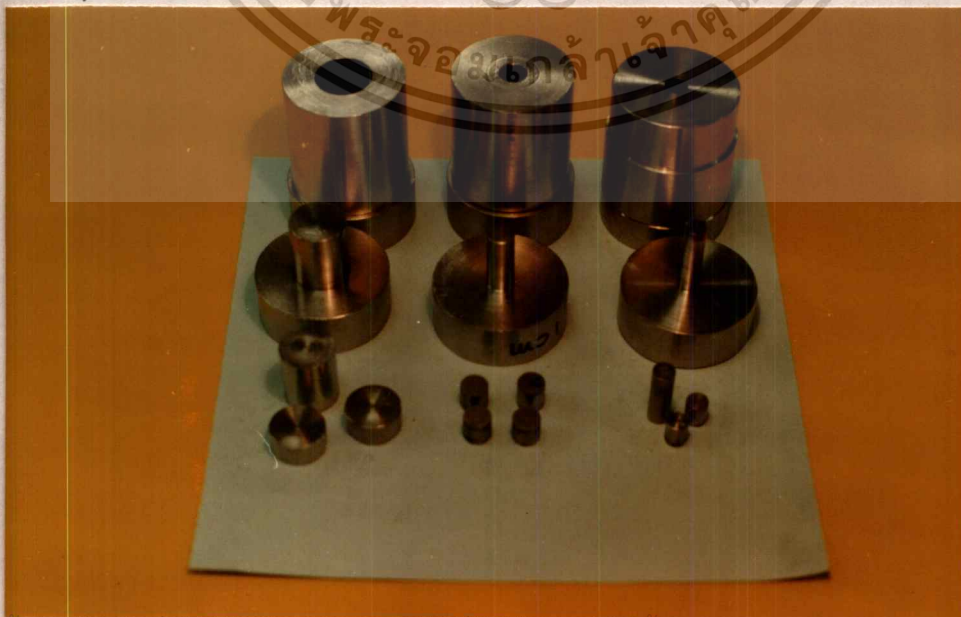
ส่วนที่สำคัญอีกส่วนของชุดอัดนี้คือ ชุดเบ้าอัด ได้ออกแบบไว้ใช้เป็น 3 ขนาด คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง (เส้น ศ.ก.) 10 ม.ม. , เส้น ศ.ก. 20 ม.ม. และ เส้น ศ.ก. 30 ม.ม. เบ้าอัดแต่ละชุดจะประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ 6 ชิ้น ชุดเบ้าอัด ศ.ก. 10 ม.ม. และ ศ.ก. 20 ม.ม. กลึงจากแท่งเหล็กกลม แล้วนำไปชุบโครเมียม ส่วนชุดเบ้าอัด ศ.ก. 30 ม.ม. กลึงจากสแตนเลส

2. ชุดอัดเม็ดแบบไฮดรอลิก เป็นเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาดแรงอัด 10 ตัน มีมอเตอร์เชื่อมความดันบอกค่าของแรงอัดได้ ของ T.M.C. Thai ชุดหัวเบ้าอัดถูกสร้างขึ้นใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับหัวอัดแรง ชุดเบ้าหัวอัดที่สร้างขึ้นใหม่มี ศ.ก. 10 ม.ม. , ศ.ก. 20 ม.ม. และ ศ.ก. 30 ม.ม. และใช้แทนชุดอัดแบบแรก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดไฮดรอลิก แรงอัดสูงสุด 10 ตัน

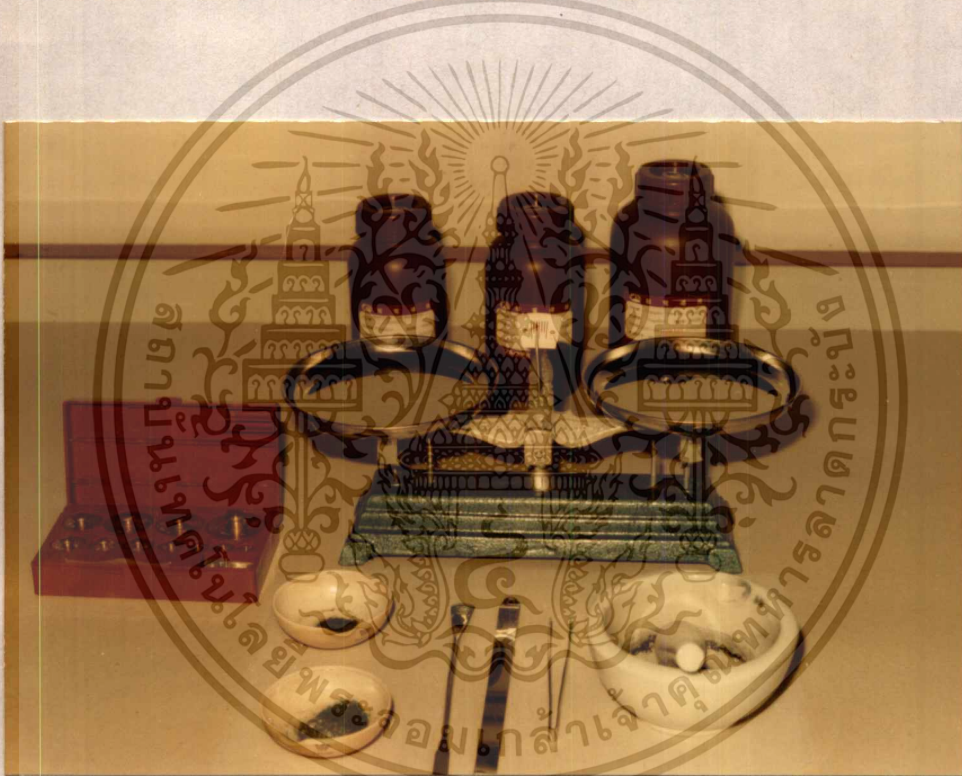


รูปที่ 3.8 เบ้าอัดแบบขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. อุปกรณ์สำหรับผสมและใส่สารที่จะเผา

1. เครื่องชั่ง 2 แขน
2. ครกบดสาร
3. ถ้วยเผาทนความร้อน EVA
4. ซ้อนตักสาร และกระดาษพาราฟิล
5. อุปกรณ์จำเป็นอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์สำหรับล้างทำความสะอาด ปีกเกอร์ กระดาษฟรอยด์ กระเบื้องเซรามิกทนความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์สำหรับผสมสารในกระบวนการสร้าง

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

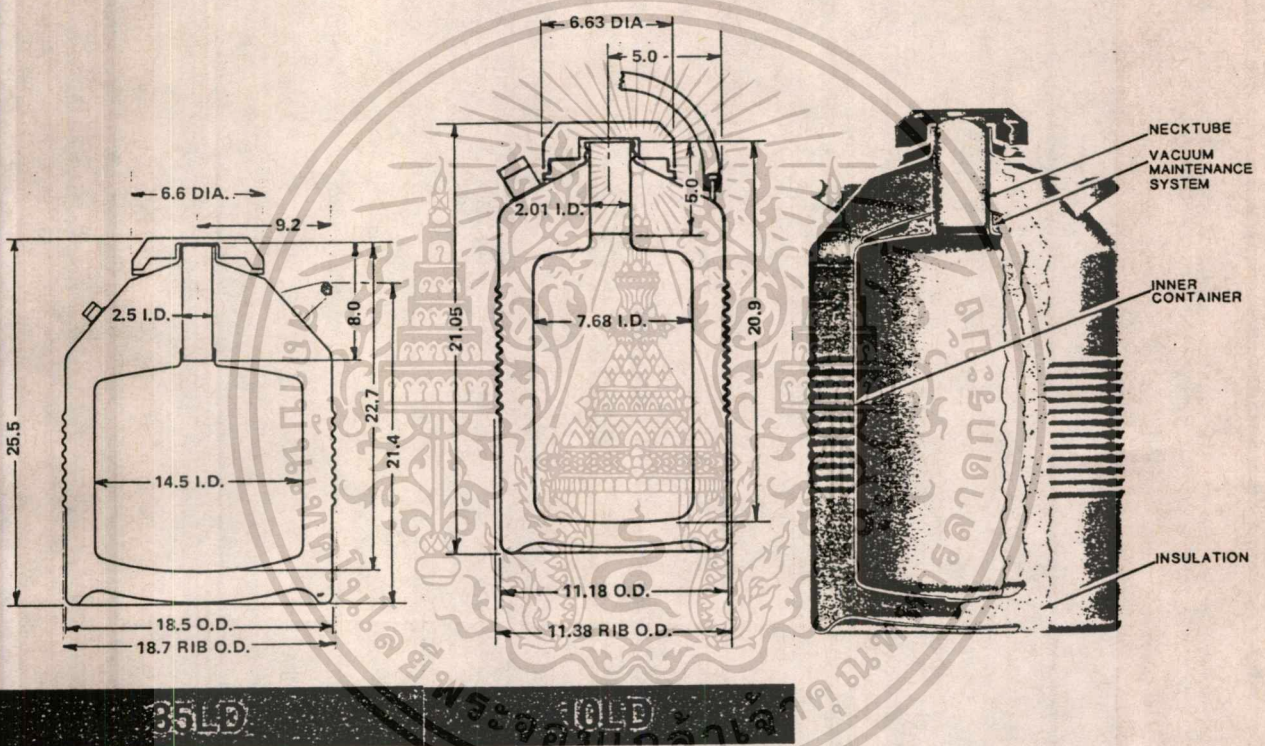
- ก. แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) บริสุทธิ์ 99.9%
- ข. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) บริสุทธิ์ 99.9%
- ค. อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) บริสุทธิ์ 99.99%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ถังเก็บไนโตรเจนเหลวขนาด 35 ลิตร และ 10 ลิตร

เป็นถังของบริษัท Taylor - Wharton ประเทศสหรัฐอเมริกา สั่งซื้อผ่าน
ทางบริษัท TIG ประเทศไทย ถังนำมาใช้มี 2 ขนาดคือ

1. รุ่น 10LD เป็นถังขนาดความจุ 10 ลิตร
2. รุ่น 35LD เป็นถังขนาดความจุ 35 ลิตร



รูปที่ 3.10 ถังเก็บไนโตรเจนเหลว

3.1.4 แม่เหล็กถาวรความเข้มสูง

แม่เหล็กสำหรับทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ และปรากฏการณ์ทางแม่เหล็ก
ที่นำมาใช้เป็นแม่เหล็กแบบซามาเรียมโคบอลต์ (Sm - Co) ซึ่งมีความเข้มสูงกว่าแม่เหล็กทั่วไป

เพื่อความชัดเจนในการแสดงผล มี 2 ขนาด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขนาดใหญ่รูปร่างแบน เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 4 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 1.2 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ความเข้ม 3,000 เกาส์
2. ขนาดเล็กกลมแบน เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร มีความเข้มสนาม 1,200 เกาส์

3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งต้องมีค่าเป็นศูนย์ เมื่ออยู่ในสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ จะเป็นการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสกับแรงดัน ชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งประกอบด้วย

1. เครื่องจ่ายแรงดันปรับค่าได้
2. ออสซิลโลสโคป
3. ขั้วนำตัวอย่างซึ่งต่อสายไฟเรียบร้อยแล้ว
4. กล่องต่อสาย
5. ไนโตรเจนเหลว
6. ชุดกระบอกวัดสำหรับเก็บไนโตรเจนเหลว และใส่ตัวอย่าง

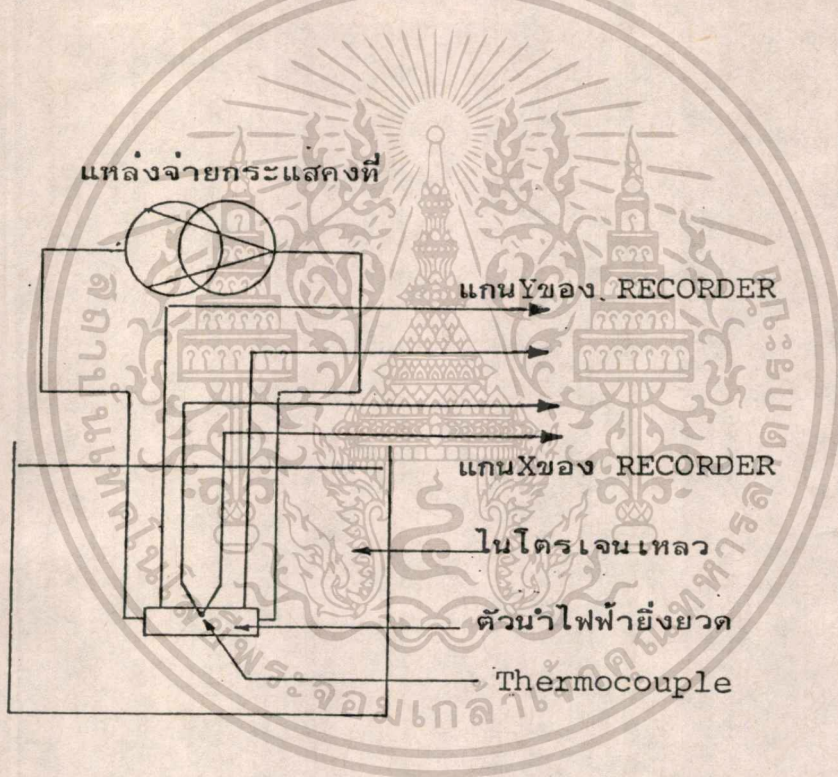


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.11 ชุดทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่สิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 ชุดเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

อุณหภูมิวิกฤตเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีความสำคัญมากต่อการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นต้องทำการวัดทดสอบ ก่อนที่จะนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นไปใช้งานต่อไป

การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ใช้วงจรการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดย ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งต่อขั้วสายเรียบร้อยแล้ว จะได้รับการป้อนกระแสแสดงที่ค่าหนึ่ง



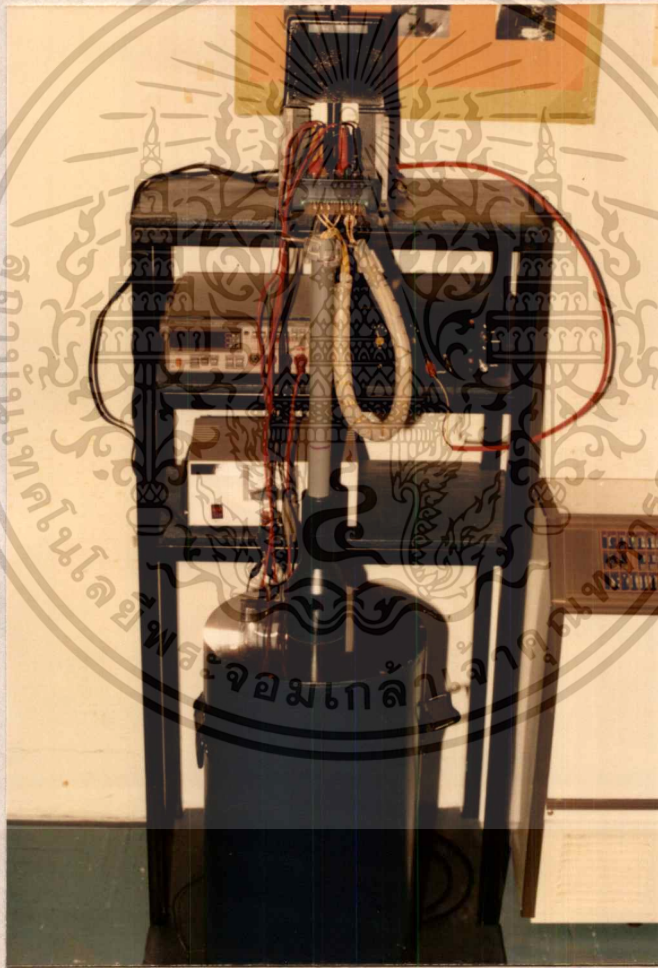
รูปที่ 3.12 วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

จากแหล่งจ่ายเข้าที่ขั้ว 1 และ 4. ส่วนที่ขั้ว 2 และ 3 จะถูกต่อเข้ากับแกน Y ของเครื่องบันทึก 2 แกน เพื่อแสดงค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปขณะทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลถูกวางไว้ติดกับผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึก 2 แกน เพื่อแสดงค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะค่อยๆ ถูกหย่อนลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 300 K) ลงไปยังอุณหภูมิจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว (ประมาณ

77 K) นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

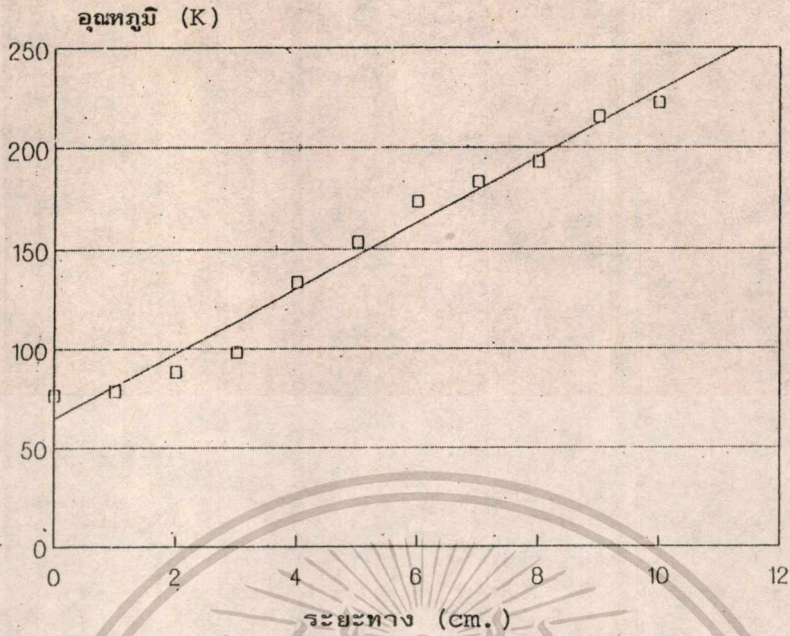
เครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสร้างขึ้นเพื่อความสะดวก รวดเร็ว และ ถูกต้องแน่นอน ในการศึกษา และ ทดสอบคุณสมบัติสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เตรียมขึ้นที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตินี้ใช้ ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวทำความเย็นของระบบ จึงใช้ทดสอบได้เฉพาะกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตไม่ต่ำกว่า อุณหภูมิจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว คือ 77 K ลักษณะรูปร่างตัวเครื่องแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ซึ่งเป็นการตัดแปลงมาจากวงจรการทดลองในรูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะ



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ขึ้นกับระยะห่างระหว่าง หัววัดกับไนโตรเจนเหลว ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางจากหัววัดถึงไนโตรเจนเหลว ในรูปที่ 3.14 เทอร์โมคัปเปิลจะถูกจัดให้อยูชิดติดกับตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางจากหัววัดถึงไนโตรเจนเหลวของเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตที่สร้างขึ้น

3.1.7 ชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้าที่ยาวอุณหภูมิสูง

ในการบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำเข้ากับตัวนำไฟฟ้าที่ยาวชนิดเซรามิก จะต้องใช้เทคนิค

พิเศษเพื่อให้รอยต่อเป็นโอห์มมิก ชุดบัดกรียังจะประกอบด้วย

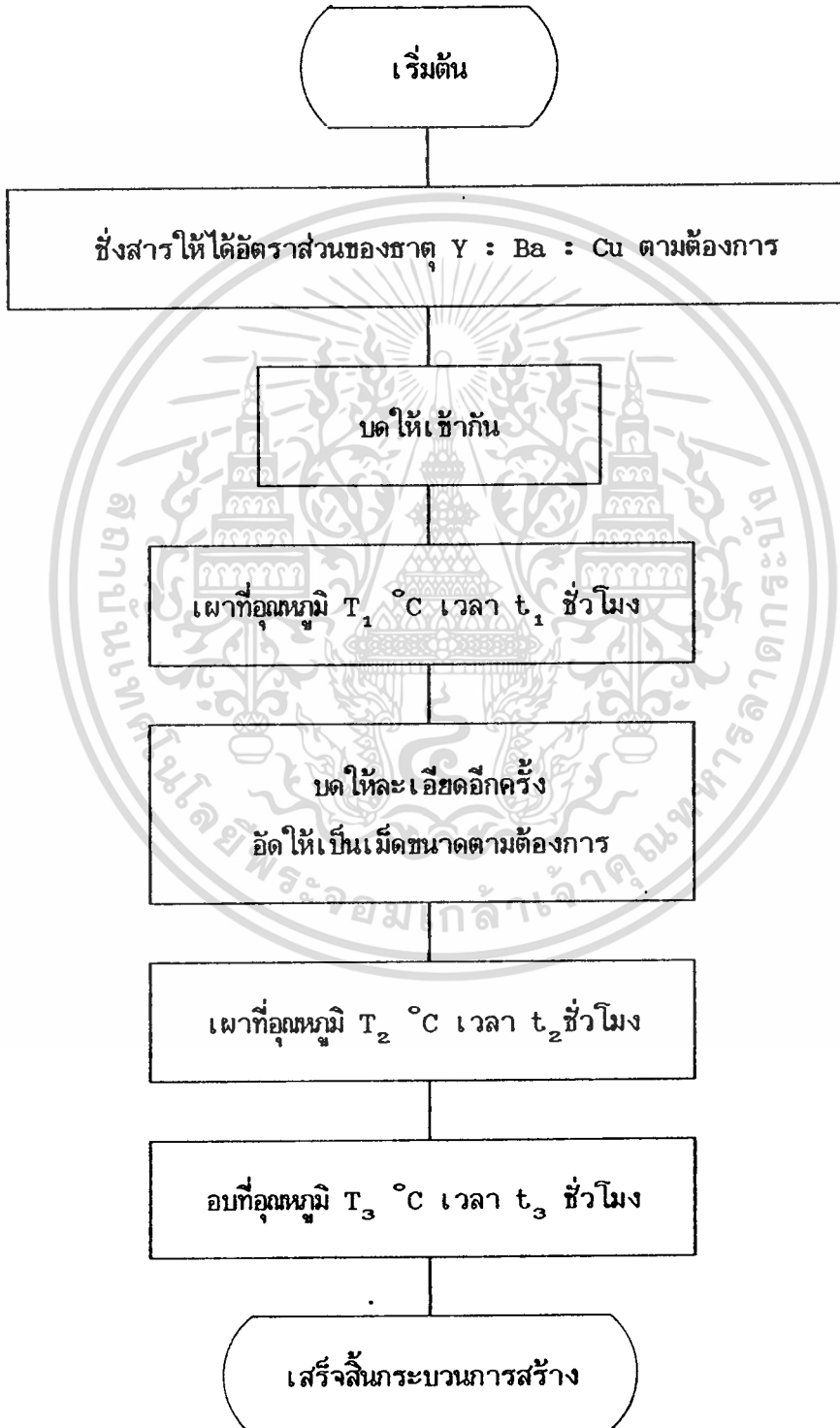
1. ตะกั่วบัดกรีจุดหลอมเหลวต่ำซึ่งมีส่วนผสมของอินเดียม
2. ชุดควบคุมอุณหภูมิหัวแร้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.15 ชุดอุปกรณ์สำหรับบัดกรี ต่อสายตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแบบเซรามิก
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงตระกูลอิตเทรียม

จากการศึกษากระบวนการสร้างทั่วไปของ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เท่าที่มีการเปิดเผยดังรูปที่ 3.1 สามารถแสดงให้เห็น ดังในแผนผังรูปที่ 3.16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.16 แผนผังแสดงกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ทั่วไป
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาปริมาณสารประกอบที่ใช้

จากแผนผังรูปที่ 3.16 วัสดุเริ่มต้นที่ใช้ในการสร้าง คือ อิตเทรียม (Y) แบเรียม (Ba) และทองแดง (Cu) ได้จากสารประกอบดังนี้

1. อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) มีความบริสุทธิ์ 99.99%
2. แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) " " 99.9%
3. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) " " 99.9%

ปริมาณสารที่ใช้ในแต่ละครั้งของการสร้างจะขึ้นกับ อัตราส่วนของธาตุที่สำคัญ คือ อิตเทรียม แบเรียม และทองแดง ถ้าต้องการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เราต้องใช้อัตราส่วนของธาตุ Y:Ba:Cu = 1:2:3 สารประกอบที่ใช้ คือ Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO

(Y=88.9 , Ba=137.34 , Cu=63.54 , C=12 , O=15.9)

Y_2O_3	1 โมล หนัก	$= (88.9 \times 2) + (15.9 \times 3)$	$= 225.5$	กรัม
$BaCO_3$	1 โมล หนัก	$= 137.347 + 12 + (15.9 \times 3)$	$= 197.04$	กรัม
CuO	1 โมล หนัก	$= 63.54 + 15.9$	$= 79.44$	กรัม

Y_2O_3	1 โมลโมเลกุล มี Y = 2 โมลอะตอม จึงต้องใช้ $Y_2O_3 = 225.5/2 = 112.75$	กรัม
$BaCO_3$	1 โมลโมเลกุล มี Ba = 1 โมลอะตอม ต้องใช้ $BaCO_3 = 197.04 \times 2 =$	394.08 กรัม
CuO	1 โมลโมเลกุล มี Cu = 1 โมลอะตอม ต้องใช้ $CuO = 79.44 \times 3 =$	238.32 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้เผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O

จากแผนผังรูปที่ 3.16 จะเห็นว่า มีตัวแปรที่มักจะไม่ได้รับแน่ชัดคือ อุณหภูมิและ เวลาที่ใช้ในการเผาสารประกอบ แต่ก็มีรายงานหลายฉบับที่ระบุอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ที่อุณหภูมิ ประมาณ 950 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้จุดหลอมเหลวของสารประกอบที่ใช้ในกระบวนการสร้าง

การทดลองตอนนี้ เป็นการศึกษาเพื่อหาอุณหภูมิสูงสุดสำหรับการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ตระกูล Y โดยไม่ทำให้เกิดการหลอมตัว ซึ่งจะทำให้สารประกอบเซรามิก Y-Ba-Cu-O เสียโครงสร้าง ไม่เกิดเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ผลการทดลองจะถูกนำไปพิจารณาประกอบการเลือก ใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เพื่อเป็น มาตรฐาน ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ- ทหารลาดกระบัง

วิธีการทดลอง

1. ชั่งสารประกอบ

Y_2O_3	หนัก	2.25	กรัม
$BaCO_3$	หนัก	7.9	กรัม
CuO	หนัก	4.77	กรัม
2. บดผสมให้เข้ากัน ใช้เวลาบดนานประมาณ 1 ชั่วโมง
3. ตักสารผสมหนักประมาณ 2 กรัมใส่บนแผ่นกระเบื้องขนาด 2" x 2" นำไปเผาที่ อุณหภูมิ 950 °C ใช้เวลาเผา 10 ชั่วโมง.
4. ทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 940, 930, 920 และ 900 °C

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดลองเผาสารประกอบ Y-Ba-Cu-O ที่อุณหภูมิสูงนาน 10 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างสำหรับห้องปฏิบัติการฯ

ชุดที่	อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะของสารประกอบ Y-Ba-Cu-O หลังการเผา
1	950	สีดำหลอมรวมกันเป็นก้อน ๆ เห็นได้ชัดเจน
2	940	สีดำเกาะกันเป็นก้อนแน่น แข็ง สังกัดได้ว่าการหลอมเข้าด้วยกัน
3	930	สีดำเกาะกันเป็นก้อนแน่น มีรูพรุนเล็กน้อย
4	920	สีดำเกาะกัน มีรูพรุนร่วม
5	900	สีดำเกาะกัน มีรูพรุนร่วม

ผลการทดลอง

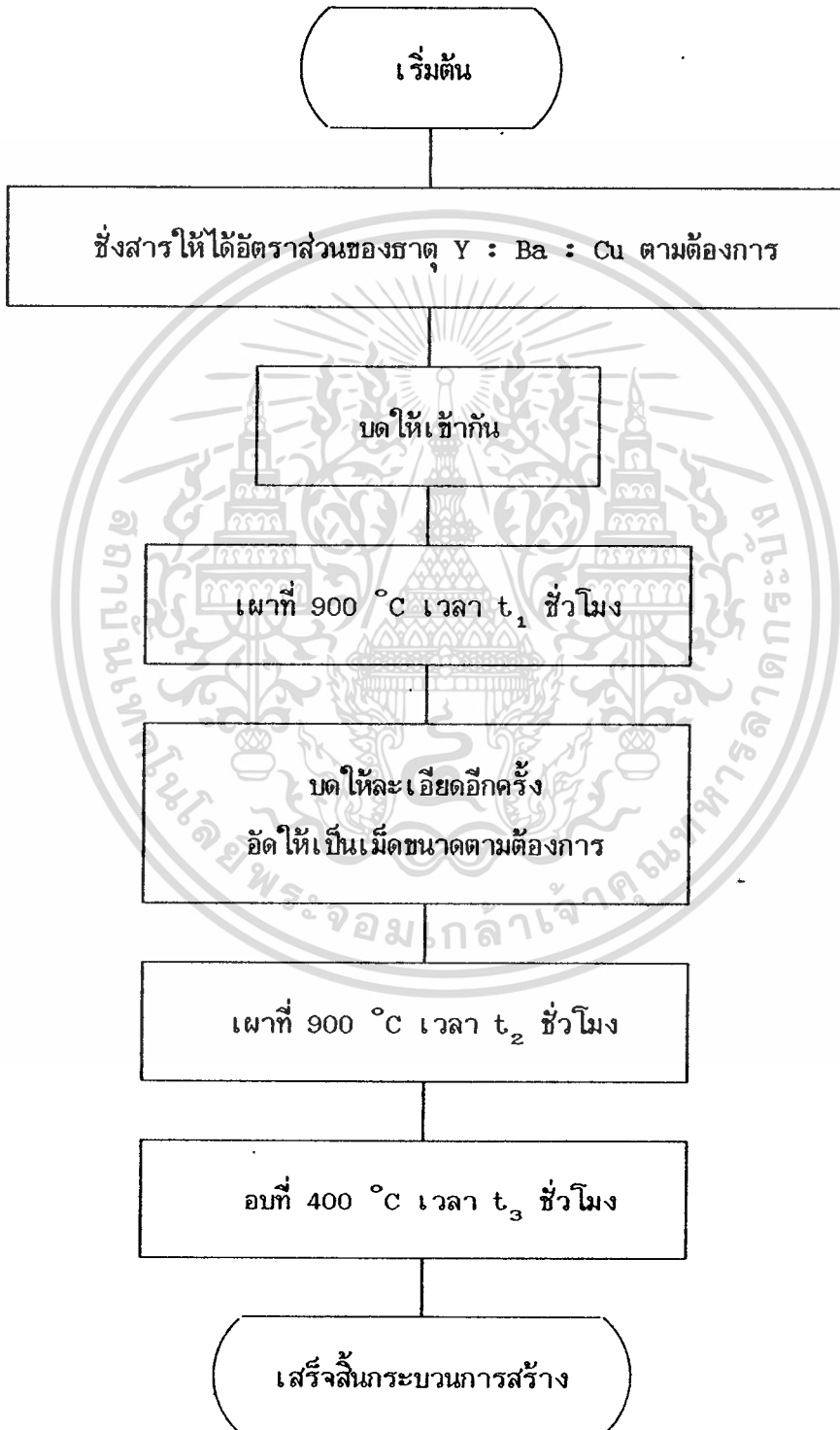
จากผลการทดลองในตารางที่ 3.1 แสดงว่า อุณหภูมิที่สามารถใช้ในการเผาสารประกอบ Y-Ba-Cu-O สำหรับกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้าที่ยาวอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก ของห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ฯ ไม่ควรเกินกว่า 930°C เพราะอุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะทำให้เกิดการหลอมรวมตัวกัน และไม่เกิดสภาพการนำไฟฟ้าที่ยาว

จากแผนผังรูปที่ 3.16 จึงเลือกใช้อุณหภูมิสำหรับเผาสารประกอบ T_1 เป็น 900°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่สูงใกล้จุดหลอม และจะไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิดพลาดจากการตัดต่อของชุดควบคุมอุณหภูมิ

ส่วนที่อุณหภูมิ T_2 ซึ่งโดยรายงานทั่วไปจะใช้การเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_1 เล็กน้อยเช่น 930°C เป็นต้น ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการปรับอุณหภูมิของเตา และไม่ทำให้สารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ประกอบหลอมละลาย จึงกำหนด T_2 ที่อุณหภูมิ 900 °C เช่นเดียวกับ T_1

ไมวารณิดจกตงสน อักทงหามมิเท็ดดเปลงเนือหา และตองององถงเจาขบงเอกสารทุกครั่งที่มการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ T_3 ซึ่งเป็นขั้นตอนทางเซรามิก ที่จะลดความเครียดให้กับเซรามิก เพื่อป้องกันการบิดงอ ส่วนมากจะใช้อุณหภูมิประมาณ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงเลือกใช้ $T_3=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เช่นเดียวกัน ดังนั้นแผนผังในรูป 3.17 จึงถูกกำหนด T_1 , T_2 และ T_3 ดังแผนผังรูปที่ 3.17



เอกสารรูปที่ 3.17 แผนผังกระบวนการสร้างซึ่งถูกกำหนดอุณหภูมิสำหรับเผาสารประกอบแล้ว ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองเพื่อกำหนดเวลาที่ใช้ในการเผา

เพื่อศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเผาสารประกอบ ในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง Y-Ba-Cu-O ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาเป็นข้อมูลเพื่อพัฒนากระบวนการสร้างให้เหมาะสมสำหรับห้องปฏิบัติการ ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทำการทดลองตามกระบวนการที่แสดงในแผนผังรูปที่ 3.17

3.4.1 วิธีการทดลอง

1. ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO เพื่อให้ได้อัตราส่วนของ Y : Ba : Cu เป็น 1:2:3 บดผสมกันให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน

2. นำสารผสมที่บดเรียบร้อยแล้วจากข้อ 1 มาแบ่งออกเป็น 4 ชุด ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องเผาหมายเลข 1 , 2 , 3 และ 4

3. ถ้วยหมายเลข 1 ไปเผาตามขั้นตอนแผนผังรูปที่ 3.17 โดยกำหนดเวลา

$$t_1 = 10 \text{ ช.ม.}$$

$$t_2 = 10 \text{ ช.ม.}$$

$$t_3 = 24 \text{ ช.ม.}$$

4. ถ้วยหมายเลข 2 เผาตามขั้นตอนแผนผังรูปที่ 3.17 โดยกำหนดเวลา

$$t_1 = (10 + 10) \text{ ช.ม.}$$

(เผา 2 ครั้ง ครั้งแรก 10 ช.ม. แล้วทิ้งให้เย็นนำมาบดละเอียดแล้วเผาซ้ำอีก 10 ช.ม.)

$$t_2 = 10 \text{ ช.ม.}$$

$$t_3 = 24 \text{ ช.ม.}$$

5. ถ้วยหมายเลข 3 เผาตามขั้นตอนแผนผังรูปที่ 3.17 โดยกำหนดเวลา

$$t_1 = 20 \text{ ช.ม.}$$

$$t_2 = 10 \text{ ช.ม.}$$

$$t_3 = 24 \text{ ช.ม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และที่ยังไม่ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ถ้วยหมายเลข 4 เปรียบตามขั้นตอนแผนผังรูปที่ 3.17 เช่นกันโดยกำหนด

$$t_1 = 20 \text{ ช.ม.}$$

$$t_2 = 10 \text{ ช.ม.}$$

$$t_3 = 12 \text{ ช.ม.}$$

7. เมื่อได้ชิ้นสารตัวอย่างครบทุกชุดแล้ว นำไปทดสอบคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้แก่

1. ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)
2. ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance)
3. ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee effect)
4. อุณหภูมิวิกฤต (T_c)

ตารางที่ 3.2 แสดงเวลาที่ใช้ทดลองเผาสารแตกต่างกัน

ชุดที่	เวลาที่ใช้ในการเผาสาร (ชั่วโมง)		
	เวลา t_1 ที่อุณหภูมิ 900°C	เวลา t_2 ที่อุณหภูมิ 900°C	เวลา t_3 ที่อุณหภูมิ 400°C
1	10	10	24
2	10 + 10	10	24
3	20	10	24
4	20	10	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว ชิ้นสารตัวอย่างต้องถูกทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อแสดงว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่สมบูรณ์ ดังนี้

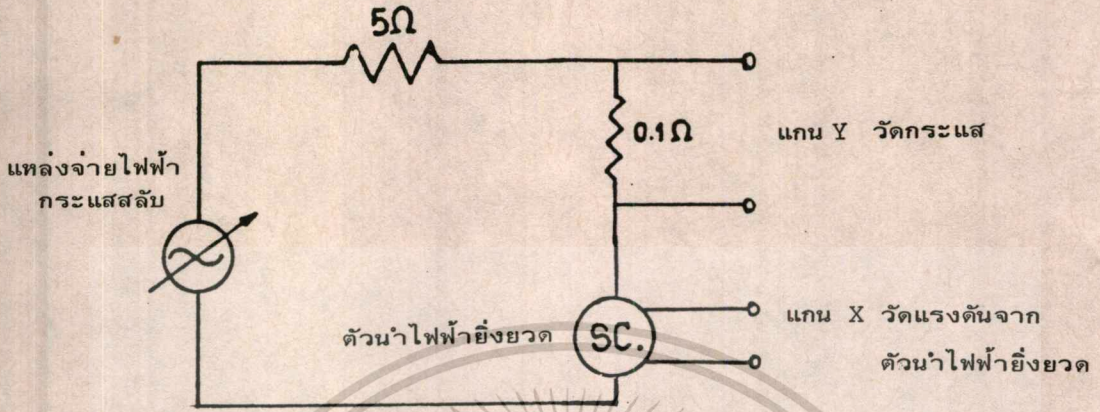


รูปที่ 3.18 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

1. ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)

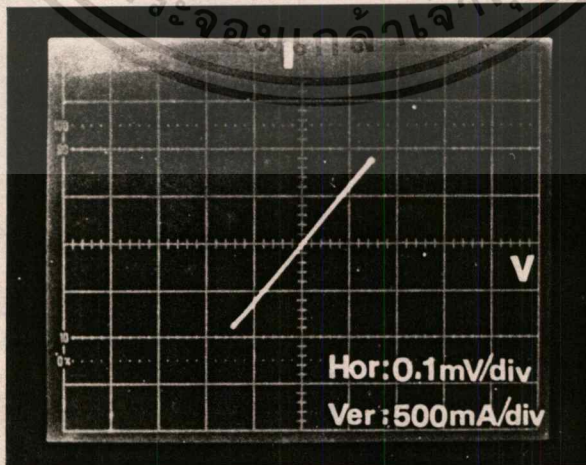
นำตัวอย่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากที่สร้างขึ้นแช่ในไนโตรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดที่ 77 K จากนั้นนำแม่เหล็กมาวางเหนือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละตัว ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ คือ ไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านตัวมัน จึงทำให้แม่เหล็กถูกผลักลอยอยู่เหนือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ดังรูปที่ 3.18

2. ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance)



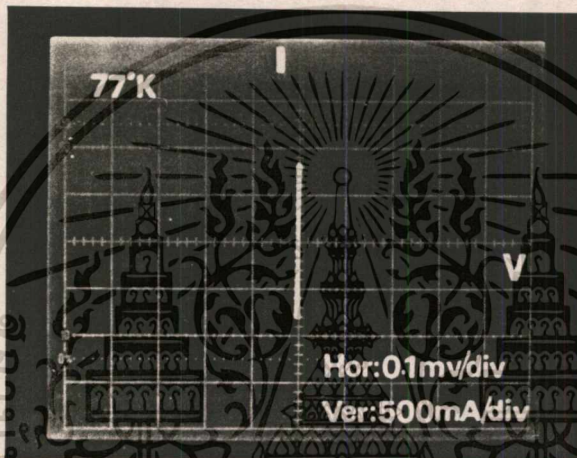
รูปที่ 3.19 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน

ใช้วงจรตามรูปที่ 3.19 วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้ชุดทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวต้านทาน



เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รูปที่ 3.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิปกติ (25°C) โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

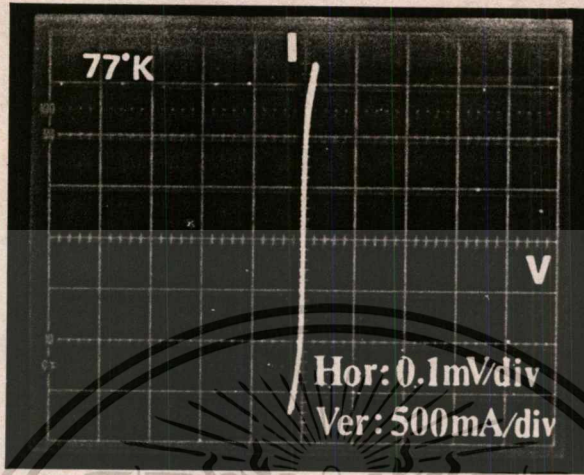
จากนั้นจุ่มชิ้นสารลงในไนโตรเจนเหลวจะสังเกตเห็นว่า กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันจะตั้งขึ้นในแกน Y นั้นแสดงว่าไม่มีความต่างศักย์เกิดขึ้นเลย มีแต่กระแสไฟฟ้า นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิ 77 K

3. ปรากฏการณ์ซิลบี (Silsbee effect)

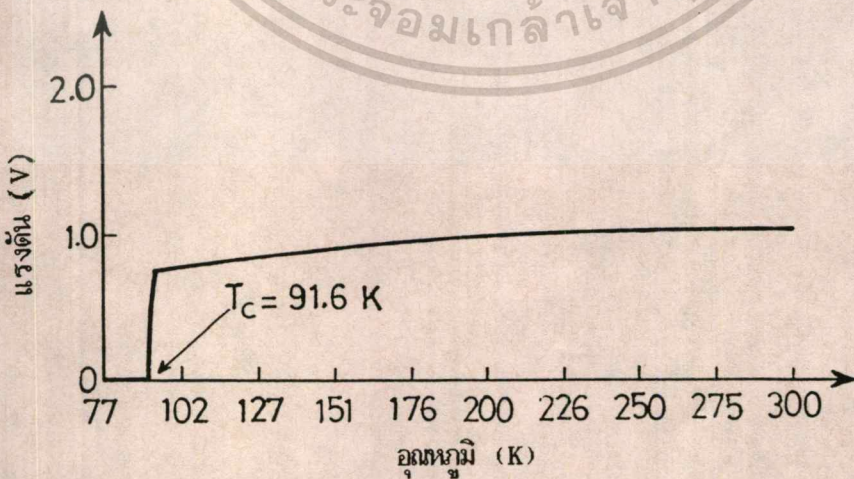
ใช้วงจรตามรูปที่ 3.19 โดยแช่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในไนโตรเจนเหลวจะปรากฏเส้นกราฟในจอของออสซิลโลสโคปอยู่ในแกน Y จากนั้นค่อยเพิ่มกระแสให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีก สังเกตเส้นกราฟจะค่อย ๆ เบนออกจากแกน Y แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มถูกทำลายแล้วดังรูปที่ 3.22 ค่าของกระแสสูงสุดที่ทำให้เกิดการเสียสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเรียกว่า กระแสวิกฤต (I_c)



รูปที่ 3.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะเกิดปรากฏการณ์ซิลสปี

4. การวัดอุณหภูมิวิกฤต

อุณหภูมิวิกฤตสามารถวัดได้ โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตที่สร้างขึ้น ผลการวัด
 แสดงไว้เป็นตัวอย่างดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิวิกฤต ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

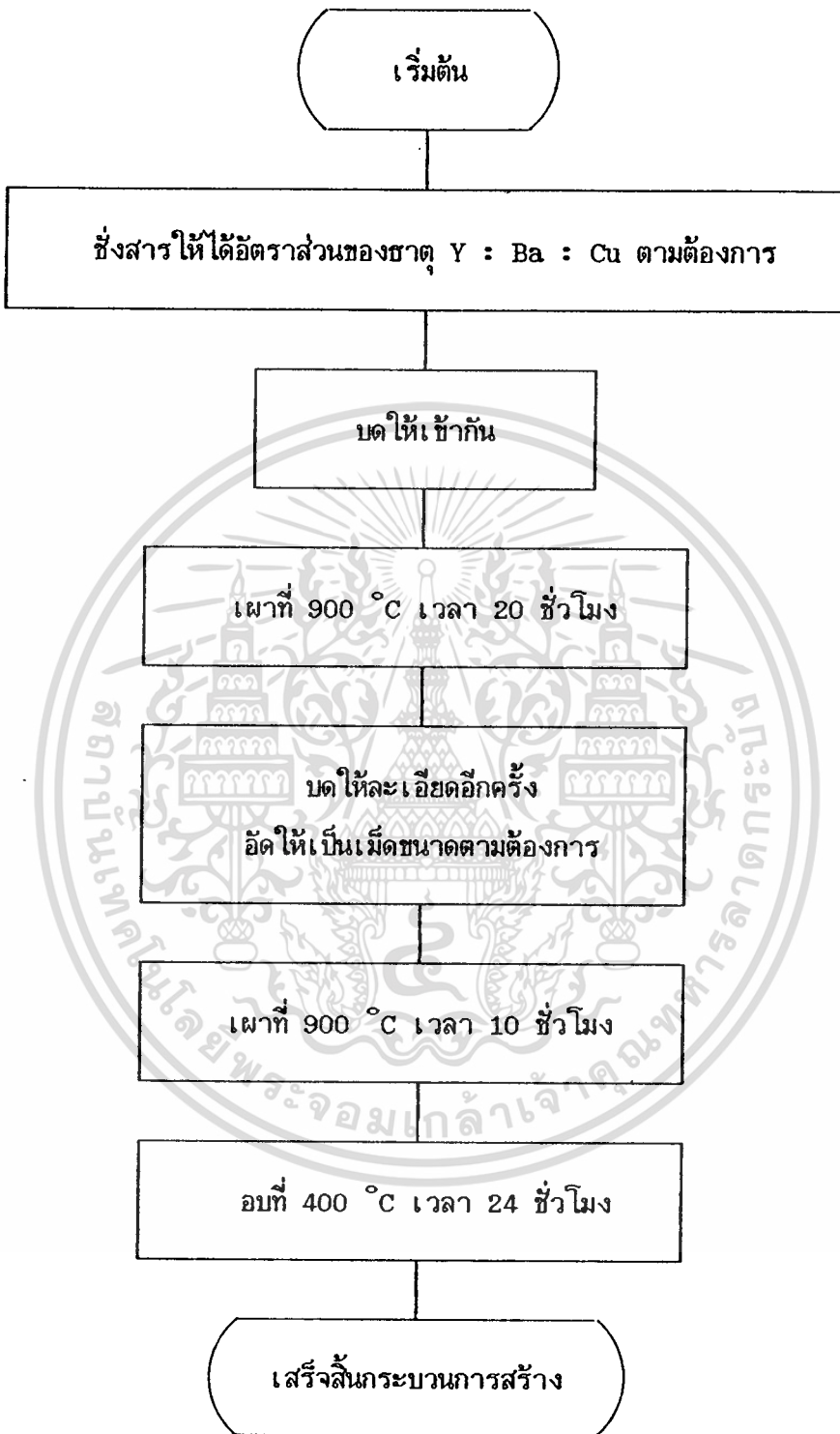
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ทั้ง 4 ชุด

ชุดที่	ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ Meissner effect ระยะความสูงของแม่เหล็ก	ความต้านทาน ที่อุณหภูมิ 77 K (โอห์ม)	ปรากฏการณ์ซิลส์บี Silsbee effect ให้ค่า I_c (mA)	อุณหภูมิวิกฤต (เคลวิน)
1	3 mm.	0	200	85
2	3 mm.	0	200	85
3	3 mm.	0	800	92
4	3 mm.	0	300	87

ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ปรากฏว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้ง 4 ชุด แสดงคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อเราลดอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต กล่าวคือ สามารถผลักแม่เหล็กให้ลอยขึ้นเหนือตัวมันเองได้ ซึ่งก็คือผลของปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และมีกระแสไหลโดยที่ไม่เกิดแรงดันตกคร่อม นั่นคือ มีความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่อเพิ่มกระแสมากขึ้นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะเสียสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามปรากฏการณ์ซิลส์บี รายละเอียดของผลการทดลองแสดงไว้เป็นตารางที่ 3.3 จะเห็นว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในชุดที่ 3 แสดงคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ดีกว่าชุดอื่น ๆ ไม่ว่าจะ เป็นค่าของกระแสวิกฤต หรือค่าของอุณหภูมิวิกฤต จึงเลือกใช้เวลาในการเผาสารประกอบตามตัวอย่างชุดที่ 3 คือ $T_1 = 20$ ช.ม. , $T_2 = 10$ ช.ม. $T_3 = 24$ ช.ม. ดังนั้นกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดเซรามิก ตระกูล Y ซึ่งจะถูกใช้เป็นกระบวนการมาตรฐาน สำหรับเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ แสดงขั้นตอนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการมาตรฐานสำหรับ
สร้างตัวนำไฟฟ้ายังขวด ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

หลังจากที่ได้กำหนดกระบวนการสร้างซึ่งจะใช้เป็นมาตรฐาน สำหรับเตรียมตัวอย่าง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว จึงทดลองสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นิยมสร้างเพื่อใช้วิเคราะห์หาข้อมูลกันมาก และรู้จักกันดีในกลุ่มของนักวิจัยทั่วโลก

การทดลอง

1) ซึ่งสารประกอบที่จะใช้ในกระบวนการสร้างให้ได้น้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณได้ โดยปริมาณสารประกอบที่ต้องการใช้ในการสร้างแต่ละครั้งจะถูกเพิ่มหรือลดตามส่วน ตามความต้องการ น้ำหนักของสารประกอบที่จะใช้ทดลองสร้างครั้งนี้มีดังนี้

- อิตเทรียมออกไซด์หนัก (Y_2O_3) $112.75/20 = 5.64$ กรัม
- แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) $394.08/20 = 19.70$ กรัม
- คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) $238.32/20 = 11.92$ กรัม

2) ผสมสารประกอบทั้ง 3 ชนิดในครกบดยา บดผสมให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อความเหมาะสมและเป็นมาตรฐาน จึงกำหนดให้บดผสมสารประกอบนาน 1 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน เมื่อครบเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว จะได้สารประกอบสีน้ำตาลเข้ม หรือน้ำตาลไหม้เป็นผงละเอียด

3) นำสารประกอบที่ได้ใส่ในถ้วยเซรามิกทนความร้อนแบบ evaporate เผาต่อเนืองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$) ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง

4) เมื่อเผาครบ 20 ชั่วโมงแล้วทั้งให้เย็นตัว นำมาเชื่อมส่วนที่ไม่ต้องการออก ส่วนนี้จะมีสีเขียว นำส่วนที่เป็นผงเกล็ดสีด้ามมาบดให้ละเอียดอีกครั้ง

5) อัดเป็นเม็ดเพื่อให้อยู่ในสภาพที่นำมาทดสอบใช้งานได้สะดวก ขนาดของเม็ดตามความต้องการ ปกติจะใช้น้ำหนัก 500 มิลลิกรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และน้ำหนัก 2 กรัม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำหรับอัดเม็ดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร อัดด้วยแรงขนาด 1 ตัน และ 2 ตันตามลำดับ
 ไม้วารณใดจงทงสัน อักทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) หลังจากได้ขึ้นสารตามขนาดที่ต้องการแล้ว นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อีกครั้งโดยใช้เวลาในการเผานาน 10 ชั่วโมง
- 7) เมื่อเผาครบ 10 ชั่วโมงแล้ว ลดอุณหภูมิของเตามาที่ 400 องศาเซลเซียส เพื่ออบขึ้นสารให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ใช้เวลาในการอบนาน 24 ชั่วโมง
- 8) ลดอุณหภูมิเตาลงมาจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามต้องการ จากกระบวนการสร้าง เราสามารถสรุปเป็นแผนผังการสร้างได้ดังรูปที่ 3.24
- 9) นำสารตัวอย่างที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ได้แก่ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ การไร้ความต้านทาน ปรากฏการณ์เมลสบี และหาอุณหภูมิวิกฤต

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

คุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	ผลการทดสอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	ผลึกแม่เหล็กลอยสูง 3 mm.
ความต้านทานที่ 77 K	0 โอห์ม
กระแสวิกฤต (I_c)	800 mA
อุณหภูมิวิกฤต (T_c)	92 K

สรุปผลการทดลอง

กระบวนการสร้างที่ใช้เป็นมาตรฐาน สำหรับเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. นี้ สามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ซึ่งแสดงคุณสมบัติทุกประการของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ จากสารประกอบไนเตรตโดยกระบวนการผสมแบบเปียก

การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดออกฤทธิ์สูงเซรามิก แบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ นั้นสามารถเตรียมได้จากสารประกอบออกไซด์ของ อิตเทรียม แบริียม และทองแดง มาบดผสมกันแล้ว จึงนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง การบดผสมสารประกอบเพื่อให้เข้ากันได้ดี การกระจายของสารประกอบในสารผสมมีปริมาณเท่า ๆ กัน และเนื้อสารมีความละเอียดจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นขณะเผาที่ความร้อนสูงดีและสมบูรณ์ ในการพัฒนากระบวนการสร้างจึงพยายามหาวิธีผสมสารประกอบ เริ่มต้นให้ได้ดี และมีความละเอียดที่สูงขึ้น

วิธีหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งจะได้นำเสนอ คือการผสมสารประกอบแบบเปียก ซึ่งเป็น การผสมสารประกอบในรูปของสารละลาย โดยใช้สารประกอบไนเตรตเป็นสารประกอบ เริ่มต้นขั้นตอนการเตรียมดังนี้

สารประกอบเริ่มต้น

- 1 แบริียมไนเตรต ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$)
- 2 คอปเปอร์ทูไนเตรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$)
- 3 อิตเทรียมไนเตรต ($\text{Y}(\text{NO}_3)_3$)

กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากสารประกอบไนเตรต

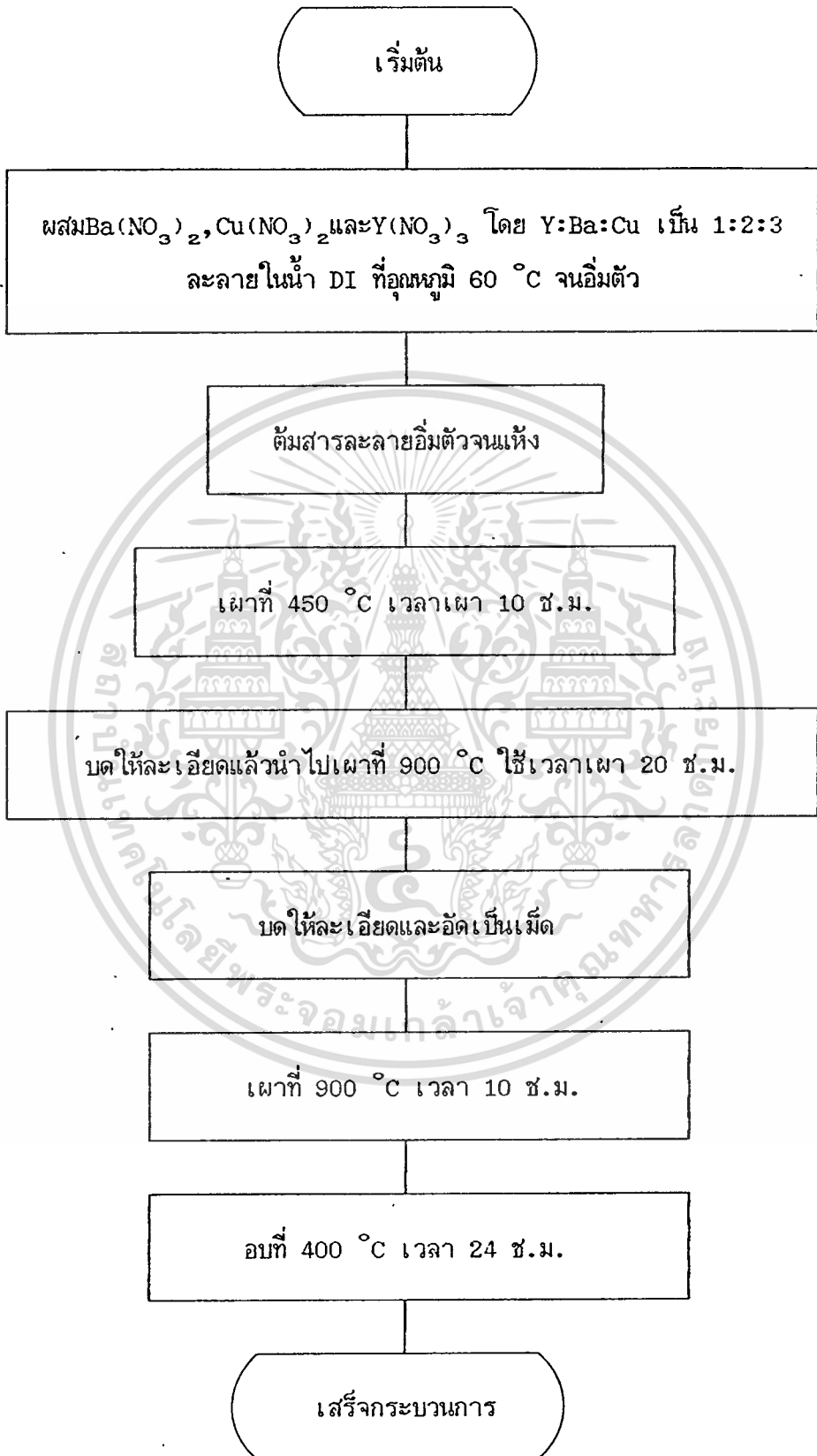
1. ซึ่งสารประกอบ $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ เพื่อให้ได้อัตราส่วนของธาตุ Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3

ดังนั้นเราจะใช้ปริมาณสารประกอบ ดังนี้

- สารประกอบ $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ หนัก 460 มิลลิกรัม (mg)
- สารประกอบ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ หนัก 580 มิลลิกรัม (mg)
- สารประกอบ $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ หนัก 950 มิลลิกรัม (mg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. ผสมสารประกอบทั้ง 3 ชนิดเข้าด้วยกัน แล้วละลายในน้ำบริสุทธิ์ DI ที่อุณหภูมิประมาณ 60°C จนได้สารละลายอิ่มตัว
3. ต้มสารละลายอิ่มตัวที่ได้จากข้อ 2 จนกระทั่งน้ำระเหยไปหมด
4. นำสารผสมที่ได้จากข้อ 3 มาเผาที่อุณหภูมิ 450°C เวลา 5 ชั่วโมง
5. สารที่ได้หลังจากเผาในข้อ 4 จะถูกนำมาบดและเผาตามขั้นตอนของกระบวนการสร้างมาตรฐานตามแผนผังในรูปที่ 3.24
6. กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ซึ่งเตรียมจากสารประกอบไนเตรตโดยวิธีการผสมแบบเปียกนี้ แสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.25

ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.5 ผลการวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ จากสารประกอบไนเตรต

คุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	ผลการทดสอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	
	สร้างจากสารประกอบไนเตรต	สร้างจากสารประกอบออกไซด์
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (ระยะความสูงของแม่เหล็ก)	ผลึกแม่เหล็กลอยสูง 2mm.	ผลึกแม่เหล็กลอยสูง 3mm.
ความต้านทานที่ 77 K	0 โอห์ม	0 โอห์ม
กระแสวิกฤต (I_c)	500 mA	800 mA
อุณหภูมิวิกฤต (T_c)	91 K	92 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ซึ่งสร้างขึ้นจากสารประกอบไนเตรต โดยใช้กระบวนการผสมสารแบบเปียกหรือการทำให้เป็นสารละลายนี้ แสดงคุณสมบัติทุกประการของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกันกับการเตรียมโดยกระบวนการมาตรฐาน ซึ่งใช้การผสมแบบแห้งหรือการบดผสม

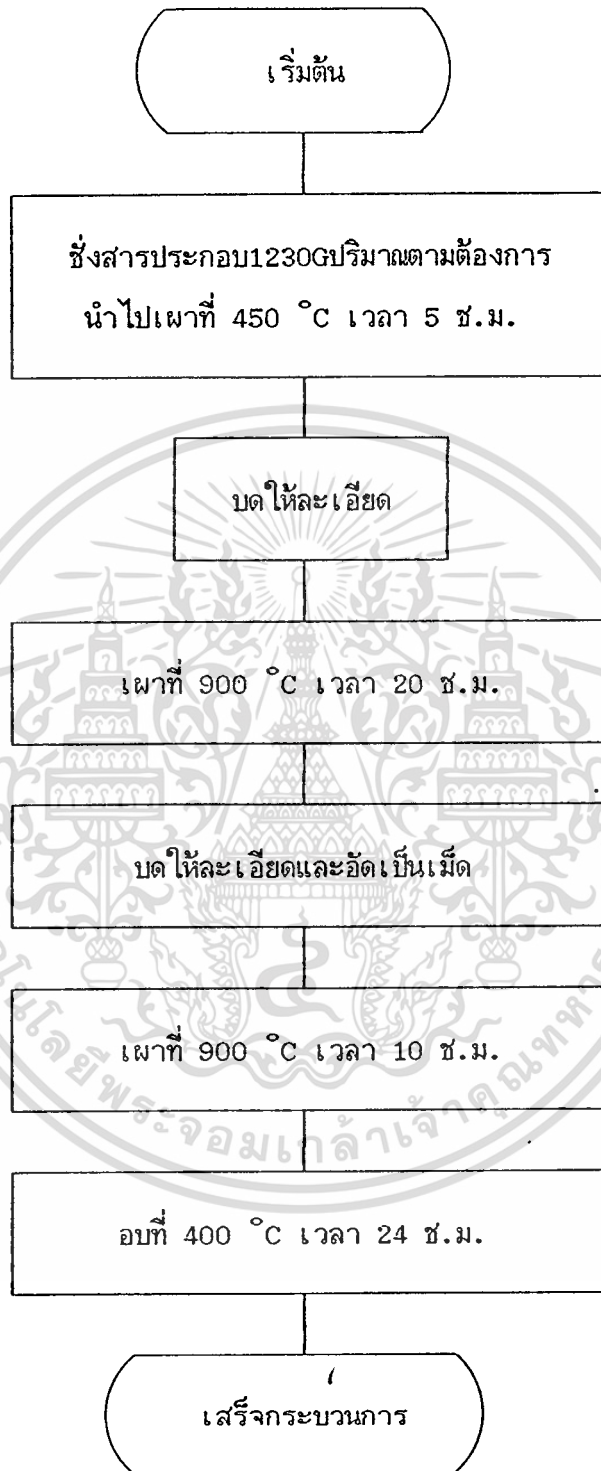
3.7 การเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ จากสารประกอบสำเร็จรูป

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้รับความนิยม และมีการศึกษากันมาก เนื่องจากมีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงถึงประมาณ 92 เคลวิน สามารถใช้ในไนโตรเจนเหลว ในการทำให้อุณหภูมิของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต เพื่อแสดงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ซึ่งไนโตรเจนเหลวสามารถหาได้ง่าย และมีราคาถูก (ในประเทศไทยสามารถซื้อได้ในราคาดีดราคาประมาณ 35 บาท) จึงได้มีการผลิตสารประกอบสำเร็จรูปสำหรับเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ออกจำหน่ายมีชื่อทางการค้าว่า SUPER FINE Type 1230G เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสร้างด้วยการผสม Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO และเป็นที่ยืนยันกระบวนการสร้างที่ใช้ จึงทดลองใช้ 1230G มาสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานโดยมีขั้นตอนเพิ่มเติมเล็กน้อยตามคำแนะนำของผู้ผลิต กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยใช้สารประกอบ 1230G แสดงไว้ในแผนผังรูปที่ 3.26

การทดลอง

- 1) ซึ่งสารประกอบสำเร็จรูป 1230G นำหนัก 5 กรัม นำไปเผาที่อุณหภูมิ $450^{\circ}C$ ใช้เวลาเผา 5 ช.ม.ตามคำแนะนำของผู้ผลิต
- 2) สารที่ได้หลังจากผ่านขั้นตอนข้อ (1) แล้วนำมาบดให้ละเอียด ทำการสร้างตามกระบวนการสร้างมาตรฐานของห้องปฏิบัติการฯ
- 3) ตัวอย่างที่ได้จะถูกทดสอบคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเปรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เทียบกับการสร้างจาก การใช้วิธีผสมสารประกอบตามปกติ
 ไม่วาทกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 แสดงแผนผังกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ โดยใช้สารประกอบสำเร็จรูป type1230G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

จากการทดลองเตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยใช้สารประกอบสำเร็จรูป 1230G มีคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับที่ใช้การผสมสารประกอบ $BaCO_3$, CuO และ Y_2O_3 ดังตารางผลการทดลองที่ 3.5

ตารางที่ 3.6 ผลการวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างจากสารประกอบสำเร็จรูป 1230G

คุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	ผลการทดสอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	
	สร้างจากสารประกอบ 1230G	สร้างจากสารประกอบออกไซด์
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (ระยะความสูงของแม่เหล็ก)	แม่เหล็กลอยสูง 3mm.	แม่เหล็กลอยสูง 3mm.
ความต้านทานที่ 77 K	0 โอห์ม	0 โอห์ม
กระแสวิกฤต (I_c)	700 mA	800 mA
อุณหภูมิวิกฤต (T_c)	92 K	92 K

การใช้สารประกอบ 1230G ทำให้สะดวกขึ้น เนื่องจากไม่ต้องผสมสารประกอบเองซึ่งจะทำให้เกิดการผิดพลาดได้ในการชั่งสารเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสม แต่เนื่องจากสารประกอบ 1230G มีราคาแพงและน้ำหนักของสารประกอบ หลังการเผาจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนักสารประกอบก่อนเผา ทำให้สิ้นเปลืองมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การทดลองสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก Y-Ba-Cu-O อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในตระกูลของอิตเทรียม (Y-Ba-Cu-O) เป็นที่แพร่หลายมาก จึงได้มีการค้นคว้าสร้างกันมาก มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมไปเป็นสูตรต่าง ๆ เช่น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $Y_2Ba_3Cu_5O_{7-x}$, $YBa_2Cu_4O_y$, $Y_5Ba_8Cu_{11}O_y$ หรือ $YBaCu_3O_y$ เป็นต้น

เพื่อให้ได้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ที่ดีเหมาะสมกับการนำมาศึกษาการประยุกต์ใช้งานต่อไป เราจึงทดลองเปลี่ยนแปลงใช้อัตราส่วนอื่น ๆ มาสร้างโดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.24

การทดลอง

1 อัตราส่วนของ Y : Ba : Cu ที่จะนำมาทดลองสร้าง ได้แก่ 1:2:3 , 2:3:5 , 1:1:3 , 5:6:11 และ 1:2:4 ทำการหึ่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO ให้ได้อัตราส่วนตามที่กำหนด โดยใช้ปริมาณสารประกอบตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงปริมาณสารประกอบที่จะใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ตามอัตราส่วนต่าง ๆ

ชุดที่	อัตราส่วน	ปริมาณสารประกอบ (กรัม)		
		Y_2O_3	$BaCO_3$	CuO
1	1:2:3	1.74	6.10	3.67
2	2:3:5	1.5	3.95	2.65
3	1:1:3	2.26	3.95	4.76
4	5:6:11	2.82	5.92	4.37
5	1:2:4	2.51	8.77	7.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

“ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้”

2. เมื่อชิ้นสารประกอบทั้ง 5 ชุดเรียบร้อยแล้ว นำแต่ละชุดมาสร้างตามกระบวนการสร้างมาตรฐาน
3. ตัวอย่างทั้ง 5 ชุด จะได้ถูกทดสอบคุณสมบัติเปรียบเทียบกัน

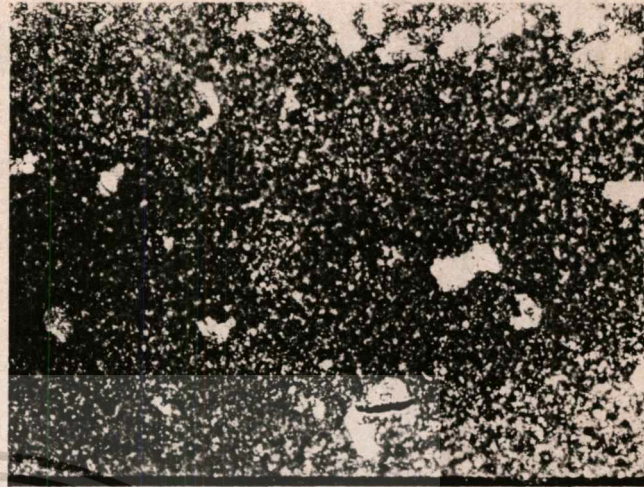
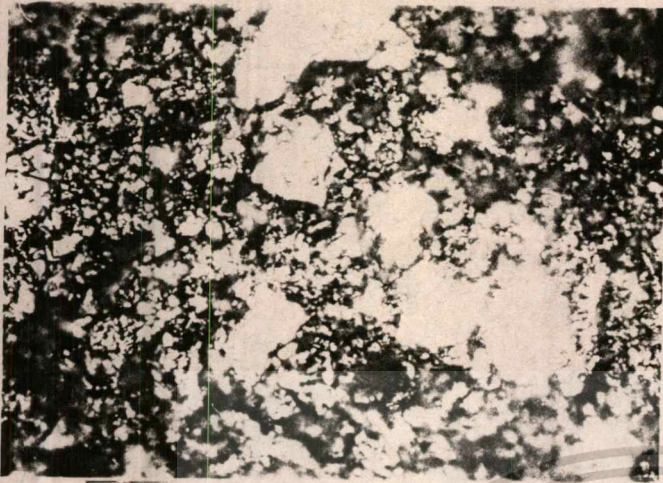
ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองทดสอบคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากตัวอย่างทั้ง 5 ชุดแล้ว ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางผลการทดลองตารางที่ 3.8 และผิวหน้าของชิ้นสารถ่ายภาพเปรียบเทียบกันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า แสดงไว้ในรูปที่ 3.27

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ที่อัตราส่วนต่างกันทั้ง 5 ชุด

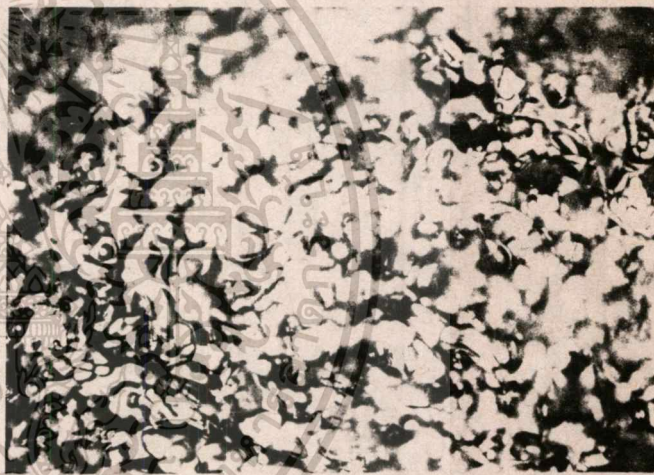
ชุดที่	อัตราส่วน Y:Ba:Cu	คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด				
		ลักษณะของ เม็ดสาร	ความสูงของ ปรากฏการณ์ ไมส์เนอร์	ความต้านทาน ที่ 77. K (โอห์ม)	กระแสวิกฤต (mA)	อุณหภูมิวิกฤต (K)
1	1:2:3	เนื้อละเอียดสีดำ มีเกล็ดวาวมาก	3 mm.	0	800	91-92
2	2:3:5	เนื้อละเอียดสีดำ มีเกล็ดวาวเล็กน้อย	2-3 mm.	0	300	89-92
3	1:1:3	เนื้อละเอียดสีดำ	2 mm.	0	200	89
4	5:6:11	สีดำนี้อ่อนเขียวปน	1 mm.	0	200	87-89
5	1:2:4	เนื้อละเอียดสีดำ มีเกล็ดมันวาวมาก	3 mm.	0	800	91-92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



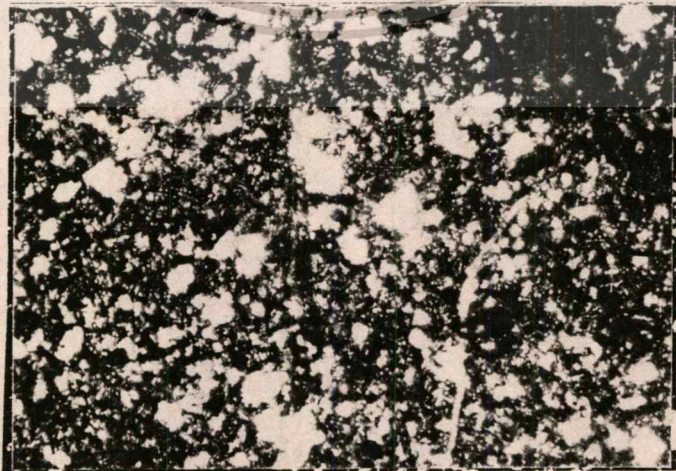
รูปที่ 3.27 ก. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

รูปที่ 3.27 ข. $Y_2Ba_3Cu_5O_{7-x}$



รูปที่ 3.27 ค. $YBaCu_3O_y$

รูปที่ 3.27 ง. $Y_5Ba_8Cu_{11}O_y$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 3.27 จ. $YBa_2Cu_4O_{7-x}$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 3.27 ก. ภาพถ่ายฉีกหน้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O อัตราส่วนต่าง ๆ นำไปใช้

จากผลการทดลองใน ตารางที่ 3.8 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวในชุดที่ 1 ซึ่งมีอัตรา ส่วนของ Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3 หรือ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ กับชุดที่ 5 ซึ่ง Y : Ba : Cu = 1:2:4 หรือ $YBa_2Cu_4O_{7-x}$ ให้คุณสมบัติต่างๆ ที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นผลของปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่ง $YBa_2Cu_4O_{7-x}$ ให้ผลที่ต่ำกว่า ส่วนในชุดที่ 2 , 3 และ 4 นั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวดีเท่าในชุดที่ 1 และ 5 ไม่ได้ โดยเฉพาะคุณสมบัติทางแม่เหล็กจากผลของปรากฏการณ์ไมสเนอร์ จะเห็นว่า ชุดที่ 1 และ 5 ยกตัวได้สูงกว่า นอกจากนี้ค่าของกระแสวิกฤตของตัวอย่างชุดที่ 2 , 3 และ 4 ยังต่ำกว่าชุดที่ 2 และ 5 อีกด้วย

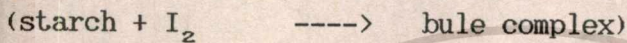
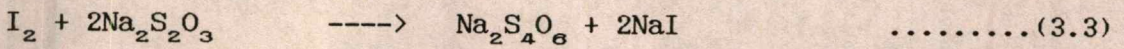
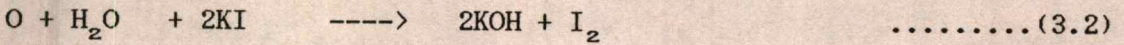
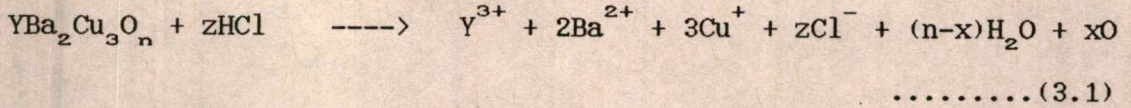
สิ่งที่น่าสนใจอีกอันหนึ่งคือ ตัวอย่างชุดที่ 1 , 2 และ 5 มีเกล็ดเล็ก ๆ ที่มีความมันวาวเหมือนกากเพชรแทรกอยู่ โดยเฉพาะชุดที่ 1 และ 5 นั้นมีอยู่มากทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นสาร ถ้าดูจากภาพถ่ายในรูปที่ 3.27 จะเห็นว่า มีส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนแน่น ผิวเรียบมัน สะท้อนแสง ในรูปที่ 3.27 ข. และ 3.27 จ. จะเห็นได้อย่างชัดเจน ผลึกเหล่านี้ น่าจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดเป็นเกล็ดคล้ายกากเพชรบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาว Y-Ba-Cu-O

3.9 เทคนิคการหาปริมาณออกซิเจนในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวอุณหภูมิสูง โดยวิธีไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน

ปริมาณของออกซิเจนในโมเลกุลของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวอุณหภูมิสูงแบบเซรามิกนั้น นับเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ยังไม่สามารถกำหนดได้ในกระบวนการสร้าง จะเห็นได้จากสูตรทางเคมีที่ต้องติดเป็นค่าตัวแปรไว้ เช่น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.4}O_x$ เป็นต้น ดังเห็นในการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวนี้ เราจึงต้องหาปริมาณของออกซิเจนที่รวมตัวในโมเลกุล วิธีการหนึ่งที่ใช้ได้คือการไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน

กระบวนการ ไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน เป็นวิธีทางเคมีที่ใช้หาปริมาณของไอโอดีนในสารละลาย โดยใช้สารละลาย $Na_2S_2O_3$ ในการไตเตรต ในการทดลองไอโอดีนจะเกิดจากออกซิเจน ที่แยกตัวออกจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวที่ถูกละลายด้วย HCl แล้วเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลาย KI ปริมาณของไอโอดีนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในการปฏิกิริยา ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดังนั้น

$$x = (2n_o - \sum_{k1} v_{k1}) / 2 \dots\dots\dots (3.4)$$

$$(m_s / M_s) x = m_T / 2M_T \dots\dots\dots (3.5)$$

$$[m_s / (n_o M_o + \sum_{k1} n_{k1} M_{k1})] x = m_T / 2M_T \dots\dots\dots (3.6)$$

$$n_o = [(M_T m_s - \sum_{k1} v_{k1} M_{k1}) + m_T \sum_{k1} M_{k1}] / (2M_T m_s - M_o m_T) \dots\dots\dots (3.7)$$

เราจะนำปริมาณของสารละลาย $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ที่ถูกใช้ไปมาคำนวณตามสมการที่ (3.7) เราก็จะทราบปริมาณของอะตอมของออกซิเจนในโมเลกุลของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สารที่ใช้ในการทดลอง

1. เนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดน้ำหนักประมาณ 100-150 mg.
2. สารละลาย KI ความเข้มข้นประมาณ 0.66 g/ml
3. สารละลาย HCl ความเข้มข้น 10 %
4. สารละลาย $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ความเข้มข้น 0.015 g/ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเข้านเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 5. นำแบ่งอื่น ๆ ที่เตรียมขึ้นมาใหม่ ๆ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

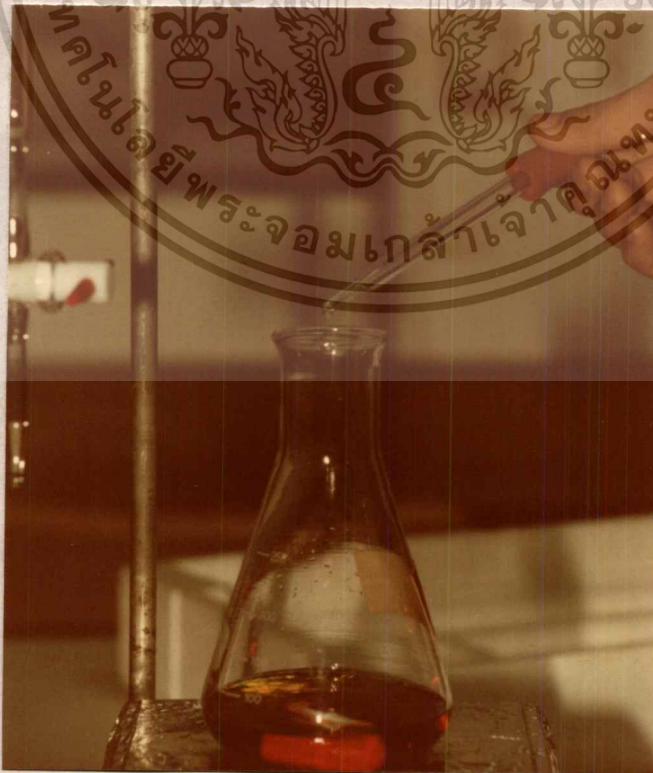
การทดลองโดยใช้ตัวอย่างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สร้างขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. วิธีการทดลองตามแผนผังรูปที่ 3.28 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) นำเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวอย่างประมาณ 100–150 mg มาบดให้ละเอียด นำมาละลายในสารละลาย KI ความเข้มข้น 0.66 g/ml ปริมาณ 30 ml และสารละลาย HCl ความเข้มข้น 10% ปริมาณ 10 ml

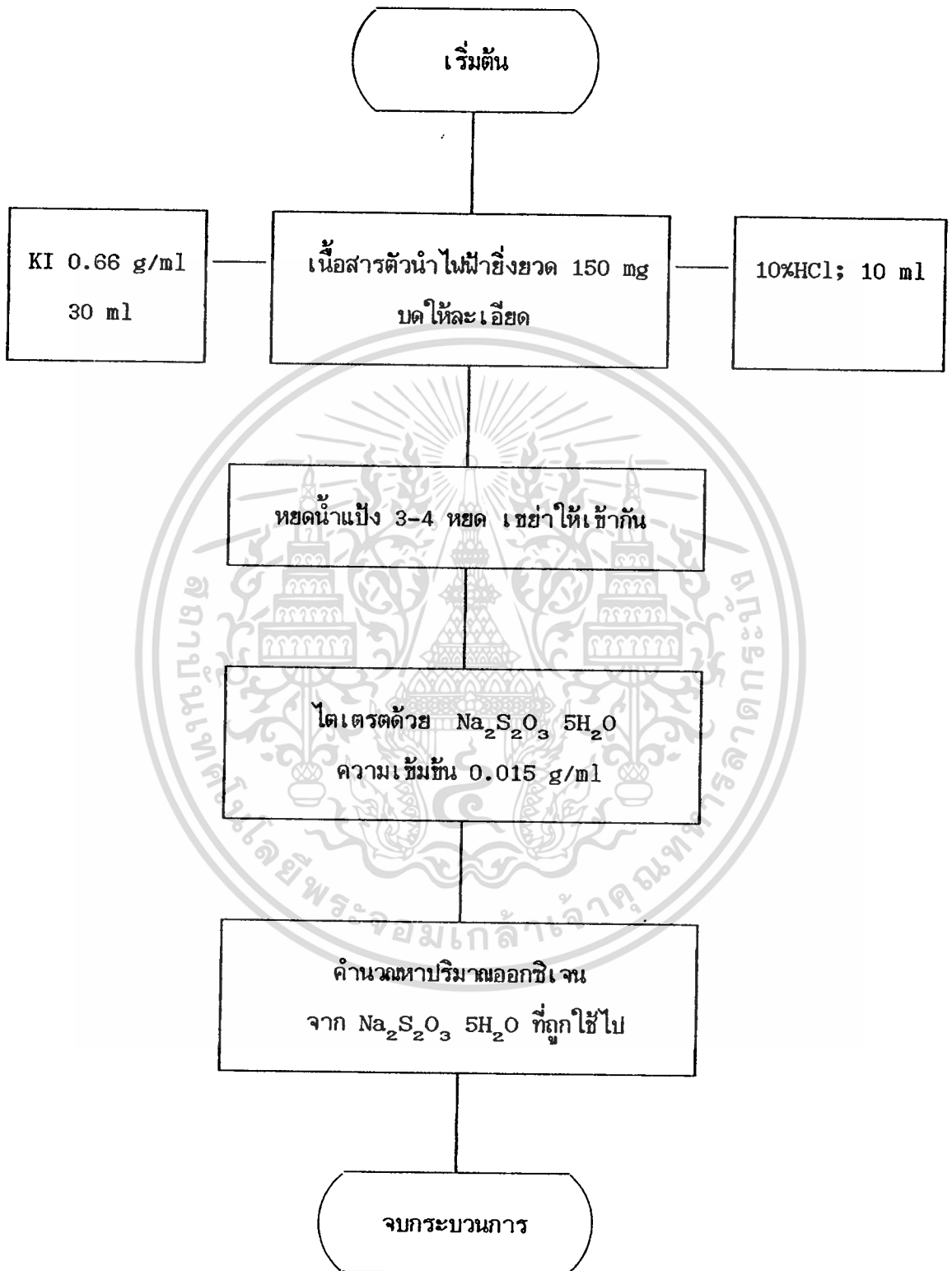
2) นำสารละลายที่ได้จากข้อ (1) มาหยดน้ำแบ่ง 3–4 หยด เขย่าให้เข้ากัน

3) ทำการไตเตรตด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.015 g/ml

4) นำปริมาณของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จากการไตเตรต มาคำนวณ เพื่อหาปริมาณของออกซิเจนที่อยู่ในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 3.28 การไตเตรตเพื่อหาปริมาณออกซิเจนในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก
ไม่ปรากฏใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 แผนผังแสดงขั้นตอนการหาปริมาณออกซิเจนในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาด ชนิดเซรามิก
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยวิธีไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตระกูล Y ; $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

มีออกซิเจนอยู่ประมาณ 6.7-6.9 อะตอมต่อโมเลกุล

ตัวอย่างการคำนวณ

สารตัวอย่างเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

ปริมาณของ $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ที่ได้ใช้ไปในการไทเตรต = 13.3 ml

- Molecular weight ของสารต่าง ๆ

$$Na = 22.990 \text{ g.}$$

$$S = 32.064 \text{ g.}$$

$$O = 15.999 \text{ g.}$$

$$H = 1.008 \text{ g.}$$

$$Ba = 137.34 \text{ g.}$$

$$K = 39.102 \text{ g.}$$

$$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O = 248.105 \text{ g.}$$

$$M_T = M_{Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O} = 248.105 \text{ g.}$$

$$m_s = 0.15 \text{ g.}$$

$$M_T m_s = 248.105 \text{ g.} \times 0.15 \text{ g.} = 37.216$$

$$\sum_{k=1}^n V_{k1} = (1 \times 3 + (2 \times 2) + (3 \times 1)) = 10$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (0.015 g/ml) หรือ (13.3 ml) ไม่ควรนำออกใช้ 0.1995 ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^n M_{k1} &= 1(M_Y) + 2(M_{Ba}) + 3(M_{Cu}) \\
 &= (1 \times 88.905) + (2 \times 137.34) + (3 \times 63.54) \\
 &= 554.205
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 n_o &= (37.216 \times 10) + (0.1995 \times 554.205) / (2 \times 37.216 - 15.999 \times 0.1995) \\
 &= 372.16 + 110.56 / 74.432 - 3.192 \\
 &= 482.72 / 71.24 \\
 &= 6.776
 \end{aligned}$$

หมายเหตุ

$$M_T = \text{molar mass of Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

$$m_T = \text{weight of Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O used}$$

$$m_s = \text{weight of sample}$$

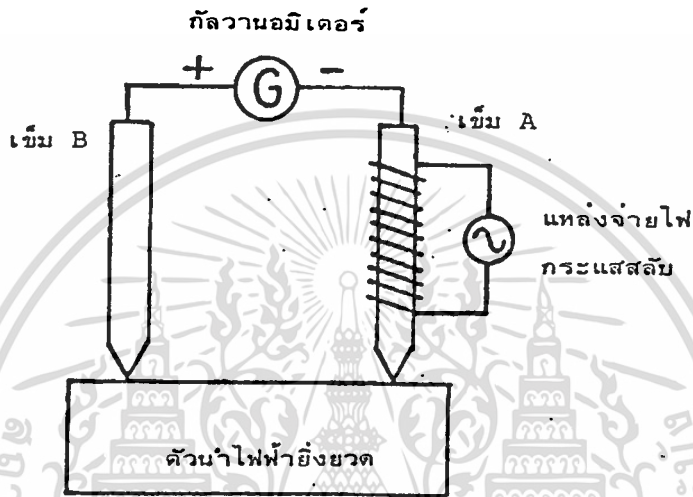
$$n_o = \text{จำนวน oxygen ที่ต้องการหา}$$

$$V_{k1} = \text{Valency of atom}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การทดลองหาชนิดของพาหะนำประจุเอกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O

เพื่อศึกษาว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง Y-Ba-Cu-O ที่เตรียมขึ้น มีพาหะนำประจุเป็นชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าว จะใช้ชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การหาชนิดของพาหะนำประจุเอกในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากรูปที่ 3.30 จะเห็นว่า ใช้เข็ม 2 เล่ม จัดบนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ใช้เป็นตัวอย่างในการทดลอง ที่เข็ม A จะมีลวดทั้งสแตนเลสอยู่โดยรอบ ทำหน้าที่เป็น เข็มความร้อน เข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ใช้กัลวานอร์มิเตอร์ต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกต่อเข้ากับเข็ม B และขั้วลบต่อเข้ากับเข็ม A เริ่มให้ความร้อนแก่เข็ม A เข็มของกัลวานอร์มิเตอร์ ถ้าเข็มของกัลวานอร์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกแสดงว่าพาหะนำประจุเอกคือ โฮล แต่ถ้าเข็มของกัลวานอร์มิเตอร์ชี้ไปทางลบ แสดงว่าพาหะนำประจุเอก คือ อิเล็กตรอน

ผลการทดลอง

เมื่อเข็ม A ร้อนขึ้นปรากฏว่า เข็มของกัลวานอร์มิเตอร์ ชี้เอนไปทางบวก แสดงว่า มีประจุบวกเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานอร์มิเตอร์ทางขั้วบวก ทำให้เข็มของกัลวานอร์มิเตอร์ชี้เอนไปทางบวก ดังนั้นพาหะนำประจุเอกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่ทำการวัดนี้คือ โฮล ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 แนวทางการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ชนิดเซรามิก

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ชนิดเซรามิก มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของจุดเดือดของ ไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีราคาต่ำ ทำให้การศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้เปิดกว้างมากขึ้นกว่าเดิม การวิจัยเพื่อนำคุณสมบัติเด่นเหนือตัวนำทั่วไปมาประยุกต์ใช้งานจึงมีความเป็นไปได้มากขึ้น แม้ว่าการพัฒนาจะยังคงมีปัญหา เนื่องจากการเป็นเซรามิก มีความเปราะ ไม่สามารถตัดงอไปมาได้ เป็นปัญหาสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องแก้ไข มีนักวิจัยจำนวนมากที่พยายามแก้ไขข้อเสียนี้ ยกตัวอย่างเช่น

- ศาสตราจารย์ มัสสุโมโตะ (Professor Masumoto) แห่งสถาบันวิจัยวัสดุ มหาวิทยาลัยโตโยกุกุ พยายามทำสารเซรามิกให้อยู่ในรูปเส้นเทป โดยนำเอา แลนทาเนียม สตรอนเทรียม และทองแดง มาผสมรวมกันที่อุณหภูมิสูงเป็นโลหะผสม และทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว

- กลุ่มตาคิฮาวา (Tachigawa group) แห่งสถาบันวิจัยโลหะแห่งชาติ ประเทศญี่ปุ่น กำลังทดลองทำเส้นลวดโดยใช้ แลนทาเนียม สตรอนเทรียม และทองแดง ซึ่งเกิดการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิ 40 K และสามารถตัดงอได้

- บริษัทโตชิบา ก็กำลังพัฒนาเส้นลวดและเส้นเทป ที่ใช้ส่วนผสมจาก อิตเทรียม แบเรียม และทองแดง

นอกจากตัวอย่างนี้แล้วยังมีอีกหลายกลุ่มที่พยายามพัฒนาฟิล์มบาง (thin-film) โดยใช้สารประกอบออกไซด์ของ อิตเทรียม แบเรียม และทองแดง

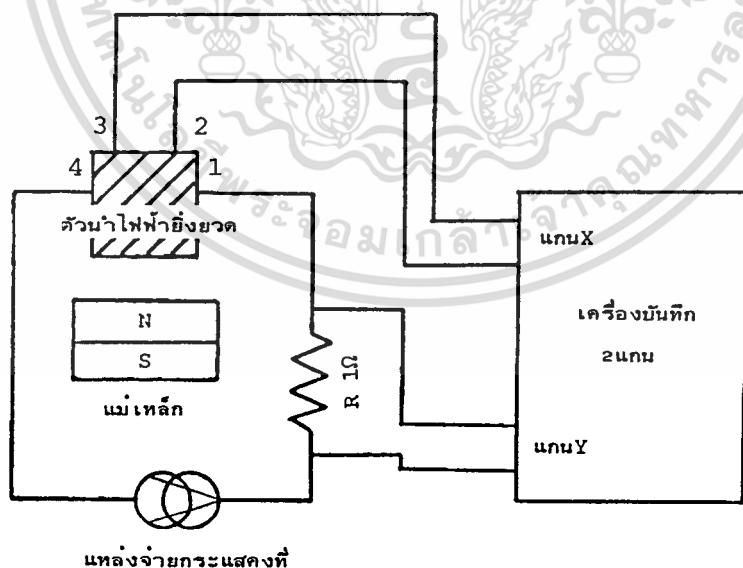
มีคุณสมบัติที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ชนิดเซรามิก คือคุณสมบัติทางแม่เหล็ก จึงได้ทำการศึกษา ทดลองเพื่อหาแนวทางการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น เป็นอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็กความไวสูง

4.1 แนวทางการประยุกต์เป็นหัววัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

การเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กให้กับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้น จนกระทั่งมากกว่าค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_c) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะเป็นการทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทำให้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเกิดขึ้นในเนื้อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดเซรามิก แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป ก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในเนื้อสาร ซึ่งเราสามารถวัดได้โดยใช้โวลต์มิเตอร์ จากการทดลองจะพบว่า เมื่อสนามแม่เหล็กจากภายนอกเพิ่มมากกว่าค่าของ สนามแม่เหล็กวิกฤต ขึ้นเรื่อยๆ ค่าของแรงดันที่วัดได้ จะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

จากผลดังกล่าวนี้ จึงได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่สร้างขึ้น ขณะที่เมื่อถึงขีดของสนามแม่เหล็กจากภายนอก เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ไปประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

การทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.1 วงจรการทดลองวัดสนามแม่เหล็ก ด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

1. เตรียมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ตามกระบวนการสร้างในแผนผังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.17 ทดสอบคุณสมบัติของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

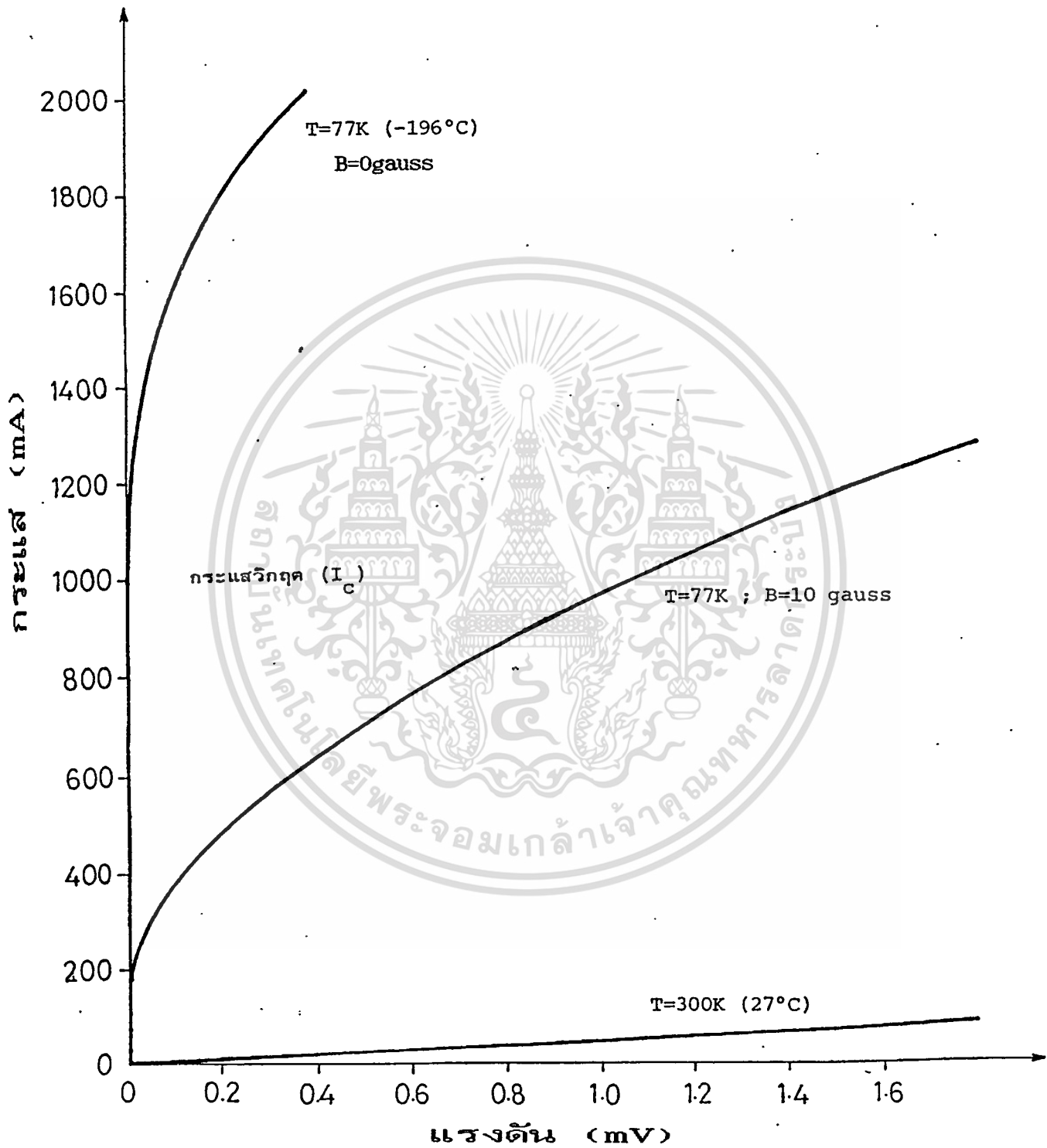
2. จัดเตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ตามวงจรรูปที่ 4.1 โดยป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าระหว่างขั้ว 1 และ 4 ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวอย่าง แล้ววัดแรงดันคร่อมขั้ว 2 และ 3 ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวอย่าง ทางแกนนอนของเครื่องบันทึก 2 แกน ส่วนที่แกนนอนของเครื่องบันทึก 2 แกน วัดแรงดันคร่อมความต้านทาน 1 โอห์ม เพื่อแสดงค่าของกระแสที่ไหลในวงจร

3. วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวอย่าง ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 300 เคลวิน) บันทึกผลที่ได้ด้วยเครื่องบันทึก 2 แกนบนกระดาษกราฟที่เตรียมไว้บันทึกผลการทดลอง

4. ทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิของจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว (อุณหภูมิ 77 เคลวิน) บันทึกผลที่ได้ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดิมที่ใช้บันทึกผลในข้อ 3 เพื่อสังเกตค่าของกระแสวิกฤต (I_c) ขณะที่ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กภายนอกมารบกวน ($B = 0$)

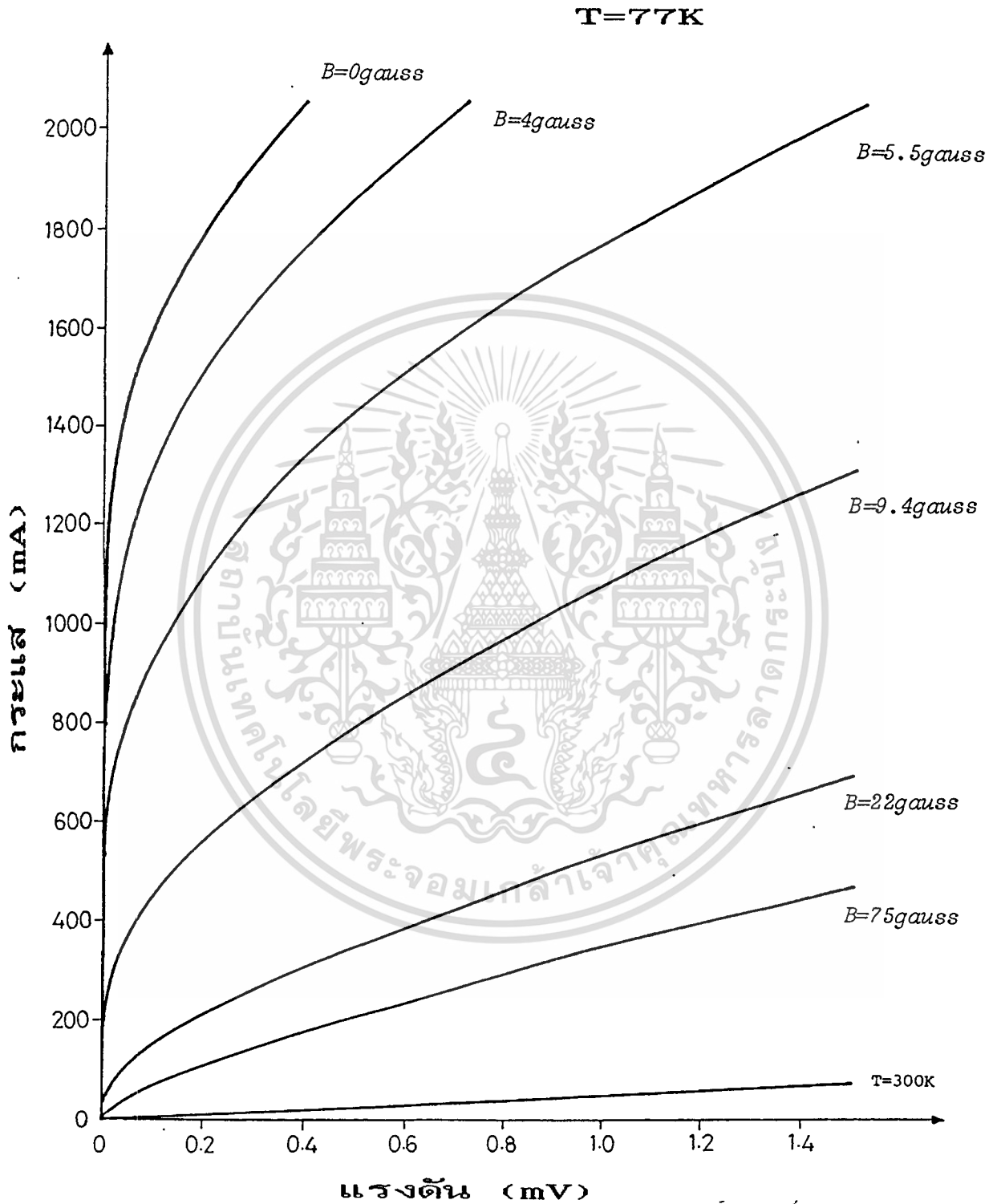
5. ให้สนามแม่เหล็กภายนอกมีความเข้ม 10 เกาส์ ($B = 10 \text{ gauss}$) แก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะที่อุณหภูมิอยู่ที่ 77 เคลวิน วัดคุณสมบัติของกระแสกับแรงดัน บันทึกผลลงในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกันกับการทดลองในข้อ 3 และ 4 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2

6. ทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ภายใต้อิทธิพลของความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกัน โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองข้อ 3 , 4 และ 5 จากนั้นค่อยๆเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กขึ้น บันทึกผลลงในกระดาษกราฟแผ่นใหม่ที่เตรียมไว้บันทึกผลการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และได้รับสนาามแม่เหล็กความเข้ม 10 เกาส์ ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เมื่อได้รับผลของความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ขณะที่ขึ้นสารมีอุณหภูมิ 300 K นั้นจะไม่แสดงคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือแสดงคุณสมบัติของตัวต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าไม่สูงนัก ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิวิกฤต แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าค่าของอุณหภูมิวิกฤต จะเห็นว่าขณะที่กระแสไหลผ่านมีค่าไม่มาก (น้อยกว่าค่าของกระแสวิกฤตในที่มีพิจารณาที่กระแสมีค่าน้อยกว่า 1 แอมป์) จะไม่มีค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารตัวอย่าง แสดงว่าเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น แต่เมื่อให้กระแสมากขึ้น มากกว่า 1 แอมป์ จะเกิดค่าแรงดันตกคร่อมขึ้น อาจพิจารณาได้ว่า เป็นผลเนื่องจาก สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าว จะทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทำให้เกิดค่าความต้านทานขึ้นในเนื้อสาร จึงปรากฏค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร

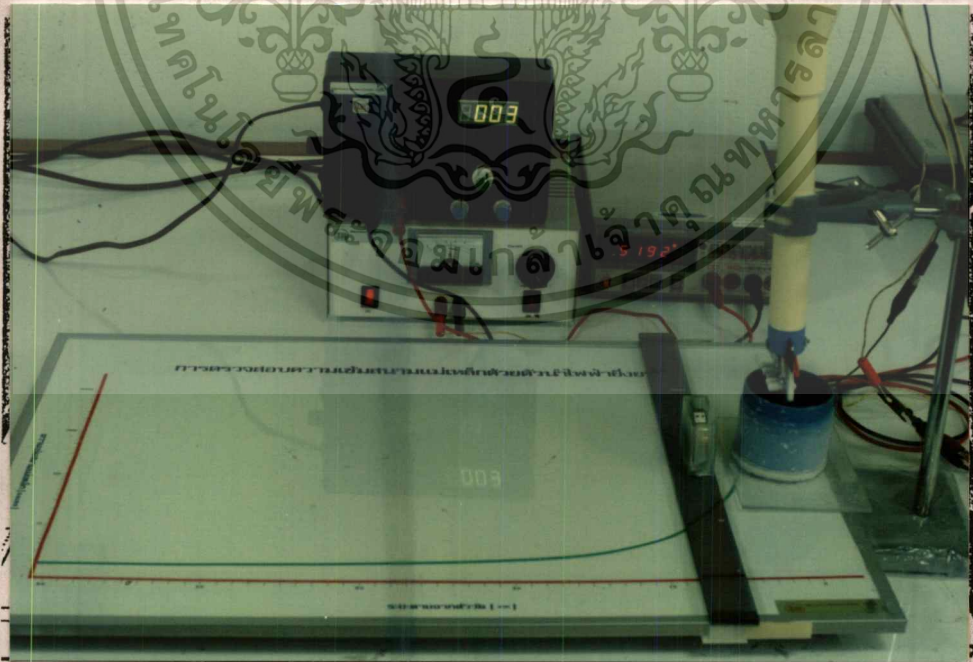
การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยความเข้มสนามแม่เหล็ก สามารถยืนยันได้โดยการทดลองให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า กระแสวิกฤตมีค่าลดลงเหลือ 150 มิลลิแอมป์ หรือตามผลการทดลองในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นั่นคือเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าลดลงด้วย

ผลการทดลองตามรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น มีคุณสมบัติในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กได้ โดยแสดงให้เห็นเป็นค่าของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารนั่นเอง ซึ่งถ้านำค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดังกล่าวไปแสดงผลโดยใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ แปลงค่าแรงดันให้เป็นค่าของหน่วยการวัดสนามแม่เหล็ก คือเกาส์ ก็จะได้เครื่องมือตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ชนิดเซรามิก เป็นส่วนหัววัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

ชุดตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหัวตรวจจับ ได้ถูกสร้างขึ้นสองชั้น เป็นชุดทดลองขั้นต้น มีส่วนประกอบดังนี้

1. หัววัดสนามแม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
2. แกนยึดหัววัด
3. กระดานแสดงค่าสนามแม่เหล็กมาตรฐาน
4. ดิจิตอล โวลต์มิเตอร์แสดงผล
5. แหล่งจ่ายกระแสคงที่
6. ครอบก๊าสไนโตรเจนเหลวและแช่หัววัด

ชุดทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ชุดทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ราคา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 แนวทางการประยุกต์เป็นหน่วยความจำสนามแม่เหล็ก

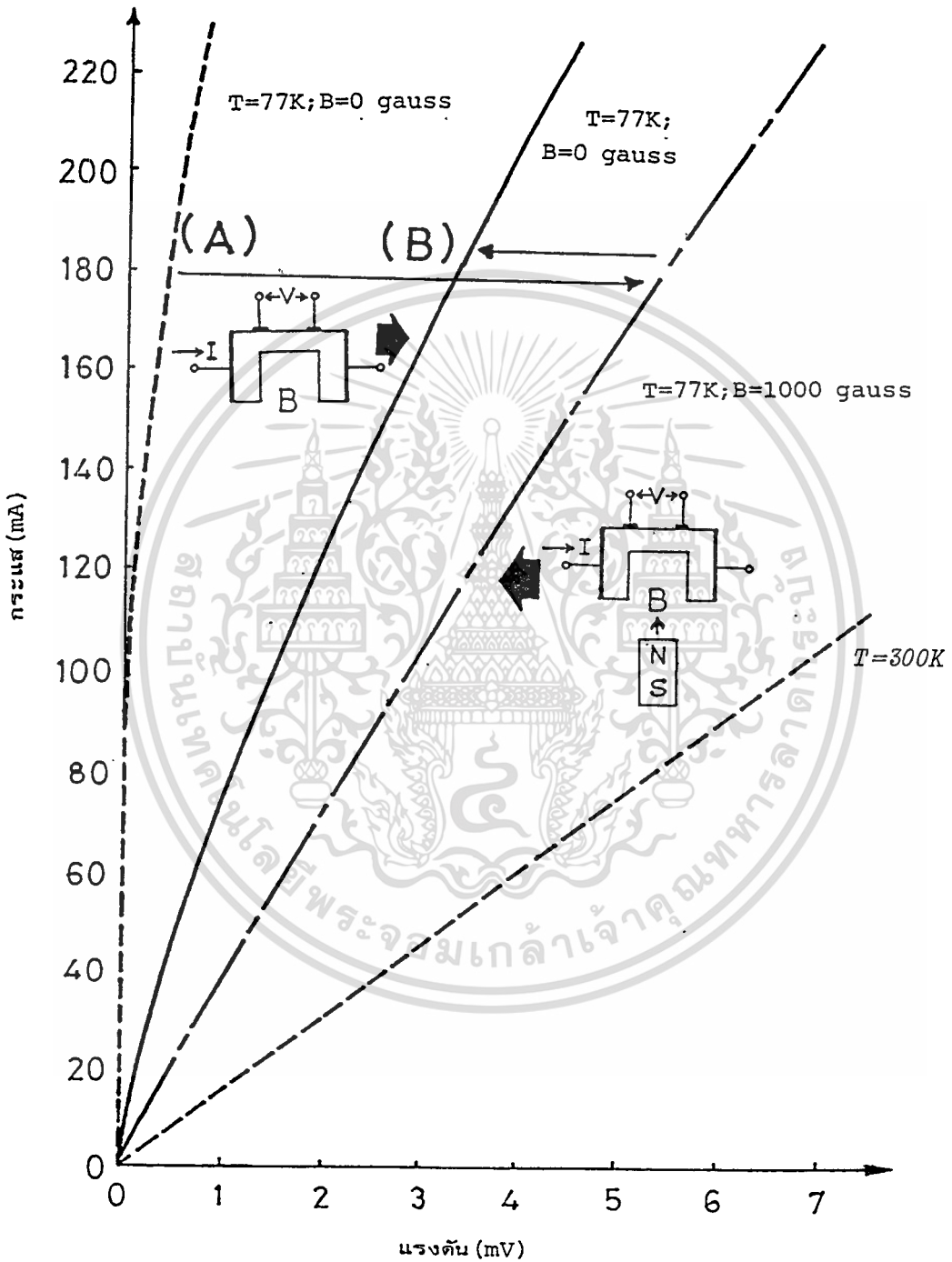
ผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก นอกจากจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กแล้ว ยังทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือ ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งในการศึกษาปรากฏการณ์ การจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า พบว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทบจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค่าแรงดันนั้นจะยังคงปรากฏอยู่ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นจะหมดไปแล้วก็ตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ถูกนิยามว่าเป็นผลของการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

การทดลองและผลการทดลอง

จัดเครื่องมือการทดลองตามวงจรรูปที่ 4.1 โดยให้แสดงผลการทดลองบนเครื่องบันทึก 2 แกน (x-y Recorder)

วิธีการทดลอง

- 1) วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น ในขณะที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ($T=300\text{ K}$) บันทึกผลที่ได้ลงในกระดาษกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.5
- 2) วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น ในขณะที่มีอุณหภูมิ 77 K (แช่ไว้ในไนโตรเจนเหลว) บันทึกผลที่ได้ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดิมเพื่อค่ากระแสวิกฤติ (I_c) สูงสุด ขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเลย
- 3) ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความเข้า 1000 เกาส์ ($B = 1000\text{ gauss}$) แก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวเดิมนั้น ขณะที่มีอุณหภูมิ 77 K วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน บันทึกผลที่ได้ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดิม เพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กต่อค่ากระแสวิกฤติ
- 4) นำสนามแม่เหล็กภายนอกชั่วคราวนั้นออกไป แล้ววัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันอีกครั้ง บันทึกผลที่ได้ในกระดาษกราฟแผ่นเดิมนั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ขณะเกิดการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ขณะที่สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวมีอุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเสมือนตัวต้านทานไฟฟ้าทุกๆ ไป ซึ่งคำนวณเป็นค่าความต้านทานได้ประมาณ 60 Ω และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต สามารถวัดค่ากระแสวิกฤตในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกได้ประมาณ 90 มิลลิแอมป์ แต่เมื่อมีอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กภายนอก 1,000 เกาส์ จะทำให้กระแสวิกฤตลดลง เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นออกไป พบว่าคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาว จะไม่กลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ โดยจะยังคงมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารอยู่ถึงแม้กระแสที่ไหลผ่านมีเพียง 50 มิลลิแอมป์ ก็ตาม ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าของกระแสวิกฤตขณะนี้เปลี่ยนเป็นประมาณ 5 mA แรงดันที่ตกค้างอยู่นี้ เราอาจจะกล่าวได้ว่า เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก ไฟฟ้าขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาว ซึ่งเราสามารถใช้เป็นแนวทางในการที่จะประยุกต์ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยาวเป็นหน่วยความจำสนามแม่เหล็กต่อไป

4.3 แนวทางการประยุกต์เป็นตัวตรวจสอบขั้วแม่เหล็ก

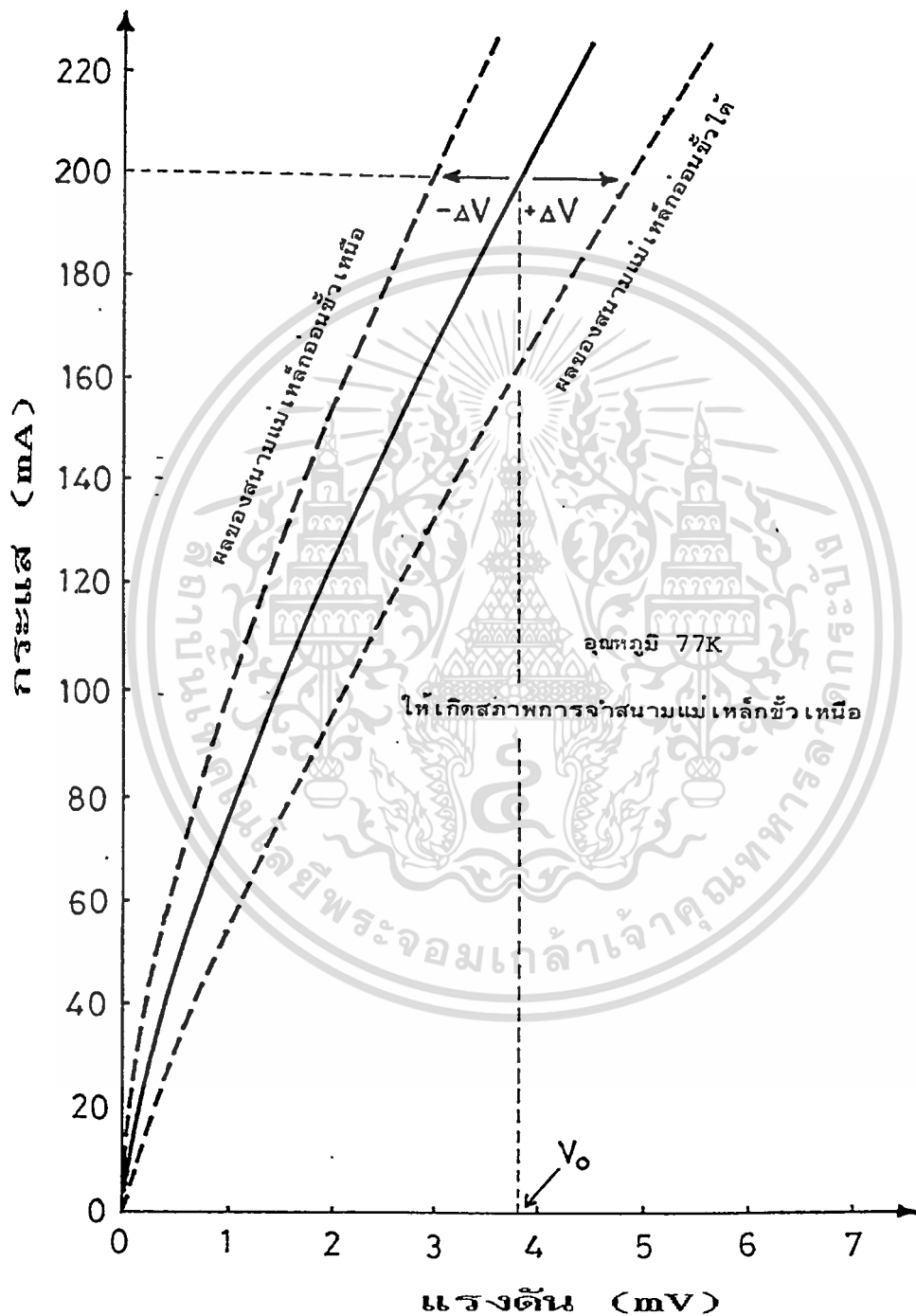
เนื่องจากความเข้มข้นแม่เหล็กสูงๆ สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ และเมื่อสนามแม่เหล็กความเข้มสูงนั้นหมดไปแล้ว ปรากฏว่าลักษณะกราฟคุณสมบัติกระแสกับแรงดัน ไม่กลับสู่ลักษณะเดิม ดังการทดลองในตอนที่ 4.2 ซึ่งเราเรียกว่า การจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้า และเมื่อทำการทดลองวัดสนามแม่เหล็กอ่อนทั้งขั้วเหนือ และขั้วใต้ ขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อยู่ในสภาวะการจำสภาพแม่เหล็กนี้ ปรากฏผลที่แตกต่างกันของขั้วทั้งสอง ดังที่แสดงในการทดลอง

การทดลองนี้จึงเป็นการศึกษา ผลที่เกิดขึ้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อน แก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ขณะเกิดสภาวะการจำสภาพแม่เหล็ก

การทดลองและผลการทดลอง

1. ใช้ตัวอย่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ชุดเดียวกับที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 4.2 และจัดชุดทดลองเช่นเดียวกับรูปที่ 4.1
2. ให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกขั้วเหนือ ความเข้ม 1,000 เกาส์ แก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน
3. นำสนามแม่เหล็กขั้วเหนือ ความเข้ม 1,000 เกาส์ ออกไป เพื่อให้เกิดสภาวะการจำสภาพแม่เหล็ก ทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน บันทึกผลลงบนกระดาษกราฟ
4. นำแม่เหล็กอ่อนขั้วเหนือ เข้ามาใกล้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวอย่างที่เกิดสภาวะการจำสภาพแม่เหล็กนั้น ทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน บันทึกผลลงในกระดาษกราฟแผ่นเดิม
5. เปลี่ยนให้สนามแม่เหล็กอ่อนขั้วใต้ ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4 บันทึกผลลงในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.6

ผลการทดลอง



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ขณะแสดงการตรวจจับชั่วสนามแม่เหล็กอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีสนามแม่เหล็กอ่อนชั่วขณะ เข้ามาใกล้กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน จะตั้งชันมากขึ้น แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นสนามแม่เหล็กชั่วได้ เข้ามาใกล้กราฟคุณสมบัติจะนอนลงมากขึ้น หรือถ้าเราให้กระแสคงที่ค่าหนึ่ง กำหนดค่าแรงดันที่ได้จากการจำสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าชั่วหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นค่า V_0 เมื่อมีสนามแม่เหล็กอ่อนชั่วขณะผ่านเข้ามา แรงดัน V_0 จะเปลี่ยนแปลงในทางลดลงหรือเป็น $-V$ แต่ถ้าเป็นสนามสนามแม่เหล็กอ่อนชั่วได้ แรงดัน V_0 จะเพิ่มขึ้น

เราจึงสามารถใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ชนิดเซรามิกเป็นหัววัดชั่วของแม่เหล็กอ่อนๆ ได้ โดยการทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดการจำสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าก่อนทำการวัด



บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ เป็นสารเซรามิก ที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิวิกฤตประมาณ 90 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว (77 K)

กระบวนการสร้างที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบนี้ ได้ถูกพัฒนาจากกระบวนการสร้างที่มีการนำเสนอทั่วไป โดยทำการศึกษาค้นคว้าอุณหภูมิและเวลา ที่ใช้ในการเผา สารประกอบ ให้เหมาะสมกับ เครื่องมือของห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งจัดเตรียมขึ้นที่ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการสร้างที่ได้พัฒนาขึ้นจะถูกใช้เป็นมาตรฐาน ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดเซรามิกตระกูลอิตเทรียม เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานต่อไป กระบวนการสร้างมาตรฐานนี้ สรุปได้ดังแผนผังรูปที่ 3.25 ในการทดลองสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ จากสารประกอบเริ่มต้นคือ Y_2O_3 , BaCO_3 และ CuO ผสมกันโดยมีอัตราส่วนของธาตุ Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ สามารถสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิประมาณ 92 K แสดงคุณสมบัติทุกประการของการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดคือ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ปรากฏการณ์การไร้ความต้านทาน ปรากฏการณ์ฮิลส์บี มีค่ากระแสวิกฤตประมาณ 0.8-1 แอมป์ มีอะตอมของออกซิเจนรวมอยู่ในโมเลกุล 6.7-6.9 อะตอม ($X = 0.1 - 0.3$)

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ นอกจากจะสร้างจากสารประกอบออกไซด์ คือ Y_2O_3 , BaCO_3 และ CuO แล้ว ยังสามารถเตรียมขึ้นได้จากสารประกอบไนเตรต คือ $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ โดยใช้การผสมสารในรูปของสารละลายแทนการบดผสม ซึ่งจะช่วยให้การผสมสารประกอบเป็นไปอย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผลจากการทดลองสร้างแม้จะให้คุณสมบัติทุกประการของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่ค่าของกระแสวิกฤตยังต่ำกว่าที่สร้างจากสารประกอบออกไซด์อยู่ ซึ่งอาจจะเป็นผลจากความบริสุทธิ์ของสารประกอบไนเตรต เริ่มต้นที่นำมาใช้ก็เป็นได้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เป็นคุณสมบัติที่น่าสนใจสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน จากการทดลองพบว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิกนี้ มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อได้รับผลของสนามแม่เหล็ก คือ เมื่อเราให้กระแสค่าหนึ่งที่ใกล้ค่าของกระแสวิกฤตของตัวเอง จะมีแรงดันเกิดขึ้น เมื่อได้รับผลของสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มมากพอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และค่าแรงดันนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้น จากผลการทดลองนี้ เราสามารถใช้ไมวากรณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิเด็ดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแนวทางในการประยุกต์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปเป็นหัวใจความเข้มสนามแม่เหล็กความไวสูงได้

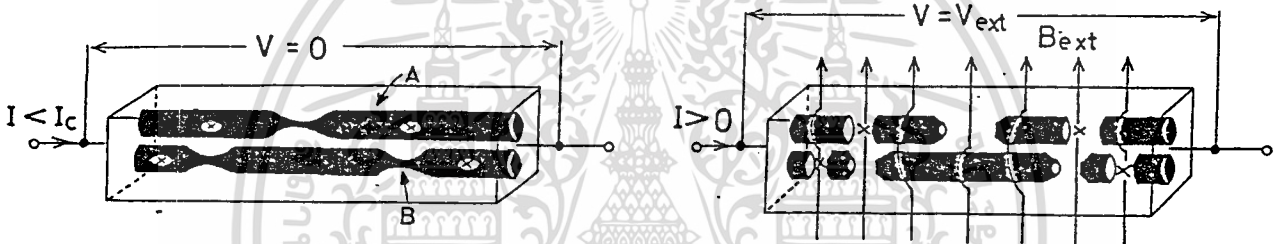
นอกจากผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กแล้ว ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดเซรามิกนี้ยังสามารถเกิดการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าได้ด้วย ซึ่งจะเห็นแนวทางการประยุกต์ใช้งานในรูปของหน่วยความจำสนามแม่เหล็กได้ และเมื่อเราทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิดเซรามิกนี้อยู่ในสภาวะการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว มันสามารถแสดงคุณสมบัติของการตรวจจับตัวของสนามแม่เหล็กอ่อน ๆ ได้ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในลักษณะตรงข้ามกันเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กอ่อน ๆ ที่มีขั้วต่างกัน ซึ่งก็จะเป็นแนวทางให้เรานำไปประยุกต์ใช้งานในรูปของหัวใจขั้วสนามแม่เหล็กได้

เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่สร้างขึ้นเป็นเนื้อเซรามิกที่สามารถถูกทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กได้ จึงนิยามาเสนอสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกนี้ว่า ในเนื้อสารที่สร้างขึ้น น่าจะประกอบด้วยส่วนของเนื้อสารที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดบนอยู่กับส่วนที่ไม่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และจากการที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด กระแสไหลได้โดยไม่เกิดความต้านทาน แสดงว่าส่วนเนื้อที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีการเชื่อมต่อกันถึงกันระหว่างจุดที่ทำกราวด์ ซึ่งอาจแสดงด้วยแบบจำลองได้ดังรูปที่ 5.1 การเชื่อมต่อกันนี้จะมีการต่อกันอย่างไม่เป็นระเบียบ บางส่วนที่ต่อกันอย่างอ่อน ๆ หรือเป็นส่วนคอด และส่วนที่ต่อกันอย่างแข็งแรง ทำให้บริเวณส่วนที่เชื่อมต่อกันหลวม ๆ อ่อน ๆ หรือที่เห็นเป็นส่วนคอดในรูปที่ 5.2 ก มีโอกาสถูกทำลายได้ง่าย

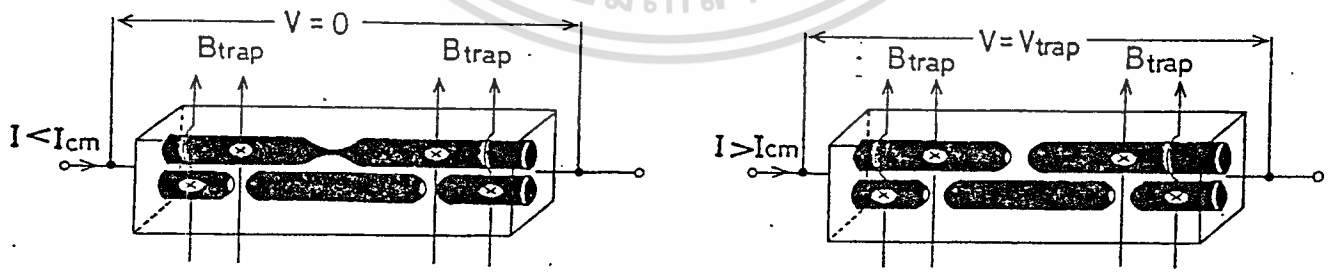
จากผลของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 5.2 ข และเมื่อผลของสนามแม่เหล็กทั้งหมดไปก็ยังปรากฏมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ (Btrap) แต่ไม่มากพอที่ทำให้ส่วนการนำไฟฟ้ายิ่งยวดขาดไปทั้งหมด ความต้านทานก็จะยังคงเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 5.2 ค แต่กรณีที่สนามแม่เหล็กตกค้างมากพอที่จะทำให้ส่วนการนำไฟฟ้ายิ่งยวดขาดออกหมด ก็จะเกิดแรงดันขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังในรูปที่ 5.2 ง ซึ่งก็คือ การเกิดการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น



รูปที่ 5.1 สมมติฐานแบบจำลอง โครงสร้างภายในของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซรามิก ส่วนที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเรียกว่า ส่วนการนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor part)



รูปที่ 5.2 ก. แสดงสภาพที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รูปที่ 5.2 ข. แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารขนาด V_{ext} เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอก B_{ext} ขณะที่มีการแสวกฤตไหล



รูปที่ 5.2 ค. แสดงให้เห็นว่า ไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสาร เนื่องจากมีเส้นทางเดินของกระแสต่อเนื่องกัน

รูปที่ 5.2 ง. แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารขนาด V_{trap} เนื่องจากมีการมีแตรปสนามแม่เหล็กไว้ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ขออนุญาต
 รูปที่ 5.2 แสดงการใช้แบบจำลอง โครงสร้างอธิบายการเสียดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ ก็ด้วยความร่วมมือจากผู้สนับสนุนหลายท่าน ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ผู้ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ให้แนวคิด ตลอดจนวิธีการแก้ปัญหาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ผู้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางให้ดำเนินไปตามลำดับขั้นตอนของการทำวิจัยที่ถูกต้องตรงเป้าหมาย ขอขอบคุณอาจารย์ สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการค้นคว้า และหาข้อมูลประกอบการวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนักศึกษาของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้ความสะดวกในทุก ๆ ด้าน ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิจัยมาจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ผู้เพียรของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนด้านการเรียน ให้การอบรม ให้ความรักและกำลังใจ แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ดุลยวัจน์ จอมแสง

หนังสืออ้างอิง

1. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง , ดุลยวัจน์ จอมแสง และ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช , " การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่พระจอมเกล้าลาดกระบัง ", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 11 , เล่มที่ 2 , หน้า 5.1.1 - 5.1.12 , ธันวาคม 2531
2. ดุลยวัจน์ จอมแสง , วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง , สมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร และ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช , " การประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ Y-Ba-Cu-O เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก " , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษาครั้งที่ 12 , หน้า 665 - 673 , พฤศจิกายน 2532
3. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง , สมเกียรติ ศุภเดช , ดุลยวัจน์ จอมแสง , สมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร , " แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก " , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 13 , หน้า 291-299 , พฤศจิกายน 2533
4. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง , สมเกียรติ ศุภเดช , ดุลยวัจน์ จอมแสง และสมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร , " เทคนิคการหาปริมาณออกซิเจน ในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง โดยวิธีไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน " , การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 , หน้า 116 - 117 , ตุลาคม 2534
5. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง , สมเกียรติ ศุภเดช และดุลยวัจน์ จอมแสง , " ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Y-Ba-Cu-O " , การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 , หน้า 836 - 837 , ตุลาคม 2532
6. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง , ดุลยวัจน์ จอมแสง และ สมเกียรติ ศุภเดช , " เครื่องมือวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง " , การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 , หน้า 588 - 589 , ตุลาคม 2533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Yukio Akiba , Wisut Titiroongruang , Tateki Kurosu , Masamori Iida and Terutaro Nakamura , " Electromagnetic Memory Effect in Superconducting Y-Ba-Cu-O System " , Oyobutsuri , Vol.58 , No.1 , 1989
8. Paul Grant , " Do it yourself Superconductors " , News Scientist , July , 1987
9. Yoshiteru Maeuo , Masatsune Kato and Toshizo Fujita , " Preparation of Y-Ba-Cu Oxides with Superconducting Transition above Liquid-Nitrogen Temperature " , Japanese Journal of Applied Physics , Vol. 26 , No. 4, April , pp. L329 - L331
10. Ienari iguchi , Hirohi Watanabe , Yuji Kasai , Takashi Mochiku , Akimitsu Sukichita , Shun-ichi Narumi and Eise Yamaka , " Superconductivity of Y-Ba-Cu-O Compound above Liquidnitrogen Temperature " , Japanese Journal of Applied Physics , vol 26 , No.4, April , 1987 , pp. L327 - L328
11. Charles P. Poole Jr. , Timir Datta , Horacio A. Farach , " Copper Oxide Superconductors " , John Wiley & Sons , 1988
12. Vladimir Z. Kresin , Stuart A. Wolf , " Fundamentals of Superconductivity " , Plenum Press , New York and London , 1990
13. Steven T. Ruggiero , David A. Rudman , " Superconducting Devices " , Academic Press , Inc. , 1990
14. Charles Kittel, " Introduction to Solid State Physics " , Sixth edition , John Wiley & Sons , Inc. , 1986 , pp. 317 - 358

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. V. Daniel Hunt , " Superconductivity Sourcebook " , John Wiley & Sons , 1989
 16. Jonathan L. Mayo , " Superconductivity The Threshold of a New Technology " , Tab Book Inc. , 1988
 17. David R. Tilley , John tilley , " Superfluidity and Superconductivity " , Second edition, Adam Hilger Ltd. 1986.
 18. S V Subta anyam , ESR Gopal , " High Temperature Superconductors " , John Wiley & Sons , 1989
 19. Yasuo Hikichi , Makoto Kato , Suguru Suzuki , Tsuyoshi Nomura and Masaaki Miyamoto , " Property and Structure of $YBa_2Cu_3O_x$ -Ag Composites Prepared from Nitrate Solutions " , Japanese Journal of Applied Physics Vol.29 , No.9 , September 1990 , pp.L1615 - L1617
 20. Arthur Fisher , " Superconductivity " , Popular Science , April 1988 , pp.54 - 58
 21. John Lamb , " Industry warms to superconductivity " ,New Scientist, 22 October 1987 , pp.56 - 61
 22. A.C. Rose-innes and E.H. Rhoderick , " Introduction to Superconductivity " , second edition , Pergamon press ,1978
 23. ดร. โทศล เพ็ชรสุวรรณ และ ดร.มาชามอริ อีตะ , " เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ " , บริษัท ดวงกมล จำกัด , หน้า 38-39
- เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก หน่วยและสัญลักษณ์ที่น่าสนใจ

ตารางที่ ก-1 หน่วยและสัญลักษณ์ที่น่าสนใจ

ปริมาณ	ชื่อหน่วย	สัญลักษณ์ของหน่วย
ความยาว	เมตร	ม. (m)
	เซนติเมตร	ซม. (cm)
	มิลลิเมตร	มม. (mm)
มวล	กรัม	ก. (g)
เวลา	ชั่วโมง	ชม. (h)
	นาที	นาที (min)
	วินาที	วินาที (sec)
อุณหภูมิ	เคลวิน	เคลวิน (K)
	เซลเซียส	เซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)
ความเข้มข้น แม่เหล็ก	เกาส์	เกาส์ (G)
แรงอัด	ตัน	ton
กระแสไฟฟ้า	แอมแปร์	A
แรงดันไฟฟ้า	โวลต์	V
ความต้านทาน	โอห์ม	Ω
ปริมาณสาร	โมล	Mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 แสดงอุณหภูมิ ณ จุดเปลี่ยนแปลงในหน่วยต่างๆ

	ฟาเรนไฮต์ (F)	เซลเซียส (C)	เคลวิน (K)
Absolute Zero	-459.4	-273	0
Liquid Helium (boiling)	-451.84	-268.8	4.2
Liquid Nitrogen (boiling)	-320.8	-196	77
Water Freezes	32	0	273
Room Temperature	80.6	27	300
Water Boils	212	100	373

หมายเหตุ การแปลงค่าระหว่างคิดดังนี้

1. องศาฟาเรนไฮต์ = $[(9/5) * \text{Degrees Celsius}] + 32$
2. องศาเซลเซียส = $(5/9)[\text{Degrees Fahrenheit} - 32]$
3. องศาเคลวิน = $\text{Degrees Celsius} + 273$

ตารางที่ ก-3 คำนำน้าหน่วย

ตัวคูณ	สัญลักษณ์	ค่านำหน้า	ตัวคูณ	สัญลักษณ์	ค่านำหน้า
10^{12}	T	เทระ	10^{-1}	d	เดซี
10^9	G	กิกะ	10^{-2}	c	เซนติ
10^6	M	เมกะ	10^{-3}	m	มิลลิ
10^3	k	กิโล	10^{-6}	μ	ไมโคร
10^2	h	เฮกโต	10^{-9}	n	นาโน
10^1	da	เด็คกะ	10^{-12}	p	พิคโต
			10^{-15}	f	เฟมโต
			10^{-18}	a	อัตโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข ตารางเทียบแรงดันออกของเทอร์โมคัปเปิลกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าแรงดันออกที่อุณหภูมิต่างๆของเทอร์โมคัปเปิล สายสี ฟ้า-ขาว ซึ่งใช้ในชุดควบคุม
อุณหภูมิเตาเผา

t (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.891	-6.035	-6.158	-6.262	-6.344	-6.404	-6.441	-6.458		
-100	-3.553	-3.852	-4.138	-4.410	-4.669	-4.912	-5.141	-5.354	-5.550	-5.730
(-)0	0.00	-0.392	-0.777	-1.156	-1.527	-1.889	-2.243	-2.586	-2.920	-3.242
(+)0	0.00	0.397	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.805	3.266	3.681
100	4.095	4.508	4.919	5.327	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.341	9.745	10.151	10.560	10.969	11.381	11.793
300	12.207	12.623	13.093	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.974
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.066	21.493	21.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.327	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.866
800	33.277	33.686	34.095	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.325	37.724	38.122	38.519	38.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.879
1000	41.269	41.657	42.045	42.432	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.238	46.612	46.985	47.356	47.726	48.095	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.049
1300	52.398	52.747	53.093	53.439	53.782	54.125	54.466	54.807		

หมายเหตุ แสดงค่าแรงดันมีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

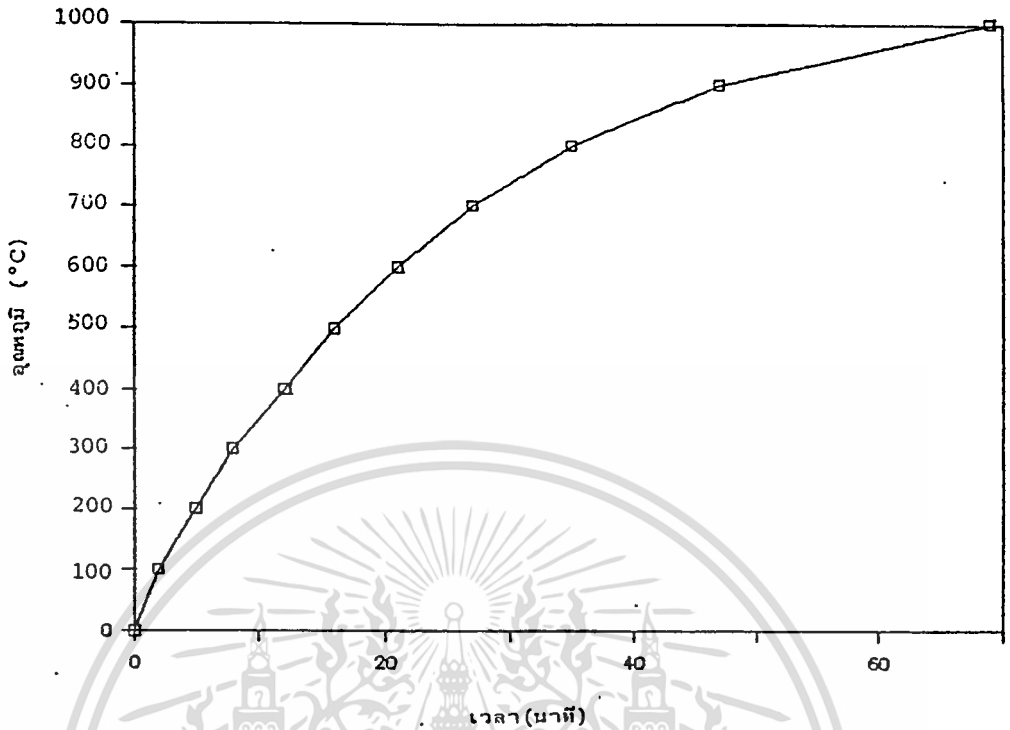
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าแรงดันออกที่อุณหภูมิต่างๆของเทอร์โมคัปเปิล สายสี แดง-ขาว
ซึ่งใช้ในชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

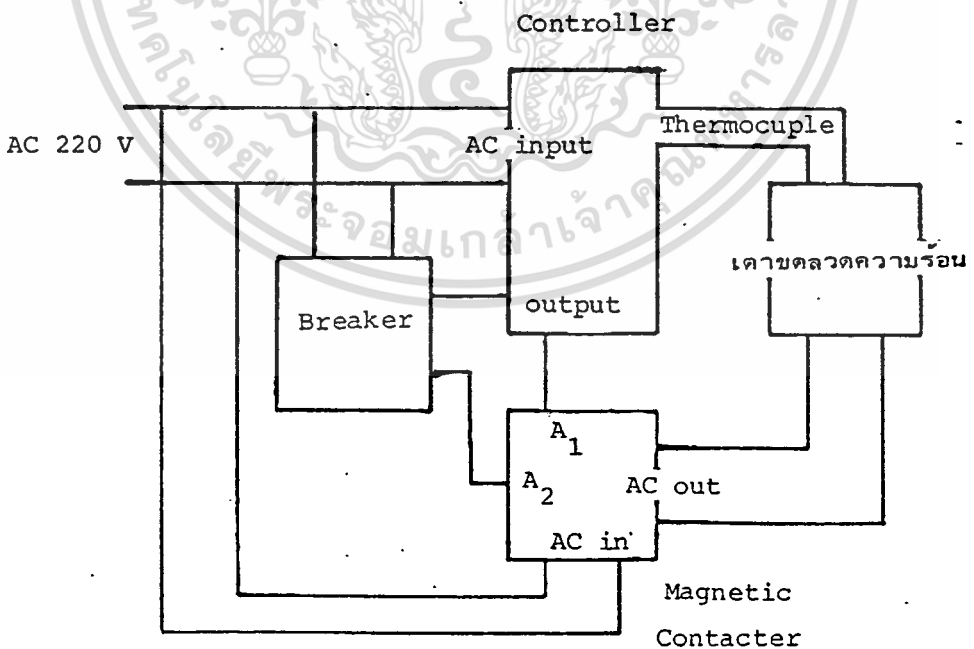
t(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.603	-5.753	-5.889	-6.007	-6.105	-6.181	-6.232	-6.258		
-100	-3.378	-3.656	-3.923	-4.177	-4.419	-4.648	-4.865	-5.069	-5.261	-5.439
(-)0	0.00	-0.383	-0.757	-1.121	-1.475	-1.819	-2.152	-2.475	-2.788	-3.089
(+)0	0.00	0.391	0.789	1.196	1.611	2.035	2.467	2.908	3.357	3.813
100	4.277	4.749	5.227	5.712	6.204	6.702	7.207	7.718	8.235	8.757
200	9.286	9.820	10.360	10.905	11.456	12.011	12.572	13.137	13.707	14.281
300	14.860	15.443	16.030	16.621	17.217	17.816	18.420	19.027	19.638	20.252
400	20.869									

หมายเหตุ แสดงค่าของแรงดันที่มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของเตาเผาแบบ VTR-E



รูปที่ ๒-2 แผนผังวงจรชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค คุณสมบัติของธาตุที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ ค-1 แสดงคุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
แบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)
Y	88.905	1,502 \pm 7	3,397
Ba	137.34	725 \pm 5	1,637
Cu	63.546	1,083	2,538
O	15.9994	-218.8	-183
C	12.01115	3,527	3,727

ตารางที่ ค-2 แสดงน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
แบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

สารประกอบ	Y_2O_3	BaCO_3	CuO
น้ำหนักโมเลกุล	225.8082	197.34935	79.5454

ตารางที่ ค-3 ชื่อและสัญลักษณ์ของธาตุที่เกี่ยวข้อง

ชื่อภาษาไทย	ชื่อภาษาอังกฤษ	สัญลักษณ์	เลขอะตอม	มวลอะตอม
แบเรียม	Barium	Ba	56	137.34
บิสมัท	Bismuth	Bi	83	208.98
คาร์บอน	Carbon	C	6	12.011
คลอรีน	Chlorine	Cl	17	35.453
ทองแดง	Copper	Cu	29	63.546
ฮีเลียม	Helium	He	2	4.002
ไฮโดรเจน	Hydrogen	H	1	1.007
อินเดียม	Indium	In	49	114.82
ไอโอดีน	Iodine	I	53	126.904
แลนทานัม	Lanthanum	La	57	138.905
ปรอท	Mercury	Hg	80	200.59
ไนโตรเจน	Nitrogen	N	7	14.006
ออกซิเจน	Oxygen	O	8	15.999
โพแทสเซียม	Potassium	K	19	39.098
เงิน	Silver	Ag	47	107.868
อิตเทรียม	Yttrium	Y	39	88.905

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางธาตุ

1A		2A		3A										4A										5A										6A										7A										8A																																																				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mendelevium	Nobelium	Lanthanum	Actinium			

- (ก) เมทัลลิก โลหะด่าง
 (ข) โลหะกึ่งโลหะ
 (ค) โลหะหนัก
 (ง) โลหะหนักที่มีสมบัติเป็นโลหะของ
 โลหะหนัก-18 เป็นโลหะทรานซิชัน
 (จ) โลหะหนักที่มีสมบัติเป็นโลหะกึ่งโลหะ
 (ฉ) โลหะหนักที่มีสมบัติเป็นโลหะทรานซิชัน

KEY

Atomic Number: 6

Boiling Point: 4530

Melting Point: 2260

Density: 2.26

Atomic Weight: 12.01115

First Ionization Energy: 1 Carbon

Valency: 3

Electron Configuration: 1s² 2s² 2p²

Symbol: C

Acid Base Properties: (4)

Lanthanide series

Actinide series

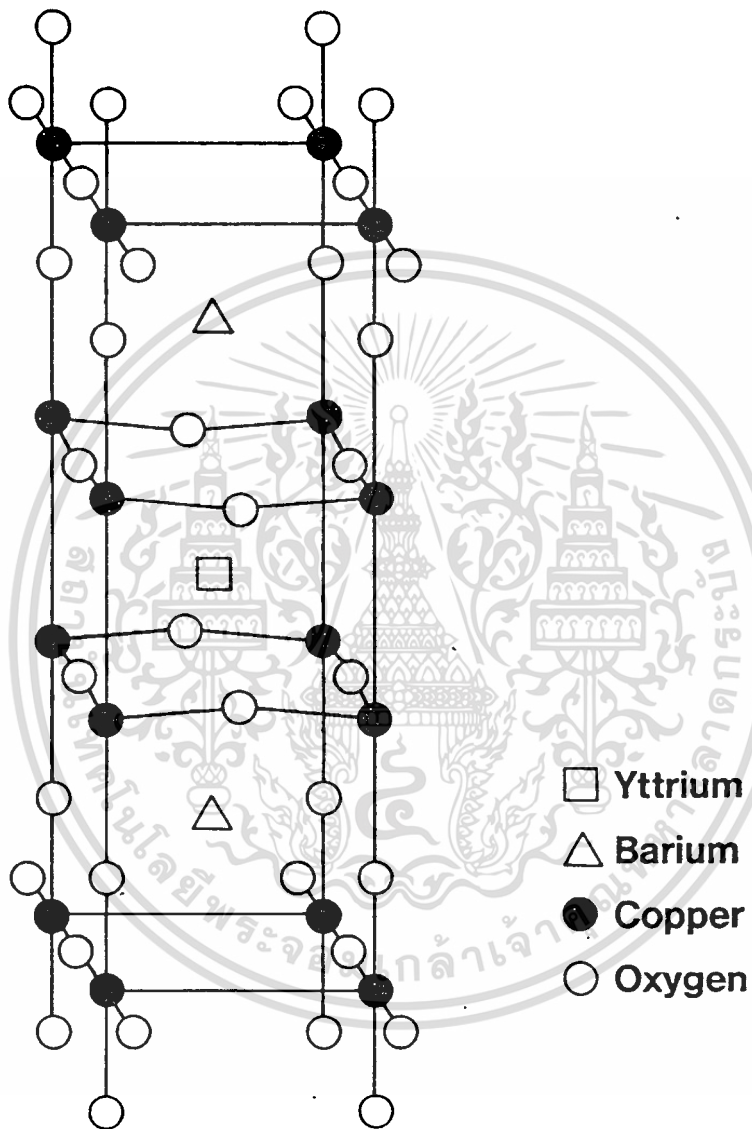
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป
 ไม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี
 นำไปใช้

ภาคผนวก ง ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตระกูลต่างๆ ที่มีการวิจัยอยู่ในปัจจุบัน

ตารางที่ ง-1 แสดงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในตระกูลต่างๆ พร้อมทั้งอุณหภูมิวิกฤต ที่มีการศึกษาในต่างประเทศ ซึ่งบางส่วนยังไม่ได้รับการทดลองซ้ำว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมินั้นจริงหรือไม่

<p>ตระกูล La ;</p> <p>La-Ba-Cu-O 30 K La-Sr-Cu-O 40 K La-Na-Cu-O 40 K La-Cu-O 91 K La-Sr-Ni-O 70 K</p>	<p>ตระกูล Tl (Tl-Ba-Ca-Cu-O)</p> <p>2212 105 K 2223 125 K Tl-Sr-Ca-Cu-O 75-100 K 1223 122 K (mid) Tl-Pb-Sr-Ca-Cu-O 122 K</p>
<p>ตระกูล Y (Y-Ba - Cu - O)</p> <p>123 94 K 248 94 K 247 57 K 336 96 K</p>	<p>1234 121 K 1245 113 K 1201 <17 K (mid)</p> <p>1212 91 K (mid) Tl-Pb-Sr-Ca-Cu-O 80-90 K Tl-Ba-(Y,Ca)-Cu-O 92 K (Tl,Ln)- Sr-Ca-Cu-O 80-90 K (Tl,La,Pb)-Sr-Ca-Cu-O 100 K</p>
<p>ตระกูล Ba - Pb - Bi - O</p> <p>Ba-(Pb, Bi)-O 13 K (Ba, K)-Bi-O 31 K</p>	<p>1256 102 K 1324 162 K</p> <p>(Bi,Tl)-Sr-Ca-Cu-O 90 K Pb2-Tl2-sr2-Cu3-O 42 K La2-Tl2-Sr2-Cu3-O 37 K Nd-Tl2-Sr2-Cu3-O 44 K</p>
<p>ตระกูล Bi (Bi- Sr- Ca- Cu- O)</p> <p>ส่วนผสมพื้นฐาน ส่วนผสมแตกหน่อ</p> <p>2212 80 K Bi-(Sr,Ln)-Cu-O 30 K (onset) 2223 110 K Bi-Pb-Sr-Ca-Cu- O 107 K Bi-(Sr,Ln)-Cu-O 42 K (Bi,Tl,Pb)-Ca-Sr-Cu-O 110 K Bi-Pb-Sb-Ca-Cu-O 132K Bi-Y-Ba-Cu-O 100 K</p> <p>2234 90 K 2245 ?</p>	<p>ตระกูล Pb</p> <p>Pb2-Sr2-A-Cu3-O 68 K</p> <p>ตระกูล Nd</p> <p>(Nd,Ce,Sr)-Cu-O 30 K (Nd,Ce)-Cu-O 24 K</p> <p>ตระกูลอื่น ๆ</p> <p>Ca-Sr2-(Cu,Bi) 3-0 75 K</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-1 แสดงให้เห็น โครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ในขณะ ไม่มีความต้านทานที่อุณหภูมิ 92 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายศุภชัยวัฒน์ จอมแสง เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ.2508 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2530 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2532 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับนอกเหนือจากวิทยานิพนธ์ จำนวน 6 เรื่อง ได้แก่ 1. การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่พระจอมเกล้าลาดกระบัง 2. การประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แบบ Y-Ba-Cu-O เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3. แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก 4. เทคนิคการหาปริมาณออกซิเจน ในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง โดยวิธีไอโอโดเมตริก ไตเตรชัน 5. ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Y-Ba-Cu-O 6. เครื่องมือวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัย ระดับ4 สังกัดศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร