



การผลิตสารตัวนำยวดยิ่งชนิด $YBa_2Cu_3O_7$

รพ.
นางสาวนนทลี สุทธิรักษา

เลขหมู่ 2537
เลขทะเบียน
วันเดือนปี

612554856

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2537

Fabrication of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Superconductor

Mr. Chanyut Kanjanawong
Miss. Nontalee Sutdhiraksa

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1994

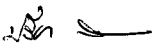
หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_7$
โดย นายชาญยุทธ กาญจนวงษ์
 นางสาวนทลี สุทธิรักษา
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล
 ผศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย
 อ. สุ่น จ่างประยูร

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

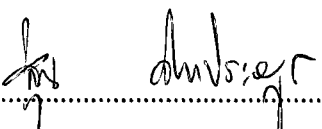

.....
(ผศ. ดร. ปรีชา เทียนสมประสงค์)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ


.....
(ผศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย)

ประธานกรรมการ


.....
(อ. สุ่น จ่างประยูร)

กรรมการ

.....
(รศ. สุรพล รักวิชัย)

กรรมการ


.....
(ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษ	การผลิตสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_7$
นักศึกษา	นายชาญยุทธ กาญจนวงษ์ นางสาวนนทลี สุทธิรักษา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล ผศ. ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย อ. สุ่น อ่างประยูร
ระดับการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2537

บทคัดย่อ

สารประกอบ $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ เป็นสารตัวนำยิ่งยวดที่เป็นเซรามิกส์ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาของ Y_2O_3 , $BaCO_3$, และ CuO โดยนำสารประกอบดังกล่าวมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ $940\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จะได้ผงสารตัวอย่างสีเทา แล้วนำสารตัวอย่างที่ได้มาทำการอัดเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และมีความหนา 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมคือ นำสารตัวอย่างที่ได้จากการเผาครั้งแรกไปเผาที่อุณหภูมิ $940\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน จะได้สารตัวอย่างที่มีคุณสมบัตินำยิ่งยวด

จากการทดสอบคุณสมบัตินำยิ่งยวดของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ สามารถทดสอบได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ไมส์เนอร์และการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยจากการทดสอบพบว่าเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์และสามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้มีค่าประมาณ 23 โอห์ม

Special Project Title Fabrication of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Superconductor
Name Mr. Chanyut Kanjanawong
Miss. Nontalee Sutdhiraksa
Special Project Adviser Assit. Prof. Sirisak Techatawekul
Assit. Prof. Dr. Aree Vichienchay
Ajarn. Sun Jangprayun
Department Applied Physics
Academic Year 1994

ABSTRACT

Superconducting ceramics with a composition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ were prepared by a solid-state reaction method. Namely, Y_2O_3 , BaCO_3 , and CuO for stoichiometric composition were ground and calcined at 940°C for about 14 hours. The obtained grey powder was pressed into a pellet of 12 mm. diameter and 5 mm. thickness, then fired at 940°C for overnight in oxygen atmosphere.

The Meissner effect and measurement of electrical resistivity have been used to test the properties of superconductivity. It has been found that the own-made superconductor showed the Meissner effect and its resistant was about 23Ω .

กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง การผลิตสารตัวนำยิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_7$ ขึ้นนี้ สำเร็จลงได้เนื่องจาก
บุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาคือ

ผศ. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล

ผศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

อ. สุ่น จ่างประยูร

ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนเอื้อเพื่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำโครงการ

ขอขอบคุณ อาจารย์รัชชชัย ขาวประเสริฐ ที่ให้คำแนะนำ และเอื้อเพื่อสถานที่ (ศูนย์ซ่อม
สร้างเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์) ในการทำโครงการ

ขอขอบคุณ อาจารย์อนุพงษ์ สรงประภา ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือช่างสูงญูญาจากระบบดิจิทัล
และอุปกรณ์ในการทำความสะอาดท่อควอทซ์

ขอขอบคุณ รศ. สุรพล รักวิจัย ที่ให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ อาจารย์ประเสริฐ เขียวพิมพา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษา และเอื้อเพื่อเครื่องมือในการศึกษาเรื่องการเลี้ยวเบนของ
รังสีเอ็กซ์

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการทำ
โครงการ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และ พี่ ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ให้ความช่วยเหลือใน
การทำโครงการมาตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาของโครงการ	1
จุดประสงค์	1
ขั้นตอนการทำงาน	2
ประโยชน์ที่ได้จากโครงการ	3
ระยะเวลาในการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและคุณสมบัติของสารตัวนำยวดยิ่ง	5
2.1 ประวัติความเป็นมา	5
2.2 โครงสร้างผลึก	9
2.3 เพอร์รอฟสไกต์	18
2.3.1 รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์	18
2.3.2 รูปทรงเตตระโกนอล	19
2.3.3 รูปทรงออโรรมบิค	20
2.4 ยิทเทรียม-แบเรียม-คอปเปอร์-ออกไซด์	22
2.4.1 รูปทรงเตตระโกนอล	22
2.4.2 รูปทรงออโรรมบิค	24
2.4.3 การตั้งชื่อตำแหน่งของออกซิเจน	24
2.4.4 การเกิดโครงสร้าง YBaCuO	25
2.4.5 ชั้นของ YBaCuO	26
2.5 อุณหภูมิกวักฤติ	27
2.6 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	29
2.7 ทฤษฎี BCS	32

2.8	สารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2	35
2.9	การประยุกต์ใช้สารตัวนำยวดยิ่ง	37
2.10	การตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	39
2.10.1	ทฤษฎีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	39
2.10.2	การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผงในเครื่องคิฟแฟรกโตมิเตอร์	44
2.10.3	การหาค่าคงที่แลตทิซจากข้อมูลรูปกราฟที่ได้จากเครื่องคิฟแฟรกโตมิเตอร์	47
2.10.4	การตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์	48
บทที่ 3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$	50
3.1	อุปกรณ์ในการเตรียมสารตัวอย่าง	51
3.1.1	ครกบดสาร	51
3.1.2	เครื่องอัดเม็ดสาร	52
3.1.3	เครื่องอัดไฮดรอลิกส์	55
3.1.4	วัสดุรองรับสารเมื่อทำการเผา	56
3.1.5	ชั้นตัดสาร	57
3.1.6	เครื่องชั่งสาร	58
3.1.7	เครื่องแกว่งสาร	60
3.2	อุปกรณ์ในการเผาสาร	61
3.2.1	เตาไฟฟ้าที่ใช้ในการเผาสาร	61
3.2.2	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	67
3.2.3	โซลิตสเททรีเลย์	69
3.2.4	เทอร์โมคัปเปิล	72
3.2.5	ท่อแก้วควอทซ์	74
3.2.6	ก๊าซออกซิเจน	76
3.2.7	เครื่องควบคุมอัตราการไหล	77
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	78
3.3.1	ไนโตรเจนเหลวและถังบรรจุไนโตรเจนเหลว	78
3.3.2	แม่เหล็ก	79

บทที่ 4 การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$	80
4.1 การคำนวณหาอัตราส่วนสารที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$	80
4.1.1 คำนวมน้ำหนักของสารที่จะชั่งในอัตราส่วนจากวิธีการเตรียมสารใน Advanced electronic materials and technology group	80
4.1.2 การตรวจสอบปริมาณสารที่เตรียมได้กับปริมาณสาร จากการคำนวณจากสมการ	81
4.1.3 การชั่งสาร	82
4.2 การผสมสาร	82
4.3 การอัดเม็ดสาร	83
4.4 การเผาสาร	84
4.4.1 การเผาในรีแอกติงไซเคิล	84
4.4.2 การเผาในซินเตอร์ริงไซเคิล	88
บทที่ 5 การทดสอบและสรุปผล	95
5.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	95
5.2 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้า	99
5.3 สรุปผล	100
หนังสืออ้างอิง	102

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งอะตอมของ BaTiO ₃ ในโครงสร้างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์, เตตระโกนอล และออโรธอมบิค	21
ตารางที่ 4.1 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิในรีแอกติงไซเคิล	85
ตารางที่ 4.2 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิในรีแอกติงไซเคิล	86
ตารางที่ 4.3 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิในซินเตอร์ริงไซเคิล	88
ตารางที่ 4.4 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิในซินเตอร์ริงไซเคิล	89
ตารางที่ 4.5 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิในซินเตอร์ริงไซเคิล	89

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติ และปีการค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งออกไซด์	8
รูปที่ 2.2 (ก) แสดงโครงสร้างของ $(La, Ba)_2CuO_4$	10
รูปที่ 2.2 (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้าง La_2CuO_4	10
รูปที่ 2.3 (ก), (ข) และ (ค) แสดงปริมาณของชั้นคอปเปอร์-ออกไซด์ สอดคล้องกับปริมาณ δ ในสูตร $YBa_2Cu_3O_7$	11
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในหน่วยเซลล์ของ $YBa_2Cu_3O_7$ และค่า δ	12
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิวิกฤติ ของ $YBa_2Cu_3O_{7,\delta}$ และค่า δ	12
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของ $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	14
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลของ สารตัวนำยวดยิ่ง แทลเลียม-คอปเปอร์-ออกไซด์	15
รูปที่ 2.8 แสดงตระกูลโครงสร้าง $Bi-Ca-Sr-Cu-O$ และ $Tl-Ca-Ba-Cu-O$	16
รูปที่ 2.9 แสดงหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แบบเปอร์รอฟสไกท์	18
รูปที่ 2.10 แสดงหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างเตตระโกนอลแบบเปอร์รอฟสไกท์	19
รูปที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของอะตอม เมื่อยูนิตเซลล์ของเตตระโกนอลที่เป็นโมเลกุลเดี่ยว ถูกขยายออกเป็นยูนิตเซลล์ของออร์โธโรมบิกที่เป็นโมเลกุลคู่ ด้วยมุม 45° จากมุมเดิม	20
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของยิทเทเรียม-แบเรียม-คอปเปอร์-ออกไซด์	23
รูปที่ 2.13 การเกิดยูนิตเซลล์ยิทเทเรียม-แบเรียม-คอปเปอร์-ออกไซด์	25
รูปที่ 2.14 แสดงชั้นของ $YBaCuO$ ที่มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก	26
รูปที่ 2.15 แสดงค่าสภาพต้านทานกับอุณหภูมิ	27
รูปที่ 2.16 แสดงการจำลองการเปลี่ยนแปลงของสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_{7,\delta}$	28
รูปที่ 2.17 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ในของแข็ง	30
รูปที่ 2.18 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ในวงแหวน เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กก่อนลดอุณหภูมิ	30

รูปที่ 2.19	แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ในวงแหวน เมื่อทำการลดอุณหภูมิก่อนป้อนสนามแม่เหล็ก	31
รูปที่ 2.20	แสดงตาข่ายของประจุบวกที่เกิดขึ้นรอบ ๆ อิเล็กตรอน	32
รูปที่ 2.21	โมเดลแสดงสถานะซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอน	33
รูปที่ 2.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน Δ และอุณหภูมิ จากทฤษฎี BCS	34
รูปที่ 2.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ในสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และ 2	35
รูปที่ 2.24	สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า	39
รูปที่ 2.25	แสดงเงื่อนไขของลาวาอีโน 1 มิติ	40
รูปที่ 2.26	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์	41
รูปที่ 2.27	แสดงจุดส่วนกลับที่ใช้แทนระนาบ hkl ใด ๆ	42
รูปที่ 2.28	แสดงหลักการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์	44
รูปที่ 2.29	แสดงการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์	45
รูปที่ 2.30	แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์	46
รูปที่ 2.31	แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์	46
รูปที่ 2.32	แสดงที่บรรจุสารตัวอย่างในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์	47
รูปที่ 2.33	แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$	49
รูปที่ 3.1	แสดงลักษณะของครกที่ใช้ในการบดสาร	51
รูปที่ 3.2	แสดงลักษณะของเครื่องอัดเม็ดสาร	52
รูปที่ 3.3	แสดงขนาดของส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอัดเม็ดสาร	54
รูปที่ 3.4	แสดงลักษณะของเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่ใช้ในการอัดเม็ดสาร	55
รูปที่ 3.5	แสดงลักษณะของวัสดุรองสารที่ใช้ในการเผาสาร	56
รูปที่ 3.6	แสดงลักษณะของช้อนตักสาร	57
รูปที่ 3.7	แสดงลักษณะของเครื่องชั่งสารระบบดิจิทัล	58
รูปที่ 3.8	แสดงลักษณะของเครื่องแกว่งสาร	60
รูปที่ 3.9	แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมสาร	61
รูปที่ 3.10	แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของเตาไฟฟ้า	62

รูปที่ 3.11	แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา	63
รูปที่ 3.12	แสดงลักษณะการพันขดลวด	64
รูปที่ 3.13	แสดงการต่อวงจรควบคุมอุณหภูมิของเขา	66
รูปที่ 3.14	แสดงส่วนประกอบของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ FENWAL รุ่น AR 24L	67
รูปที่ 3.15	แสดงลักษณะของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	68
รูปที่ 3.16	แสดงโครงสร้างของรีเลย์แบบกลไก	69
รูปที่ 3.17	แสดงแผนผังภายในของโซลิดสเตทรีเลย์	69
รูปที่ 3.18	ภาพแสดงหลักการของเทอร์โมคัปเปิล	72
รูปที่ 3.19	แสดงลักษณะของเทอร์โมคัปเปิล Type K	73
รูปที่ 3.20	แสดงลักษณะของท่อแก้วควอทซ์	74
รูปที่ 3.21	แสดงลักษณะของถังใส่ก๊าซออกซิเจนเหลว	76
รูปที่ 3.22	แสดงลักษณะของเครื่องควบคุมอัตราการไหล	77
รูปที่ 3.23	แสดงลักษณะของถังบรรจุไนโตรเจนเหลว	78
รูปที่ 3.24	แสดงลักษณะของแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	79
รูปที่ 4.1	แสดงการอัดเม็ดสาร	83
รูปที่ 4.2	แสดงการเพิ่มและลดอุณหภูมิในรีแอกติงไซเคิล	87
รูปที่ 4.3	แสดงการเพิ่มและลดอุณหภูมิในซินเตอร์ริงไซเคิล	90
รูปที่ 4.4	แสดงสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_{7.8}$	91
รูปที่ 4.5	แสดงการชั่งสาร	91
รูปที่ 4.6	แสดงการแกว่งสาร	92
รูปที่ 4.7	แสดงการบดสารด้วยครกบดสาร	92
รูปที่ 4.8	แสดงการอัดเม็ดสาร	93
รูปที่ 4.9	แสดงการวางสารบนโบท	93
รูปที่ 4.10	แสดงการเผาสารในรีแอกติงไซเคิล	94
รูปที่ 4.11	แสดงการเผาสารในซินเตอร์ริงไซเคิล	94
รูปที่ 5.1	แสดงการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยแช่สารตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว	98
รูปที่ 5.2	แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อวางสารตัวอย่างลงบนแม่เหล็ก	98

บทที่ 1

บทนำ

สารตัวนำยิ่งยวดยิ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าวยิ่ง คือมีความต้านทานเป็นศูนย์ในช่วงอุณหภูมิทรานสิชันซึ่งเป็นประโยชน์มากทั้งทางด้านวิชาการและทางด้านการประยุกต์นำไปใช้งาน แต่คุณสมบัติความเป็นสารตัวนำยิ่งยวดที่พบในปัจจุบันเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ($T < 125 \text{ K}$) ซึ่งการที่จะนำคุณสมบัตินี้มาใช้ประโยชน์ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของสารตัวนำยิ่งยวด จึงมีการศึกษาค้นคว้า เพื่อทำความเข้าใจถึงที่มาของสมบัติที่เป็นประโยชน์และปรับปรุง ให้ได้สารตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำสารเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม

ที่มาของโครงการ

สารตัวนำยิ่งยวดมีโครงสร้างแบบเพอร์รอสไกท์(perovskite)มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าวยิ่ง คือ มีความต้านทานเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในช่วงอุณหภูมิทรานสิชัน(Transition Temperature) ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิทยาศาสตร์หลายคนกำลังพยายามศึกษา เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของสารตัวนำยิ่งยวดให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าวยิ่งได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งต้องอาศัยปัจจัยหลายอย่าง โครงการพิเศษนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ เพื่อศึกษาโครงสร้างของสารตัวนำยิ่งยวดเฟส 123 รวมถึงการศึกษาทฤษฎีที่สนับสนุน และทำให้เกิดคุณสมบัติการนำยิ่งยวด สำหรับการนำโครงการพิเศษนี้ จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่นำคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารตัวนำยิ่งยวดมาศึกษา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่าง ๆ

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
2. เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวนำยิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

ขั้นตอนการทำงาน

1. ทำการศึกษาทฤษฎีของสารตัวนำยิ่งยวด
 - ทฤษฎีทั่วไปของสารตัวนำยิ่งยวด
 - ทฤษฎีของสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
 - ศึกษาคุณสมบัติของสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
2. ทำการศึกษาวิธีการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
 - การเตรียมสารตั้งต้นของสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
 - การขึ้นรูปสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ เพื่อใช้ในการเผาสาร
 - ขั้นตอนการเผาสารเพื่อให้ได้สารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
3. ทำการศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
 - ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของเตา
4. ปรับปรุงเตาเผาสารตัวนำยิ่งยวด
 - ออกแบบส่วนควบคุมอุณหภูมิของเตา
 - ประกอบส่วนควบคุมอุณหภูมิ, ส่วนจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าเตาเผาสาร
 - เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาสาร เช่น ท่อควอทซ์, ถังออกซิเจน
5. เตรียมสารตัวนำยิ่งยวดจากเฟส Y ตามวิธีการ
6. ทดสอบความเป็นสารตัวนำยิ่งยวดโดยอาศัยปรากฏการณ์ไมส์เนอร์
(Meissner Effect)
7. ทดสอบความเป็นสารตัวนำยิ่งยวดโดยอาศัยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

ประโยชน์ที่ได้จากโครงการ

1. ทำให้เข้าใจวิธีการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_7$
2. ทำให้เข้าใจวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวนำยิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_7$ โดยอาศัยปรากฏการณ์ไมสเนอร์

จากคุณสมบัติของสารตัวนำยิ่งยวด ทำให้เกิดแนวทางที่จะเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดที่เหมาะสมกับงาน และมีการพัฒนาสารตัวนำยิ่งยวดให้ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและคุณสมบัติของสารตัวนำยวดยิ่ง

2.1 ประวัติความเป็นมา

นักวิทยาศาสตร์ของโลกตื่นตัวกับการค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งที่คงสภาพอยู่ได้ ณ อุณหภูมิสูงหรือที่เรียกกันว่า สารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง(High-Temperature Superconductors) ซึ่งการค้นพบนี้ นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงครั้งยิ่งใหญ่ของความก้าวหน้าของมนุษยชาติ

อุณหภูมิต่ำของสสารธรรมดาหรือศูนย์เคลวิน (0 K) หรือเท่ากับ -273.015 องศาเซลเซียส ถือว่าไม่มีอุณหภูมิต่ำกว่านี้อีกแล้ว มนุษย์พยายามที่จะไปให้ถึงอุณหภูมิต่ำสุดนี้ โดยมีลำดับเหตุการณ์ตาม ค.ศ. ต่อไปนี้

1868 - ค้นพบฮีเลียมในดวงอาทิตย์

1895 - ค้นพบก๊าซฮีเลียมในบรรยากาศของโลก

1908 - Heike Kamerlin Onnes นักฟิสิกส์ชาวฮอลแลนด์ทำฮีเลียมเหลวสำเร็จโดยทำให้เย็นลงถึง 4.2 K (-268.9°C)

1911 - Onnes พบว่า ถ้าลดอุณหภูมิของปรอทลงต่ำกว่า 4.2 K (ซึ่งบังเอิญเป็นจุดหลอมเหลวของฮีเลียม) จะไม่สามารถวัดความต้านทานของปรอทได้ และนี่คือการค้นพบปรากฏการณ์ความเป็นตัวนำยวดยิ่ง(Superconductivity) เป็นครั้งแรก เรียกอุณหภูมิ 4.2 K ว่า อุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature หรือ T_c) ของปรอท

1918 - Onnes ได้รับรางวัลสาขาฟิสิกส์ในฐานะที่ก่อกำเนิดฟิสิกส์อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Physics)

1933 - W. Meissner และ R. Ochsenfeld พบว่า ถ้านำสารตัวนำยวดยิ่งวางไว้ในสนามแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกผลักออกไปจนหมดสิ้นและไม่สามารถทะลุผ่านชิ้นสารตัวนำยวดยิ่งไปได้ กล่าวคือ สารตัวนำยวดยิ่งมีคุณสมบัติความเป็นสารแม่เหล็กไดอะ (Diamagnet) ที่สมบูรณ์

1986 - กลุ่มของ Muller สนับสนุนผลการทดลองของตัวเองด้วยการหา dc susceptibility ของสารประกอบ Ba-La-Cu-O เพื่อค้นหาสภาพแม่เหล็กของสสารขณะที่เป็นสารตัวนำยิ่งยวด

- กลุ่มของ S. Tanaka ที่ญี่ปุ่น สนับสนุนด้วยการวัดความต้านทานและ low-field susceptibility

- ได้มีการจัดแบ่งประเภทของการนำยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูง

(Superconductivity highest T_c) เป็นหมวดหมู่ใหญ่ ๆ 3 หมวดหมู่ใหญ่ ๆ คือ

ประเภท	$T_{c,max}$
Metals	23 K
Oxides	125 K
Organic conductor	28 K

1987 - กลุ่มของ Paul C.W. Chu ที่มหาวิทยาลัย Houston ในสหรัฐอเมริกาได้เพิ่มความดันลงบนสารตัวนำยิ่งยวดดังกล่าว 10,000 ถึง 12,000 เท่าของบรรยากาศ พบว่าอุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นจาก 35 K เป็น 52.5 K แสดงว่ามีความเป็นตัวนำยิ่งยวดได้เร็วขึ้น

- Chu เปลี่ยนอะตอมของแบเรียมด้วยอะตอมของสตรอนเทียม (Sr) ซึ่งมีขนาดรัศมีของอะตอมเล็กกว่า ปรากฏว่าได้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มเป็น 54 K

- Maw-Kuen Wu ลูกศิษย์ของ Chu ที่มหาวิทยาลัยอลาบามา สหรัฐอเมริกา ได้ลองแทนที่ธาตุแลนทานัมเป็นธาตุ rare-earth คือ ยิทเทเรียม (Y) พบว่าอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นถึง 92 K ต่อมา Wu และ Chu ทำการทดลองวัดอุณหภูมิวิกฤตของสาร Y-Ba-Cu-O ได้สูงถึง 98 K

เนื่องจากตัวเลขอุณหภูมิวิกฤต 98 K สูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจน (77 K) จึงเป็นการง่ายที่จะทำให้สารตัวนำยิ่งยวดมีอุณหภูมิต่ำกว่า 98 K ซึ่งเพียงแต่จุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเท่านั้น และไนโตรเจนเหลวผลิตได้ง่ายและราคาถูกกว่าฮีเลียมเหลว

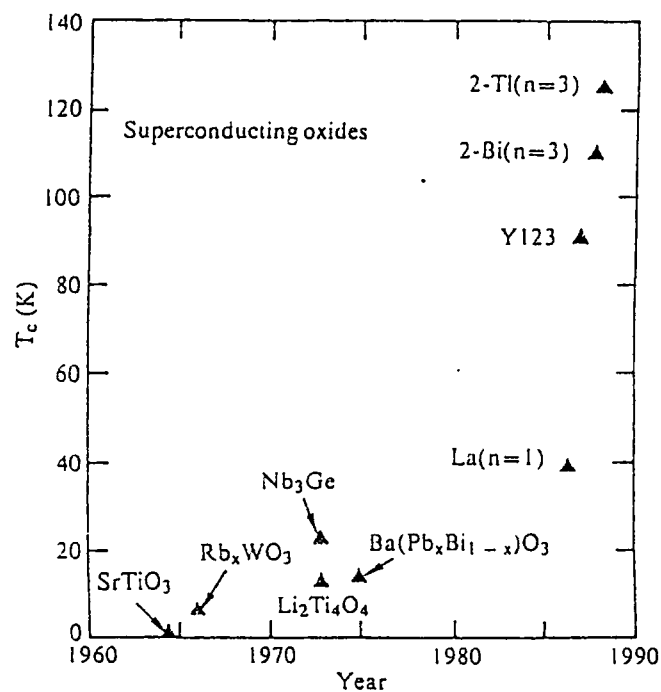
1988 - การค้นพบสารประกอบตัวใหม่ และค้นพบวิธีการเตรียมที่ดีขึ้น มีการค้นพบ Bismuth strontium cuprates และสารประกอบเทลเลียม (Ta) มีการพัฒนาและศึกษาเกี่ยวกับเอพิแทกเซียลฟิล์ม (epitaxial film) ทำให้สามารถหาโครงสร้างของผลึกเดี่ยวได้ดียิ่งขึ้น

- มีการค้นพบ $Bi_2Sr_2CaCuO_{10}$ มีอุณหภูมิวิกฤตที่ 110 K โดย H. Meada (Tsukuba)

- มีการค้นพบ $Tl_2Ba_2CaCu_3O_{10}$ มีอุณหภูมิวิกฤตที่ 125 K โดย A.M. Hermann (Arkansas)

1989 - มีการศึกษาระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีปฏิกิริยาต่อสนามแม่เหล็ก
 - มีการค้นพบสารตัวนำยิ่งยวดชนิดเอ็น (n-type superconductor) ของ cuprates
 โดย ศาสตราจารย์ Tokura

1991 - จากการใช้เครื่องสแกนนิ่งทันเนลลิงไมโครสโคปี (Scanning tunneling microscopy) ทำให้พบความผิดปกติจำนวนมากของสกรูตีสโลเคชัน (screw dislocations) ในอันดับของ $10^9/\text{cm}^3$ ในชั้นเอพิแทกเซียลฟิล์ม ซึ่งมากกว่าใช้ SrTiO_3 เป็นแผ่นรองรับซึ่งทำให้ฟิล์ม (film) ทึบแสง และทำให้เข้าใจเหตุผลว่า ทำไมจึงเกิดกระแสวิกฤติ (critical current) จำนวนมากในชั้นเอพิแทกเซียล (epitaxial layer) เนื่องจากสกรูตีสโลเคชันมีฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กไหลวนอยู่



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติและปีการค้นพบสารตัวนำยิ่งยวดออกไซด์

2.2 โครงสร้างผลึก

ในปี 1986 Bednorz และ Muller ค้นพบสารประกอบกลุ่ม La-Ba-Cu-O ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ≈ 30 K

1. La_2CuO_4 หรือ $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$	30 K
2. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	90 K
3. Bi-Sr-Ca-Cu-O	110 K
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125 K

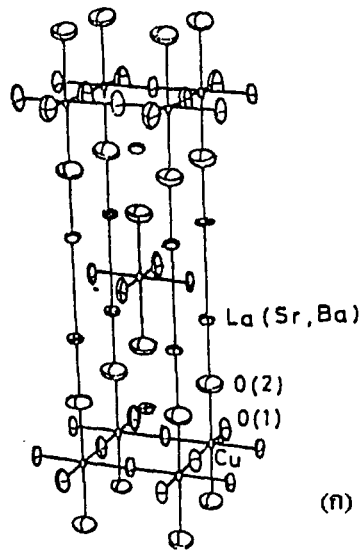
โครงสร้างของสารประกอบทั้ง 3 กลุ่มมีโครงสร้างคล้ายกับเปอร์รอฟสไกต์ ดังรูป 2.2, 2.3, 2.6 และ 2.7

La_2CuO_4 หรือ $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$

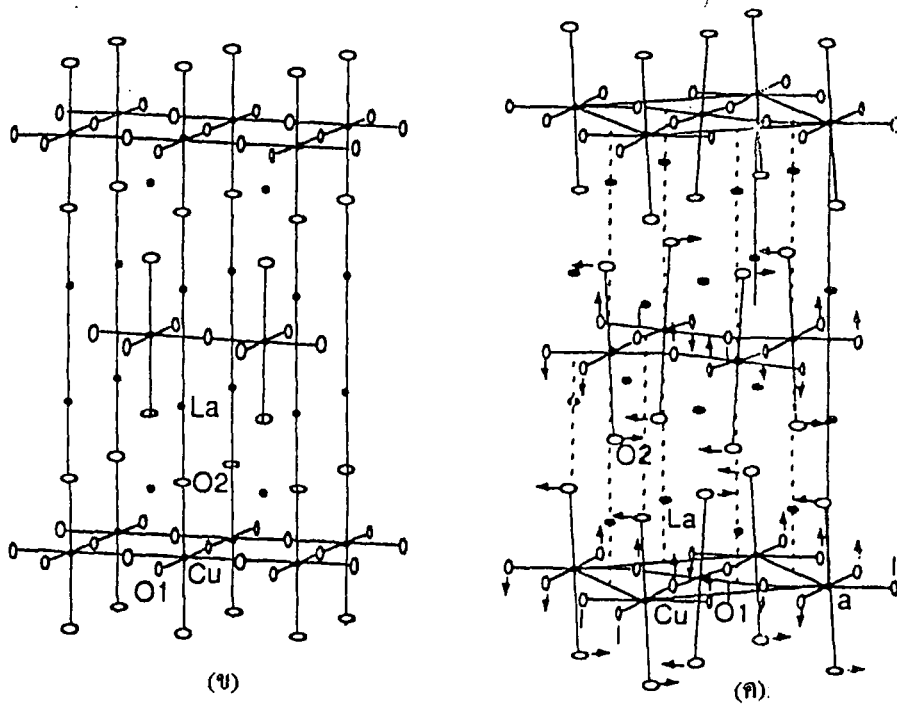
สารประกอบกลุ่มนี้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal), $I4/mmm$ ที่อุณหภูมิห้อง โดยคอปเปอร์ถูกล้อมรอบโดยออกซิเจน 6 ตัว ตำแหน่งของอะตอมทุกอะตอมอยู่ที่สเปเชียลโพสิชัน (Special position) ยกเว้นแลนทานัมและออกซิเจน ดังรูป 2.2(ก) โครงสร้างนี้คล้ายเปอร์รอฟสไกต์ นอกจากนี้ Cu-O2 ยาวกว่า Cu-O1 มาก ทำให้เกิดโครงสร้างแบบระนาบคอปเปอร์ออกไซด์

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง จะพบว่าโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) และบางครั้งก็พบว่า โครงสร้างออร์โธโรมบิกเกิดจาก CuO_6 -Octahedral เอียงไปจากโครงสร้างเดิมที่เป็นเตตระโกนอล ดังรูป 2.2(ข) และ 2.2(ค) ทั้งนี้เพราะโครงสร้างออร์โธโรมบิกแตกต่างจากเตตระโกนอล เพียงแต่ $a \neq b$ เท่านั้น จึงอาจถือได้ว่า โครงสร้างออร์โธโรมบิกที่เกิดขึ้นนี้คือเตตระโกนอลที่เพี้ยนไป (Distorted Tetragonal) ก็ได้ ทั้งนี้เพราะมุมที่เอียงของ Cu-O_6 -Octahedral มีค่าประมาณ $1^\circ - 4^\circ$ เท่านั้น และมุม Cu-O1-Cu มีค่าประมาณ $171^\circ - 177^\circ$ การเอียงของ Cu-O_6 -Octahedral นี้ ทำให้ระนาบคอปเปอร์ออกไซด์บิดไปจากระนาบเดิม และพบว่าโครงสร้างออร์โธโรมบิกหรือเตตระโกนอลที่เพี้ยนไปนี้สามารถแสดงสมบัติความเป็นตัวนำยิ่งยวดได้

การค้นพบนี้ไปสู่ข้อมูลที่สำคัญคือ ความเป็นตัวนำยิ่งยวดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระนาบคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งมีมุมที่บิดไปจากระนาบเดิม และคาดว่าเป็นการเพิ่มโอกาสของการเคลื่อนย้ายประจุ (Charge transfer) ทั้งภายในและระหว่างระนาบคอปเปอร์ออกไซด์นั่นเอง ระนาบคอปเปอร์ออกไซด์ก็ถูกพบเช่นเดียวกันในกลุ่ม $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ดังรูป 2.3



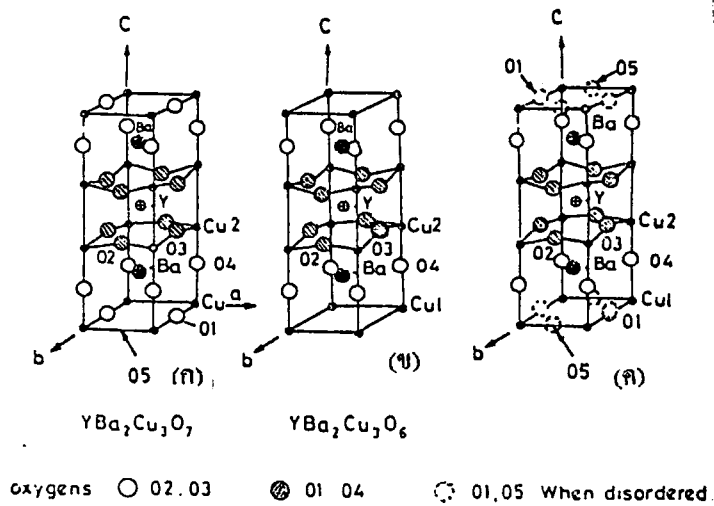
รูปที่ 2.2 (ก) แสดงโครงสร้างของ $(La, Ba)_2CuO_4$



รูปที่ 2.2 (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของ La_2CuO_4 ซึ่งเป็น
เตตระโกนอล (ทางซ้าย) และออโรโธรมบิค (ทางขวา)

YBa₂Cu₃O_{7-δ}

กลุ่มนี้เป็นสารตัวนำยิ่งยวดที่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนคือ 90 K และมีโครงสร้างคล้ายเพอร์รอฟสไกต์ ดังรูป 2.3 และที่น่าสนใจคือ โครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซึ่งอาจเขียนได้ว่า BaO/CuO₂/Y/CuO₂/BaO ชั้นด้วยชั้นคอปเปอร์-ออกซิเจน (Cu-O layer) ซึ่งอยู่บนระนาบ ab ปริมาณของชั้นคอปเปอร์-ออกซิเจนสอดคล้องกับปริมาณ δ ในสูตร YBa₂Cu₃O_{7-δ} ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 2.3(ก), (ข) และ (ค)



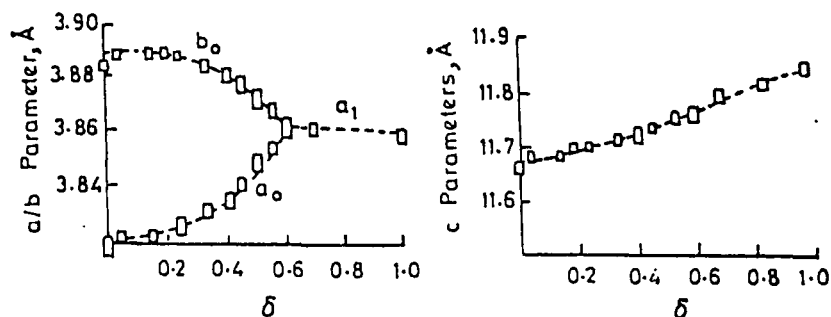
รูปที่ 2.3(ก) , δ = 0 จะมี O ในแกน b เกิดเป็นพันธะคอปเปอร์-ออกซิเจนขนานกับ b

รูปที่ 2.3(ข) , δ = 1 ไม่มี O ในแกน b เลย

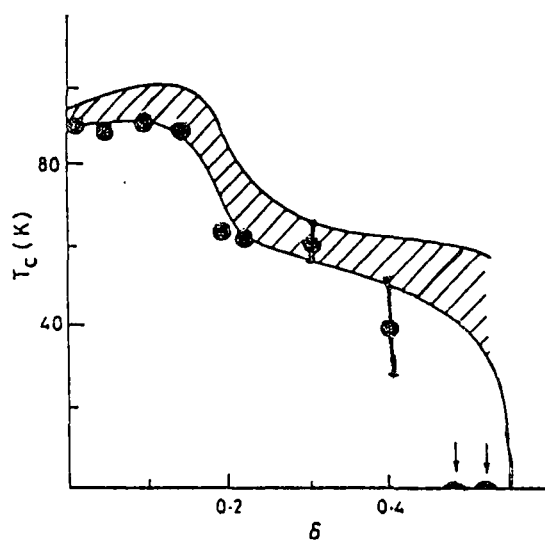
รูปที่ 2.3(ค) , 0 < δ < 1 แสดงตำแหน่งของ O ที่อาจปรากฏได้ด้วยวงกลมเส้นประ

ในกรณีที่ δ = 1 (YBa₂Cu₃O₆) โครงสร้างจะมี a = b ซึ่งหมายความว่า เป็นเตตระโกนอลและไม่แสดงสมบัติความเป็นตัวนำยิ่งยวด

ในกรณีที่ δ = 0 (YBa₂Cu₃O₇) โครงสร้างมีพันธะคอปเปอร์-ออกซิเจน (Cu-O chain) ในทิศ b ทำให้ a ≠ b ซึ่งหมายความว่า โครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิก และแสดงสมบัตินำยิ่งยวด ดังนั้นการมีพันธะคอปเปอร์-ออกซิเจน จึงคาดว่าเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่ทำให้เกิดความเป็นตัวนำยิ่งยวด และการมีพันธะคอปเปอร์-ออกซิเจนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง (Oxygen stoichiometry) รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของโครงสร้างและค่า δ และรูปที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำยิ่งยวดด้วยค่าอุณหภูมิวิกฤต เมื่อมีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป นี่ก็คือ ความสำคัญของปริมาณออกซิเจนในการเตรียมให้ได้สารตัวนำยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตตามต้องการ



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในหน่วยเซลล์ของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, และค่า δ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.6 เมื่อมีการเปลี่ยนโครงสร้างจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอล

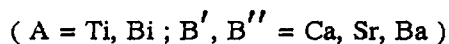
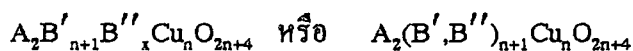


รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิวิกฤตของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ และค่า δ ค่า Magnetic Susceptibility แสดง โดยเส้นแรมเงา, ค่า Resistivity แสดง โดยเส้นวงกลมทึบ

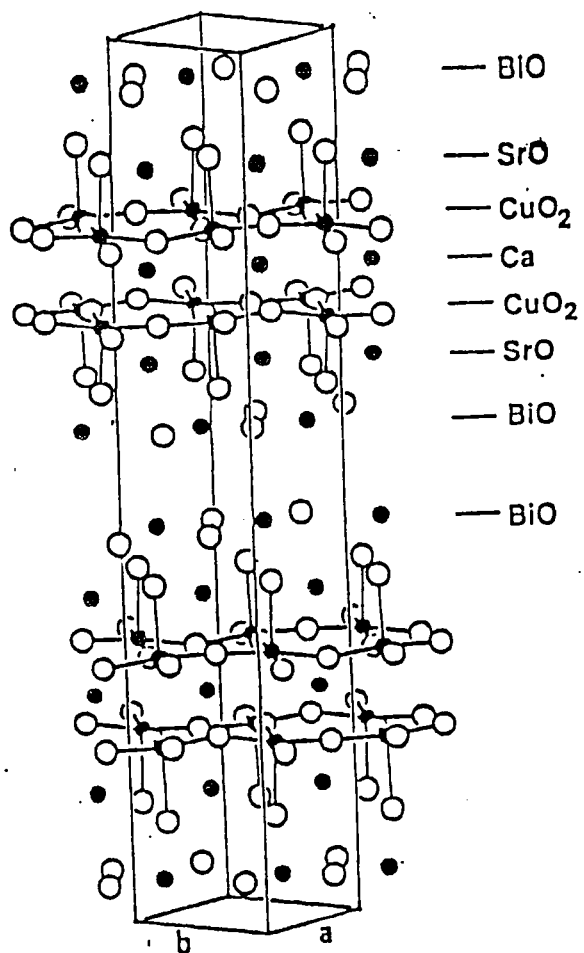
Bi-Ca-Sr-Cu-O และ Tl-Ca-Ba-Cu-O

เมื่อมีการค้นพบ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_2\text{O}_7\delta$ (อุณหภูมิวิกฤต $\approx 20 \text{ K}$) โดย Michel et al ในปี 1987 ได้นำมาสู่สารประกอบในระบบเดียวกันโดยการแทนสตรอนเชียมด้วยแคลเซียม และพบว่าระบบใหม่ Bi-Ca-Sr-Cu-O มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นถึง $\approx 110 \text{ K}$ ซึ่งเป็นผลงานของ Maeda ในปี 1988 และได้ปรับปรุงโดยนักวิจัยหลายกลุ่ม เช่น กลุ่มของ Chu, Hazen, Rao และ Tarascon ในปีเดียวกัน และขณะเดียวกันงานวิจัยที่ทำพร้อม ๆ กัน ในปีเดียวกันนี้ (1988) โดย Hazen, Ganguli และ Sheng & Hermann ก็ได้ค้นพบ Tl-Ca-Ba-Cu-O ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง $\approx 125 \text{ K}$ และในทั้ง 2 ระบบนี้ พบว่ามีสูตรและโครงสร้างคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูป 2.6 และ 2.7 จึงนำมากล่าวในกลุ่มเดียวกัน และสรุปความคล้ายกันดังนี้

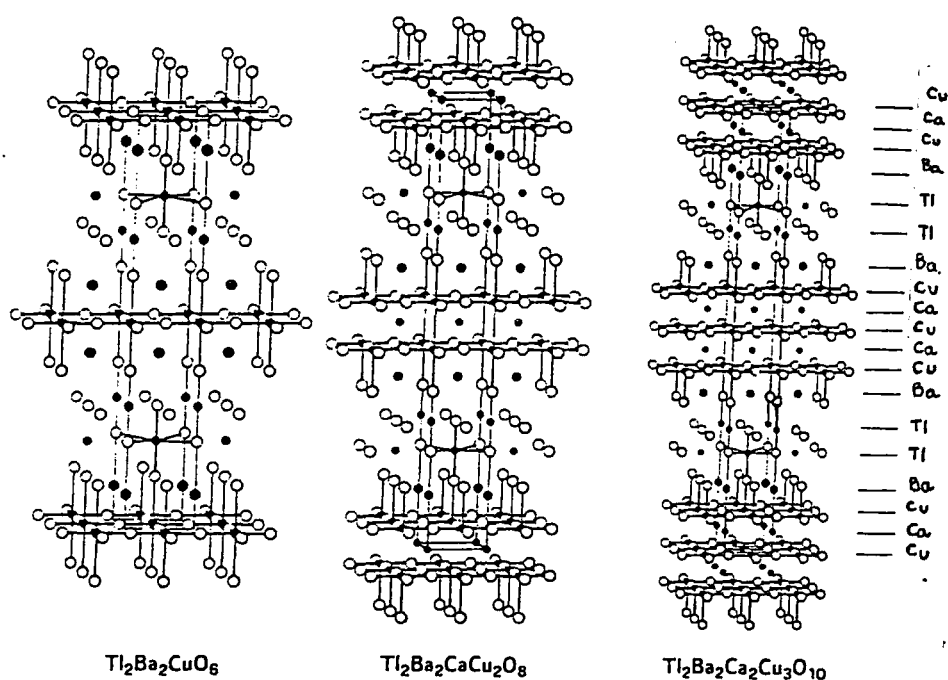
1. มีอุณหภูมิวิกฤตสูง อยู่ในช่วง 80 - 125 K
2. มีสูตรทั่วไปคล้ายกัน ซึ่งอาจเขียนได้ดังนี้



3. มีโครงสร้างคล้ายกันคือ เป็นชั้น ๆ โดยมีระนาบคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งปรากฏอยู่ในทุก ๆ กลุ่ม แทนที่ด้วย alkaline earth cations ดังรูป 2.6 และ 2.7



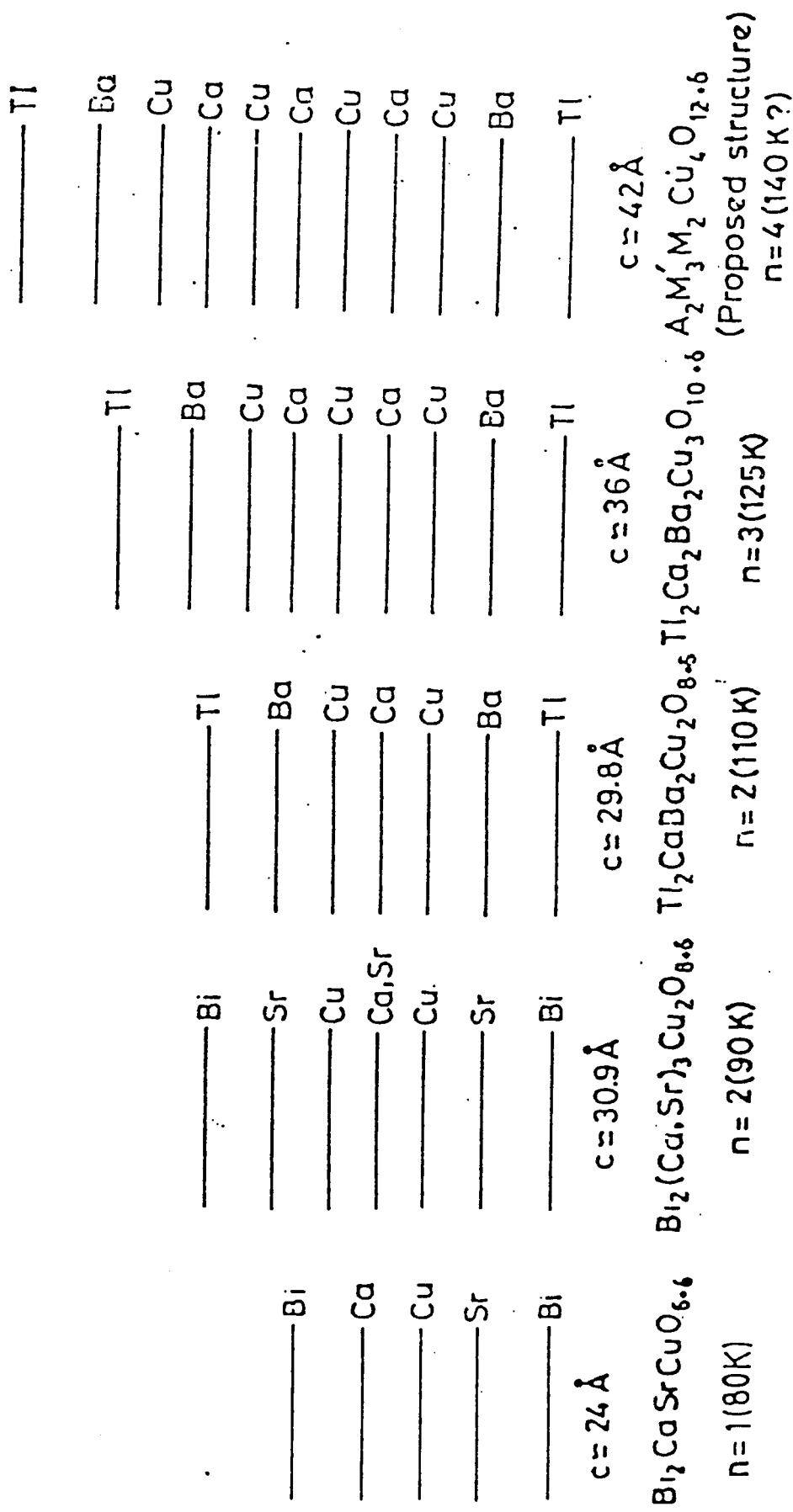
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ของสารตัวนำยวดยิ่ง thallium-copper-oxide 3 แบบ จากซ้ายมาขวา $Tl_2Ba_2Ca_{n+1}O_{6+2n}$ เมื่อ $n = 0, 1, 2$

สิ่งสำคัญที่พบในระบบบิสมาท (Bi) และเทลเลียม คือค่าอุณหภูมิวิกฤตจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า n เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ n หมายถึง การเพิ่มขึ้นของชั้น $Ca(Sr)/CuO_2$ แทรกในโครงสร้าง ดังแสดงในรูป 2.8 ผลของการค้นพบนี้มีประโยชน์มาก เพราะนำไปสู่การปรับปรุงให้ได้สารตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงตามต้องการ

แต่ทั้งสองระบบก็ยังคงมีความแตกต่างกันอยู่บ้างคือ ระบบบิสมาท มีโครงสร้างเป็น ออโรรมบิค ขณะที่ระบบเทลเลียมเป็นเตตระโกนอล ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ออโรรมบิค มีความคล้ายคลึงกับเตตระโกนอลมากเพียงแต่ $a \neq b$ เท่านั้น ดังอาจกล่าวได้ว่า ความเป็นเตตระโกนอล หรือออโรรมบิค ไม่เพียงพอที่จะบ่งชี้ถึงความเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง แต่สิ่งสำคัญมากกว่าคือ โครงสร้างในรายละเอียด เช่น การมีระนาบคอปเปอร์ออกไซด์, พันธะคอปเปอร์-ออกซิเจนรวมทั้ง ปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของตระกูล Bi-Ca-Sr-Cu-O และ Ti-Ca-Ba-Cu-O ค่าอุณหภูมิวิกฤตแสดงในวงเล็บต่อจากจำนวนของชั้นคอปเปอร์-ออกซิเจน (n)

จากโครงสร้างของสารตัวนำยิ่งยวดทั้ง 3 กลุ่ม อาจสรุปลักษณะสำคัญได้ดังนี้

- ทุก ๆ กลุ่มมีโครงสร้างคล้ายเปอร์รอฟสไกต์ และมีลักษณะเป็นชั้น ๆ โดยมีระนาบคอปเปอร์ออกไซด์แทรกอยู่ในโครงสร้าง

- การมีปริมาณออกซิเจนแตกต่างกันในหนึ่งหน่วยเซลล์ มีผลต่อค่าอุณหภูมิวิกฤติและโครงสร้าง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในกรณีของ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ เมื่อมี $\delta = 0$ จะมีโครงสร้างเป็นออร์โธรมบิก โดยมีพันธะคอปเปอร์-ออกซิเจน ซึ่งคาดว่าจะเป็นส่วนสำคัญในการทำให้เกิดสมบัติตัวนำยิ่งยวดเช่นเดียวกับระนาบคอปเปอร์ออกไซด์

- ในระบบบิสมาทและเทลเลียม พบว่าอุณหภูมิวิกฤติสูงขึ้น เมื่อจำนวนระนาบ $Ca(Sr)/CuO_2$ เพิ่มขึ้น

2.3.1 รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

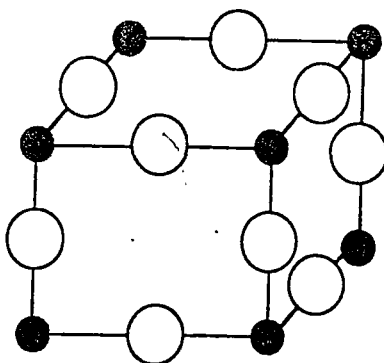
สารประกอบตัวนำเวดิงที่มีโครงสร้างแบบเปอร์รอฟสไกต์ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบเรียบมโททานเนต (BaTiO_3) คือ

1. รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200°C ผลึกแบบเรียบมโททานเนตที่มีโครงสร้างคล้ายเปอร์รอฟสไกต์ จะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีพารามิเตอร์ 3 ตัวซึ่งมีค่าเท่ากัน ($a=b=c$) หน่วยเซลล์จะมีสูตรเฉพาะตัวคือ BaTiO_3 และตำแหน่งของอะตอมจะอยู่ในตำแหน่งพิเศษ

$$\begin{array}{lll} \text{Ba} & (1a) & \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \\ \text{Ti} & (1b) & 0, 0, 0 \\ \text{O} & (3c) & 0, 0, \frac{1}{2}; 0, \frac{1}{2}, 0; \frac{1}{2}, 0, 0 \end{array}$$

ซึ่งระบุได้ว่า ที่ (1a) เป็นตำแหน่งของแลททิส a จะมีอะตอม 1 ตัว, (3c) เป็นแลททิสชนิด c มีอะตอม 3 ตัว ตำแหน่งของอะตอมจะถูกกำหนดโดยโคออร์ดิเนต 3 ตัว เช่น $0, 0, 1/2$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของออกซิเจนที่ $x = 0, y = 0, z = 0.5a$ การจัดเรียงนี้เป็นไปตามการแทนที่ของโททานเนียมในแต่ละมุม อะตอมของแบบเรียบมอยู่ตรงกลาง และอะตอมของออกซิเจนจะอยู่ตรงกลางของแต่ละด้านของลูกบาศก์ ค่าคงที่ของแลททิสหรือความยาวของหน่วยเซลล์ คือ $a = 4.0118 \text{ \AA}$ ที่อุณหภูมิ 201°C



รูปที่ 2.9 หน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แบบเปอร์รอฟสไกต์

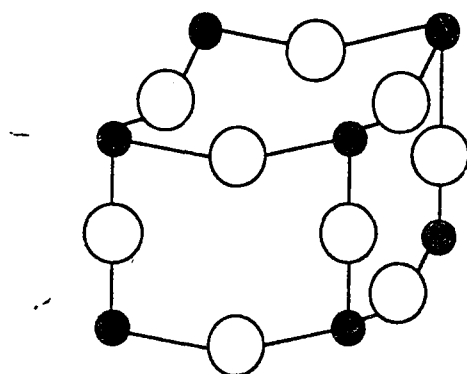
- อะตอมของโททานเนียม
- อะตอมของออกซิเจน

2.3.2 รูปทรงเตตระโกนอล

ที่อุณหภูมิห้อง แบเรียมไททานเตจะเป็นเตตระโกนอล ด้วยค่า $a = 3.9947 \text{ \AA}$ และ $c = 4.0336 \text{ \AA}$ ซึ่งใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ สำหรับการมีสมมาตรที่น้อยกว่านี้ ออกซิเจนถูกกำหนดไว้ 2 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน ตำแหน่งแรกจะอยู่ด้านข้างและอีกตำแหน่งจะอยู่ส่วนบนและล่าง ตำแหน่งของอะตอมคือ

$$\begin{array}{l} \text{Ba} \quad \cdot \quad \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0.488 \\ \text{Ti} \quad \quad 0, 0, 0 \\ \text{O}(1) \quad 0, 0, 0.511 \\ \text{O}(2) \quad 0, \frac{1}{2}, -0.026; \frac{1}{2}, 0, -0.026 \end{array}$$

ดังแสดงในรูป 2.10 ซึ่งจะเห็นความบิดเบือนของรูปทรงได้ง่าย ซึ่งพบภายหลังว่า มีความเพี้ยนเหมือนโครงสร้าง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7,\delta}$



รูปที่ 2.10 หน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างเตตระโกนอลแบบเปอร์รอฟสไกต์ แสดงรอยย่นของชั้นไททานเนียม-ออกซิเจน (Ti-O Layer)

จากตาราง 1 เป็นการเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และเตตระโกนอล จะพบว่า มีการบิดเบือนจากรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์น้อยมาก

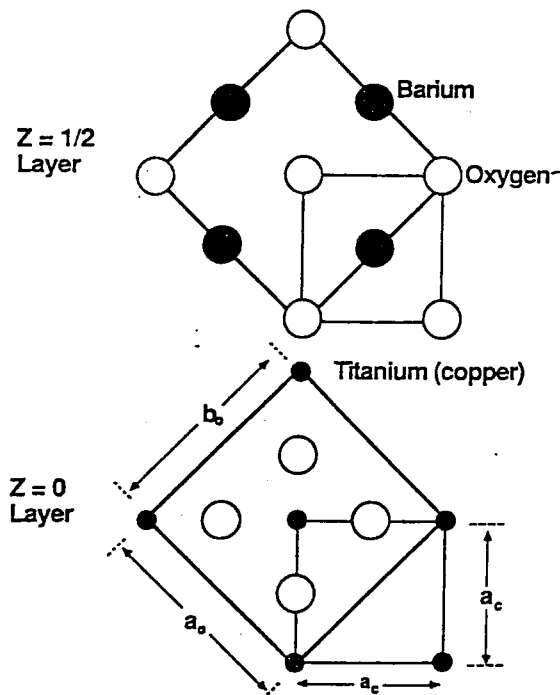
2.3.8. รูปทรงออร์โธรมบิก

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 °C แบเรียมจะมีสมมาตรลดลงกลายเป็นออร์โธรมบิก , เซลล์ที่ถูกขยายใหญ่ขึ้นจะถูกหมุนไป 45 องศา เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 5 °C ดังนั้นพารามิเตอร์ a,b จะขยายใหญ่ขึ้น โดยองค์ประกอบ $\sqrt{2}$ ค่าเลขทศ a = 5.669 = 4.009 $\sqrt{2}$ Å, b = 5.682 = 4.018 $\sqrt{2}$ Å, c = 3.990 Å ตำแหน่งของอะตอมคือ

Ba	(2a)	$0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}$		
Ti	(2b)	$0, u + \frac{1}{2}, 0; \frac{1}{2}, u, 0$	เมื่อ	$u = 0.510$
O(1)	(2a)	$0, u + \frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{1}{2}, u, \frac{1}{2}$	เมื่อ	$u = 0.490$
O(2)	(4e)	$u, v + \frac{1}{2}, 0; -u, v + \frac{1}{2}, 0; u + \frac{1}{2}, v, 0; -u + \frac{1}{2}, v, 0$	เมื่อ	$u = 0.253, v = 0.237$

เมื่อ u=0 สำหรับแบเรียม

จะได้ว่า แบเรียมและO(1) จะอยู่ในตำแหน่ง (2a) เดียวกัน แต่ค่าพารามิเตอร์ u ต่างกัน



รูปที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของอะตอม เมื่อยูนิตเซลล์ของเตตระโกนอลที่เป็นโมเลกุลเดี่ยว ถูกขยายออกเป็นยูนิตเซลล์ของออร์โธรมบิกที่เป็นโมเลกุลคู่ ด้วยมุม 45 °จากมุมเดิม

จากรูป 2.11 แสดงโคออร์ดิเนตของอะตอมในรูปออร์โธโรมบิก โดยประมาณ $1/2$ แทน 0.490 และ 0.510 และ $1/4$ สำหรับ 0.235 และ 0.237

จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงจากรูปทรงคิวบิกไปเป็นเตตระโกนอล จะทำให้โคออร์ดิเนต z ของอะตอมเท่านั้นที่เปลี่ยนไป ในขณะที่ออร์โธโรมบิกต่างจากสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ในระนาบ x,y เนื่องจากการเลื่อนไปของอะตอม

ตาราง 1.1 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งอะตอมของ $BaTiO_3$ ในโครงสร้างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์, เตตระโกนอล และออร์โธโรมบิก

Group	Atom	Cubic and x	tetragonal y	Cubic z	Tetragonal z	Orthorhombic z
TiO_2	Ti	0	0	1	1	1
	O	0	$1/2$	1	0.974	1
	O	$1/2$	0	1	0.974	1
BaO	O	0	0	$1/2$	0.511	$1/2$
	Ba	$1/2$	$1/2$	$1/2$	0.488	$1/2$
TiO_2	Ti	0	0	0	0	0
	O	0	$1/2$	0	-0.026	0
	O	$1/2$	0	0	-0.026	0

2.4 ยิทเทรียม-แบเรียม-คอปเปอร์-ออกไซด์

YBaCuO ได้แก่ $Y_{1-x}Ba_xCu_3O_{7-\delta}$ มีโครงสร้างที่เป็นทั้งเตตระโกนอล และออโรมบิก YBaCuO ใช้สูตรเคมีคือ $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ เนื่องจากมีออกซิเจน 9 ตัวในโครงสร้างแม่แบบ เพอร์รอฟสไกต์ เมื่อนักผลึกวิทยากล่าวว่ามี 14 อะตอมใน YBaCuO 1 ยูนิตเซลล์ จะมีตำแหน่งของ ออกซิเจน 8 ตำแหน่ง จึงใช้สูตร $Y_1Ba_2Cu_3O_8\delta$ ใช้กันอย่างกว้างขวาง เมื่อพิจารณาโครงสร้าง โดยละเอียดพบว่าตำแหน่งของออกซิเจนว่าง จึงมีสูตรที่เหมาะสมคือ $Y_1Ba_2Cu_3O_{7,\delta}$

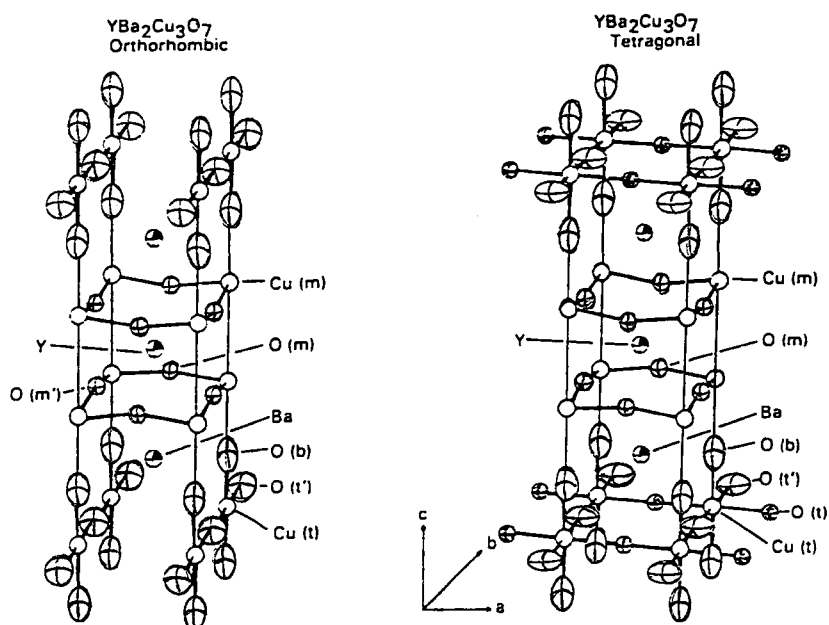
2.4.1 รูปทรงเตตระโกนอล

โครงสร้างเตตระโกนอลของ $YBa_2Cu_3O_{7,\delta}$ จะมี 1 สูตรต่อ 1 หน่วยเซลล์ ยิทเทรียมและคอปเปอร์ 1 อะตอมจะอยู่ในตำแหน่งพิเศษ และอะตอมที่อยู่กับที่จะอยู่ในตำแหน่งทั่วไปกับพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถระบุได้ในโคออร์ดิเนต z

Y	(1d)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$	
Ba	(2h)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, u; \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -u$	$u = 0.1914$
Cu(t)	(1a)	0,0,0	
Cu(m)	(2g)	0,0, v; 0,0, -v	$v = 0.3590$
O(t)	(2f)	$0, \frac{1}{2}, 0; \frac{1}{2}, 0, 0$	
O(m, m')	(4i)	$0, \frac{1}{2}, w; \frac{1}{2}, 0, w$ $0, \frac{1}{2}, -w; \frac{1}{2}, 0, -w$	$w = 0.3792$
O(b)	(2g)	0,0, x; 0,0, -x	$x = 0.1508$

โดยมี $a = 3.9018 \text{ \AA}$, $c = 11.9403 \text{ \AA}$ ตำแหน่งออกซิเจน O(t) จะถูกจับจองบางส่วน ด้านขวาของรูป 2.12 แสดงรูปโครงสร้างตำแหน่งของออกซิเจนในระนาบพื้นที่ $z = 0$ จะถูกจับจองอย่างสุ่มครึ่งหนึ่งหรืออยู่ไม่เป็นระเบียบ การหายไปของระนาบชั้นคอปเปอร์ออกไซด์ในส่วนบนและล่างของอะตอมยิทเทรียมโดยทันที จะทำให้มีโครงสร้างเป็นเพอร์รอฟสไกต์ที่มีรูปทรงเป็นเตตระโกนอล ดังรูป 2.10

สารตัวนำยิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ เป็นเวอร์ชันของเตตระโกนอลชนิดหนึ่งของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของพันธะออกซิเจนทำให้ไม่มีพันธะ อยู่บนระนาบพื้น



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของยิทเทรียม-แบเรียม-คอปเปอร์ ออกไซด์ เป็นออร์โธโรมบิก (ซ้าย) เป็นเตตระโกนอล (ขวา)

ออกซิเจนจะกระจายอย่างสุ่มทั่วไปในตำแหน่งระนาบพื้น ในโครงสร้างเตตระโกนอล
รูปใหม่มีการสั่นทางความร้อนจะแสดงอะตอม

2.4.2 รูปทรงอโรรมบิก

YBa_2Cu_3O ที่มีโครงสร้างแบบอโรรมบิกเป็นโครงสร้าง 123 ซึ่งมี 1 สูตรต่อ 1 ยูนิต เซล และพารามิเตอร์ $a=3.827 \text{ \AA}$, $b=3.882 \text{ \AA}$, $c= 11.682 \text{ \AA}$ อีทเทรียม ,1 คอปเปอร์ และ ออกซิเจน 2 ตัวอยู่ในตำแหน่งพิเศษ และอะตอมที่อยู่กับที่จะอยู่ในตำแหน่งทั่ว ๆ ไป พร้อมทั้งมี พารามิเตอร์ที่ไม่สามารถกำหนดได้ในโคออร์ดิเนต z

Y	(1h)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$	
Ba	(2t)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, u; \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -u$	$u = 0.1854$
Cu(t)	(1a)	0,0,0	
Cu(m)	(2q)	0,0, v; 0,0, -v	$v = 0.3555$
O(t)	(1b)	$\frac{1}{2}, 0, 0$	
O(t')	(1e)	$0, \frac{1}{2}, 0$	
O(m')	(2r)	$0, \frac{1}{2}, x; 0, \frac{1}{2}, -x$	$x = 0.3790$
O(m)	(2s)	$\frac{1}{2}, 0, y; \frac{1}{2}, 0, -y$	$y = 0.3781$
O(b)	(2q)	0,0, z; 0,0, -z	$z = 0.1568$

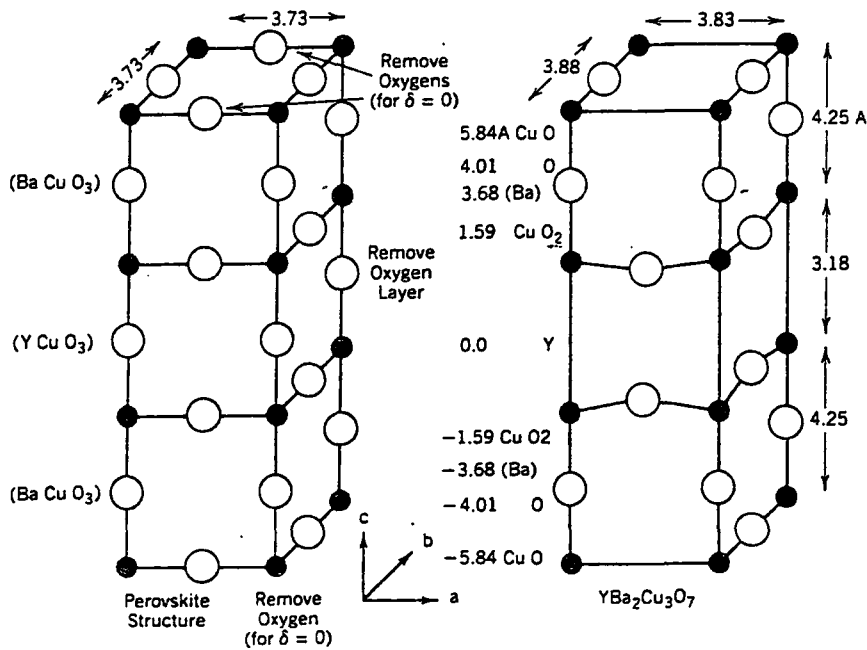
พารามิเตอร์ u, v, w, x, y และ z เป็นไปตามตำแหน่งโดยเฉลี่ยของอะตอม จะเห็นว่าตำแหน่งของ O(t) วาง เป็นไปตามพันธะ -Cu-O(t')-Cu(t')-O- ในทิศ b ตำแหน่งว่างของ O(t) เกิดจากยูนิตเซลล์ถูกอัดเล็กน้อยในทิศ a ที่กระทำต่อ $a < b$

2.4.3 การตั้งชื่อตำแหน่งของออกซิเจน

ได้นำตัวเลขมาใช้เพื่อความสะดวกและที่แสดงในรูป 2.12 ใช้อักษร t และ t' สำหรับ ส่วนบน(และล่างที่เท่ากัน) ของชั้นคอปเปอร์ออกไซด์ และ m และ m' สำหรับตรงกลาง ของชั้นคอปเปอร์ออกไซด์ และ O(b) แสดงออกซิเจนในชั้นแบเรียม

2.4.4. การเกิดโครงสร้าง YBaCuO

โครงสร้างเตตระโกนอลของ YBaCuO ได้จากยูนิตเซลล์ของออกซิเจนแบบ fcc 3 อัน ดังรูป 2.9 ซึ่งมีอยู่กลุ่มหนึ่งอยู่เหนือแกน z หรือ c รูป 2.13 แสดงโครงสร้าง YBaCuO ในรูป ยูนิตเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล โดยมีแบเรียมอยู่ตรงกลางของตรงกลางลูกบาศก์ ซึ่ง ถูกแทนที่โดยยิทเทรียม ในการเกิดช่องว่างของออกซิเจนที่เคลื่อนที่ และการเกิดยิทเทรียมขนาด เล็ก จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ถูกกดในแนวแกน c, ออกซิเจนในแนวตั้งถูกเคลื่อนย้ายในแนว แกน c สารประกอบ $\delta=0$ ต่างจากแม่แบบเปอร์รอฟสไกท์ จากรูป 2.13 ด้านซ้ายคือการหายไปของออกซิเจน 2 ตัว



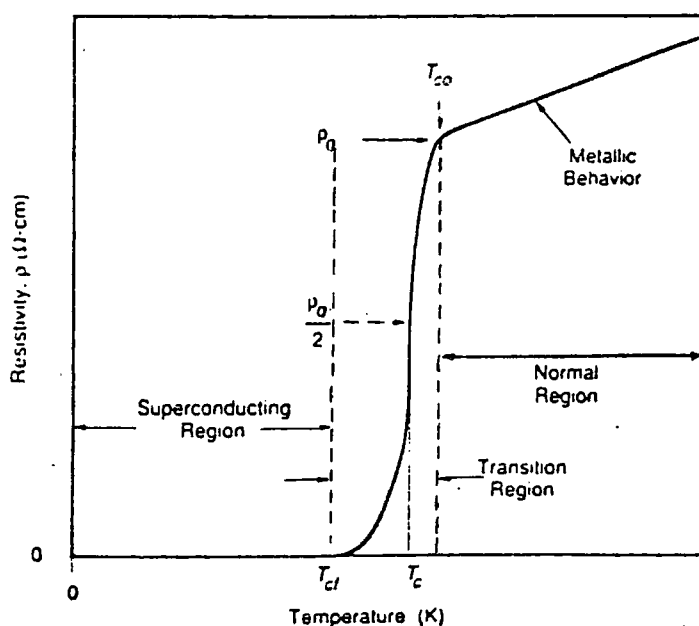
รูปที่ 2.13 การเกิดยูนิตเซลล์ยิทเทรียม-แบเรียม-คอปเปอร์ ออกไซด์ (ขวา)

จาก BaCuO₃ 3 ชุด(ซ้าย) โดยการเคลื่อนที่ของออกซิเจนในระดับยิทเทรียม
เมื่อยิทเทรียมแทนที่แบเรียม

2.5 อุณหภูมิวิกฤติ

ในการพิจารณาอุณหภูมิวิกฤติ จะพิจารณาในกรณีที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ และถ้าสารตัวนำวดยิ่งมีช่วงการเปลี่ยนสถานะ จากสถานะนำปกติไปสู่สถานะนำวดยิ่ง (Transition Region) แคบ ๆ ค่าอุณหภูมิวิกฤติจะถือได้ว่าเป็นค่าอุณหภูมินั้น แต่ถ้าช่วงการเปลี่ยนสถานะนั้นมีช่วงกว้าง ต้องมีการพิจารณาอย่างถูกต้อง

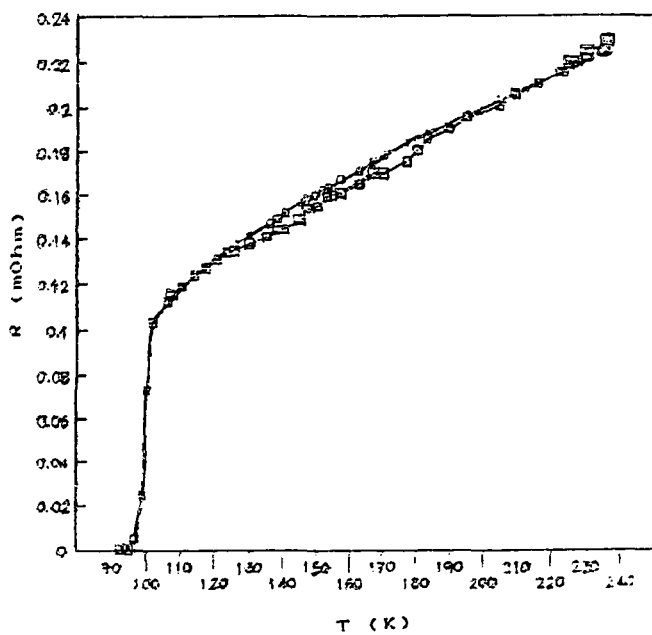
สารตัวนำวดยิ่งที่เป็นเซรามิกส์ ค่าอุณหภูมิวิกฤติหาได้จาก ค่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนจากการนำปกติสู่การนำวดยิ่ง



รูปที่ 2.15 แสดงค่าสภาพต้านทานกับอุณหภูมิ

ค่า T_{co} คือจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะการนำปกติไปสู่สถานะนำวดยิ่ง และค่าความชันของกราฟจะมีความแตกต่างกันระหว่างการวัดที่ใช้กระแสตรง (dc current) กับการใช้กระแสสลับ (ac current) ถ้าค่าความต้านทานของกระแสตรงที่ T_{co} มีค่าเป็น ρ_0 ดังนั้นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิวิกฤติ จะมีค่าเป็น $\rho_0/2$ ค่า T_{cl} คือค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ยังมีคุณสมบัติการนำวดยิ่งอย่างสมบูรณ์

ค่าความกว้างของการเปลี่ยนสถานะ (Transition Width) อาจหมายถึง ช่วงอุณหภูมิที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปในช่วง 10% ถึง 90% ของความต้านทานที่ T_{90} สำหรับสารตัวนำยิ่งยวดที่มีความบริสุทธิ์สูง จะมีค่าความกว้างของการเปลี่ยนสถานะแคบ แต่ในทางปฏิบัติ ค่า T_{90} และค่า T_{10} มักจะมาจากการประมาณค่าเท่านั้น ถ้าค่าความกว้างของการเปลี่ยนสถานะมีค่าน้อย ก็จะทำให้ทราบถึงความบริสุทธิ์ของสารตัวนำยิ่งยวดสำหรับในสารประกอบตัวนำยิ่งยวด เช่น ออกไซด์ของทองแดง จะมีค่าความกว้างการเปลี่ยนสถานะประมาณ 2 - 10 K



รูปที่ 2.16 แสดงการจำลองการเปลี่ยนแปลงของสารตัวนำยิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

2.6 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ในสภาพการนำไฟฟ้ายวดยิ่ง ความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นแม้จะมีกระแสไฟฟ้าไหล แต่ก็จะไม่เกิดความต่างศักย์และไม่เกิดการสูญเสียความร้อนของ Joule

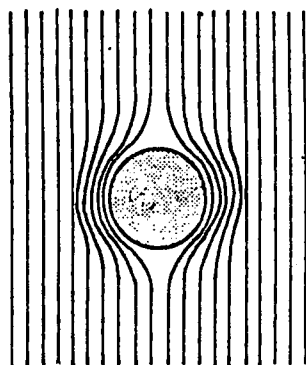
สารตัวนำยวดยิ่งไม่เพียงแต่เป็นสารตัวนำที่สมบูรณ์แบบ (perfect conductor) เท่านั้น แต่ยังมีคุณสมบัติแม่เหล็กไดอะที่สมบูรณ์แบบอีกด้วย (perfect diamagnetic) ซึ่งหมายความว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์ ($B = 0$) นั่นคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในเป็นศูนย์ ($\mathcal{E}=0$) ในทุกตำแหน่งเนื้อสารตัวนำยวดยิ่ง จากกฎฟาราเดย์

$$\oint \mathcal{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\phi_B / dt$$

สมการนี้หมายความว่า เส้นอินทิกรัลของสนามไฟฟ้า \mathcal{E} รอบ ๆ ลูปปิดมีค่าเท่ากับอัตราการของการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ_B รอบลูป

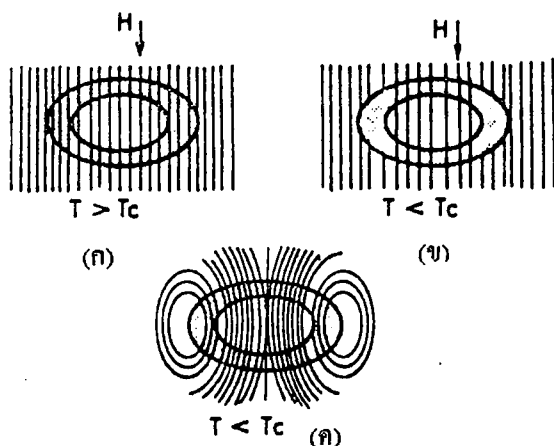
ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ_B ที่ผ่านทุกส่วนปิดของสารจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($d\phi_B / dt = 0$) นั่นคือค่าสนามแม่เหล็ก B ในสารตัวนำยวดยิ่งมีค่าคงที่ ($dB / dt = 0$) ในสภาวะปกติสนามแม่เหล็กสามารถทะลุผ่านโลหะได้ แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกวิกฤติ ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่อโลหะ กฎของฟาราเดย์กล่าวว่า “ สนามแม่เหล็กภายในสารตัวนำยวดยิ่งจะมีค่าคงที่ ($d\phi_B / dt = 0$) และจะถูกขังภายในเนื้อสาร ” แต่สิ่งนี้จะไม่เกิดในโลหะเมื่อโลหะมีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง สนามแม่เหล็กจะถูกขับออกไปจากเนื้อสาร ดังนั้น $B = 0$ ทุกที่ภายในเนื้อสาร เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งค้นพบโดย W.Meissner และ R.Ochsenfeld ในปี 1933

เมื่อลดอุณหภูมิสารตัวนำยวดยิ่งให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิกวิกฤติ และวางในสนามแม่เหล็ก B ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกขับออกจากก้อนสาร โดยไม่คำนึงถึงลำดับในการลดอุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่งว่าก่อนหรือหลังการป้อนสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ในของแข็ง

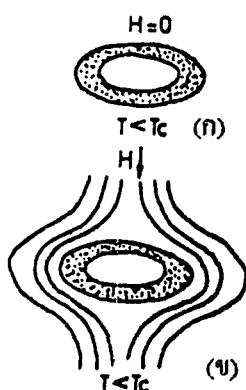
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์เกิดได้ตามลักษณะของสาร เช่น สารเป็นวงแหวน ทรงกระบอกกลวง รูปของกระแส หรือวงจรถัดอื่น ๆ ซึ่งผลที่เกิดกับวงแหวนที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่งจะมีลักษณะดังรูป 2.18 และรูป 2.19



รูปที่ 2.18 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ในวงแหวน เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กก่อนลดอุณหภูมิ

ในรูป (ก) เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง ฟลักซ์แม่เหล็กจะทะลุผ่านวัตถุออกมา เมื่อลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมวิวิกฤติ แล้วป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไป ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกขับออกจากภาคตัดขวางของวงแหวนโดยมีการนำกระแสในรูปดังรูป (ข)

อย่างไรก็ตาม ยังคงมีฟลักซ์อยู่ในโพรงของวงแหวนดังรูป (ค) เมื่อไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกขังไว้เนื่องจากเส้นฟลักซ์ไม่สามารถทะลุผ่านสารตัวนำยวดยิ่งได้



รูปที่ 2.19 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ในวงแหวน
เมื่อทำการลดอุณหภูมิก่อนป้อนสนามแม่เหล็ก

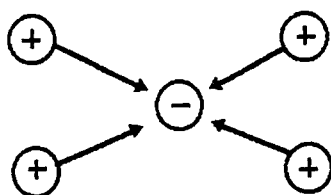
หรืออีกนัยหนึ่งถ้าลดอุณหภูมิวงแหวนก่อนที่จะป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปดังรูป (ก)
เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B ฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกขับออกจากวงแหวนทั้งหมดรวมทั้งโพรง ดังรูป
(ข) เพราะฟลักซ์แม่เหล็กไม่สามารถทะลุผ่านเนื้อสารตัวนำยวดยิ่ง เพื่อจะเข้าไปในโพรงที่
อยู่ในวงแหวนได้ กระแสที่ไหลในวงแหวนจะรักษาฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่นอกวงแหวนและ
นอกโพรง

W. Meissner และ R. Ochsenfeld ได้ทำการทดลองวัดเส้นแรงแม่เหล็กภายในตัวสาร
ตัวนำยวดยิ่ง พบว่า สนามแม่เหล็กภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายวดยิ่งจะต้องเป็นศูนย์เสมอ และไม่
ขึ้นกับขั้นตอนการลดอุณหภูมิ หรือการป้อนสนามแม่เหล็ก

2.7 ทฤษฎี BCS

ในสถานะการนำยวดยิ่งซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษนั้น อาจคาดคะเนได้ว่า พฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะการนำยวดยิ่งย่อมแตกต่างจากพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนำปกติ ได้มีทฤษฎีต่าง ๆ พยายามอธิบายข้อแตกต่างและสาเหตุ ในปี ค.ศ. 1957 ทฤษฎี BCS ได้ถูกค้นคิดโดย J. Bardeen, L. N. Cooper และ J. R. Schrieffer ซึ่งประสบความสำเร็จในการอธิบายคุณสมบัติพื้นฐานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนำยวดยิ่ง

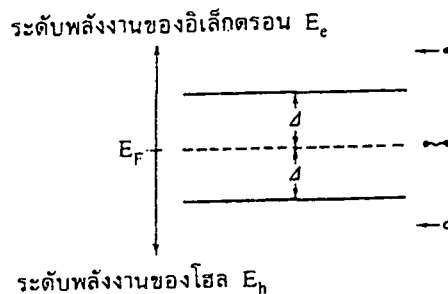
Frohlich และ Bardeen ได้อธิบายทฤษฎีที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เกิดสภาพนำไฟฟ้ายวดยิ่ง โดยมีความว่า “ สารตัวนำที่เลวสามารถทำเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายวดยิ่ง ได้ดี ส่วนสารตัวนำที่ดีทำเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายวดยิ่งไม่ได้ ” เพราะที่อุณหภูมิปกติ สารตัวนำเกิดปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและโฟนอนด้วยกัน ส่วนการนำไฟฟ้ายวดยิ่งในสารที่ไม่ใช่สารตัวนำเกิดจากการทำปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนและโฟนอน และเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งมาทำปฏิกิริยาด้วย คือ อิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนทางอ้อม โดยผ่านแลตทิซซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูกกัน กล่าวคือที่อุณหภูมิต่ำ อิเล็กตรอนจะดึงดูดซึ่งกันและกัน เนื่องจากในแลตทิซ อิเล็กตรอนดึงดูดอิออนบวกที่อยู่รอบข้าง ทำให้เกิดตาข่ายประจุบวก เมื่อประจุบวกมีจำนวนมากก่าปกติ ซึ่งเป็นไปดังรูป 2.20 ทำให้อิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวถูกดึงดูดด้วยตาข่ายนี้ เมื่ออิเล็กตรอนทั้งคู่เคลื่อนที่ผ่านแลตทิซ ทำให้แลตทิซเกิดการสั่นซึ่งเกิดจากโฟนอน การดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนจึงเป็นการแลกเปลี่ยนโฟนอน ซึ่งต่อมา Cooper ได้เสนอว่า ปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ มีค่าน้อยก็จริง แต่ถ้าอิเล็กตรอนทั้งสองตัวทำปฏิกิริยากับโฟนอนที่มีสปินชี้ไปในทางตรงข้าม ปฏิกิริยาอิเล็กตรอนดึงดูดกับอิเล็กตรอนจะมีค่ามาก และเรียกอิเล็กตรอนคู่นี้ว่า Cooper Pair ดังนั้น Cooper ได้อธิบายการนำไฟฟ้ายวดยิ่งว่า “ โลหะประกอบด้วยอิเล็กตรอนเป็นชั้น ๆ จนถึงระดับเฟอร์มี ถ้าดึงอิเล็กตรอน 2 ตัวออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระโดย อิเล็กตรอนคู่นั้นมีสปินตรงข้ามกัน (โมเมนตัมมีขนาดเท่ากัน แต่ทิศการหมุนตรงข้าม) จะเกิดปฏิกิริยาดึงดูดกัน ”



รูปที่ 2.20 แสดงตาข่ายของประจุบวกที่เกิดขึ้นรอบ ๆ อิเล็กตรอน

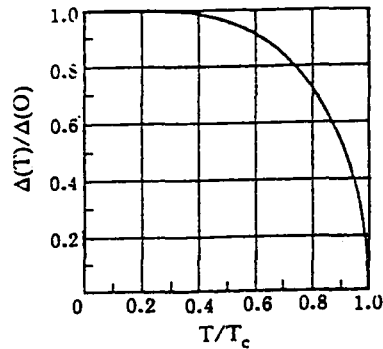
นอกจากนี้ ทฤษฎี BCS ยังอธิบายคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของยิ่ง โดยใช้ทฤษฎีแถบพลังงาน เช่นเดียวกับที่ใช้ในโมเดลสารกึ่งตัวนำด้วย จากรูป 2.21 แสดงโมเดลแถบพลังงาน ในแกนตั้งคือ พลังงาน ในที่ศบน แสดงการเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอน และทิศล่าง แสดงการเพิ่มพลังงานของโฮล เมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลในสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์ ก็มีส่วนคล้ายคลึง โดยถ้าให้ระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ห่างจากของแถบพลังงานคอนดักชัน และขอบแถบพลังงานวาเลนซ์ เท่ากับ Δ เท่า ๆ กัน 2Δ จะแสดงค่าช่องว่างพลังงานต้องห้ามในสถานะนำไฟฟ้าของยิ่งนั้น คู่อิเล็กตรอนซึ่งเป็นซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ ถ้าคู่อิเล็กตรอนคู่หนึ่งเกิดการสลายตัวไป จะทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้กระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน ในลักษณะคล้ายสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชันหรือ โฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ควอซิพาร์ติเคิล (Quasiparticle)

ระดับพลังงานที่คู่อิเล็กตรอนซึ่งเป็นซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอนเกิดขึ้นหรือสลายตัวนั้น คือระดับเฟอร์มิ แถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์คือ ระดับพลังงานที่ควอซิพาร์ติเคิล ถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่



รูปที่ 2.21 โมเดลแสดงสถานะซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอน

ช่องว่างพลังงานเกิดขึ้นจากที่คู่อิเล็กตรอน (electron pair) มีปฏิริยาต่อกันและกัน ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น คู่อิเล็กตรอน(ซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอน) จะแยกตัวออกกลายเป็น ควอซิพาร์ติเคิล(normal electron) และความหนาแน่นของคู่อิเล็กตรอนก็จะลดลงในขณะเดียวกัน ช่องว่างพลังงานก็จะค่อย ๆ แคบลง และเมื่อไรที่ $\Delta = 0$ สภาพการนำไฟฟ้าของยิ่งก็จะหมดไป กลายเป็นสภาพการนำไฟฟ้าธรรมดา การขึ้นกับอุณหภูมิของช่องว่างพลังงาน $\Delta(T)$ แสดงในรูป 2.22

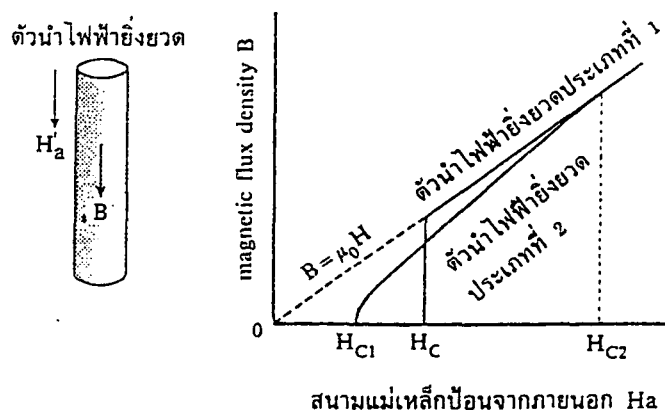


รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน Δ และอุณหภูมิ จากทฤษฎี BCS

คุณสมบัติพิเศษของสารตัวนำยวดยิ่งคือ สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้โดยปราศจากความต้านทาน สาเหตุที่ทำให้เกิดคุณสมบัติเช่นนี้คือ ในสภาวะนำไฟฟ้ายวดยิ่งนั้นอิเล็กตรอนจับกันเป็นคู่ ๆ การที่จะสลายคู่อิเล็กตรอนได้นั้น ต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าช่องว่างพลังงาน 2Δ จากการที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างคู่ด้วยกัน ความเร็วของศูนย์ถ่วงของคู่อิเล็กตรอนก็มีค่าเท่ากันทุกคู่ ถ้าความเร็วนี้เป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าก็จะเป็นศูนย์ และถ้าความเร็วไม่เป็นศูนย์กระแสไฟฟ้าก็จะไหลไปเรื่อย ๆ ในสภาวะนำไฟฟ้าแบบปกติ อิเล็กตรอนแต่ละตัวมีการชนกับโฟนอน และสารเจือปน ทำให้ทิศทางของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงจึงทำให้เกิดความต้านทาน แต่ในสภาวะนำไฟฟ้ายวดยิ่ง เนื่องจากอิเล็กตรอนแต่ละคู่มิ่ปฏิสัมพันธ์ต่อกันมาก คู่อิเล็กตรอนแต่ละคู่จึงไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางการเดินทางได้อิสระ ถ้าคู่อิเล็กตรอนสลายตัว ทิศทางการเดินทางจึงเปลี่ยนแปลง ซึ่งก็ต้องใช้พลังงานมากกว่า 2Δ ต่อคู่อิเล็กตรอนหนึ่งคู่ การขัดขวางกระแสไฟฟ้ายวดยิ่งด้วยโฟนอนหรือสารเจือปนต้องทำลายคู่อิเล็กตรอนทั้งหมด ซึ่งในความจริงนั้นทำไม่ได้ เพราะฉะนั้นจึงไม่มีความต้านทาน

2.8 สารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2

สารตัวนำยวดยิ่งมีทั้งประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤติ (H_c) มีค่าต่ำและมีค่าสูง ประเภทที่สนามแม่เหล็กมีค่าต่ำมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งมาก ส่วนประเภทที่สนามแม่เหล็กมีค่าสูงมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งไม่มาก ดังนั้นถ้ามองด้านความแข็งของวัสดุ อาจแบ่งสารตัวนำยวดยิ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารตัวนำยวดยิ่งแบบอ่อน และสารตัวนำยวดยิ่งแบบแข็ง แต่ในปัจจุบันประเภทของสารตัวนำยวดยิ่งมักแบ่งตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กเป็น 2 ประเภท และเรียกว่า สารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 (อ่อนและแข็ง ตามลำดับ)



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก (H_a) และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก B ในสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารเจือปนและวิธีการขึ้นรูป และกราฟการเป็นแม่เหล็กก็มีรูปเป็น Hysteresis การเพิ่มสารเจือปนหรือวิธีการขึ้นรูป อาจทำให้สารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 กลายเป็นสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 ได้ สารตัวนำยวดยิ่งในอุดมคติมักจะหมายถึงประเภทที่ 1

พิจารณารูป 2.23 โดยป้อนสนามแม่เหล็ก H_a จากภายนอกเข้าสู่สารตัวนำยวดยิ่งรูปทรงกระบอก ความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ภายในวัสดุจะมีค่าเป็นอย่างไร

ถ้าสารตัวอย่างเป็นสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 ทรายใดที่ H_a มีค่าน้อยกว่า H_c ภายในเนื้อสารจะมีสภาพนำยวดยิ่ง (อยู่ใน Meissner State) และจะแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ และ B ในวัสดุมีค่าเป็น 0 แต่ถ้า H_a มีค่าสูงกว่า H_c สารจะมีสภาพเป็นตัวนำปกติ และ $B = \mu_0 H_a$

ถ้าสารตัวอย่างเป็นสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 เมื่อป้อนสนาม H_c ที่มีค่ามากกว่า H_{c2} สารจะหมดสภาพนำยวดยิ่ง และถ้าป้อนสนามที่มีค่า H_c น้อยกว่า H_{c1} สารจะอยู่ใน Meissner State คือมีสภาพนำยวดยิ่ง แต่ในกรณีที่ H_c มีค่ามากกว่า H_{c1} (lower critical field) แต่ต่ำกว่าค่า H_{c2} (upper critical field) ในเนื้อสารจะมีส่วนที่เป็นทั้งสารตัวนำยวดยิ่งและปกติผสมกัน เรียกสถานะนี้ว่า Mixed State

ทราบเท่าที่อยู่ในช่วงนำยวดยิ่ง ค่าความต้านทาน(ρ) ของวัตถุเป็นศูนย์ ดังนั้น วัตถุจะมีคุณสมบัตินำไฟฟ้ายวดยิ่งเมื่ออยู่ในสนามที่มีค่าต่ำกว่า $H_{c2}(T)$ และใน Mixed State สารตัวนำยวดยิ่งจะไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 แล้ว พบว่า สารตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 มีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ มากมาย เนื่องจากสามารถคงสภาพนำยวดยิ่งได้ดี ไม่ว่าจะอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงและอุณหภูมิสูง

2.9 การประยุกต์ใช้สารตัวนำยวดยิ่ง

คุณสมบัติที่สำคัญและเด่นของสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง คือสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่มี ความต้านทาน แต่เงื่อนไขอื่นที่ติดตามมาด้วยก็คือ สนามแม่เหล็กที่ปรากฏอยู่ก็จะมีผลต่อสภาพนำยวดยิ่งด้วย ทำให้สารตัวนำยวดยิ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ Type 1 ซึ่งไม่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้ และ Type 2 ยังคงรักษาสภาพการนำยวดยิ่งที่สนามแม่เหล็กความเข้มสูงได้ ดังนั้นในเชิงประยุกต์แล้ว สารตัวนำยวดยิ่งที่จะใช้เป็นประโยชน์จึงเป็น Type 2 และสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงไม่ว่าจะเป็นในตระกูลอิตเทรียม, บิสมาท หรือ แทลเลียมก็เป็น Type 2 ทั้งสิ้น

ทางการศึกษา

เมื่อมีสารตัวนำยวดยิ่งมาใช้ที่อุณหภูมิห้อง การใช้ลวดทองแดงธรรมดาในห้องทดลองอาจเป็นที่ล้าสมัย หรือสิ้นเปลืองพลังงานโดยใช่เหตุ กฎของโอห์มที่เคยใช้ได้กับโลหะและความต้านทานโดยทั่วไปก็ไม่จำเป็นต้องเรียน ทฤษฎีการอธิบายสารตัวนำยวดยิ่งอาจเข้ามาแทนที่

ทางการแพทย์

เครื่องมือทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า Nuclear Magnetic Resonance (NMR) ใช้ในการตรวจสอบหาสภาพบกพร่องของร่างกาย โดยไม่มีผลกระทบทำให้เกิดอาการของโรคชนิดอื่นตามมา หลักการคร่าว ๆ ก็คือ มีสนามแม่เหล็กพลังงานสูง ทำให้ระดับพลังงานของนิวเคลียสของอะตอมใด ๆ แยกเป็น 2 ระดับ ความแตกต่างของระดับพลังงานทั้ง 2 ระดับจะคล่องจองกับการดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใด ๆ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหลืออยู่(หรือหายไป)จะถูกเปลี่ยนเป็นภาพโดยคอมพิวเตอร์ และสามารถระบุสาเหตุของโรคได้ เครื่องมือนี้ทางการแพทย์เรียกว่า MRI หรือ Magnetic Resonance Imaging แม่เหล็กที่ใช้กับเครื่องมือนี้มีขนาดโตมาก ในปัจจุบันแม่เหล็กนี้อาจแทนที่ได้ด้วย Supermagnet ที่เกิดจากการพันแท่งเหล็กอ่อนด้วยลวดที่ทำขึ้นจากสารตัวนำยวดยิ่ง เมื่อไม่ต้องคำนึงถึงการระบายความร้อนเช่นในลวดทองแดงธรรมดา Supermagnet ที่มีความแรงเท่ากัน จึงมีขนาดเล็กลงมากและเครื่องมือทางการแพทย์อีกชิ้นเรียกว่า HGMS หรือ High Gradient Magnetic Separation ใช้ในการแยกองค์ประกอบที่มีเหล็กสะสมอยู่ในร่างกายออกไป เซลล์เนื้อลอกใด ๆ ที่ร่างกายไม่ต้องการอาจถูกทำให้มีสารแม่เหล็กสะสมมากเป็นพิเศษ แล้วแยกออกไปด้วย HGMS เมื่อแยกออกจากร่างกายแล้ว ก็มีขั้นตอนในการนำออกจากร่างกายตามวิธีการทางชีวเคมี เครื่องมือนี้มีแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นบทบาทของสารตัวนำยวดยิ่งจึงเข้ามาในลักษณะเดียวกับ MRI

ทางการวิจัยและเทคโนโลยีและพลังงาน

ในยุโรปและสหรัฐอเมริกา มีการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคขนาดใหญ่สำหรับงานวิจัยอนุภาคมูลฐาน เช่น นิวตริโนควาร์ก (Quark) ในการเก็บอนุภาค จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กพลังงานสูงในการจำกัดบริเวณของอนุภาคเหล่านี้ การใช้ Supermagnet จะทำให้ประหยัดพลังงานขึ้นอีกมาก ความสำคัญของการมีเครื่องเร่งอนุภาคมีประโยชน์มากมาย เช่น การผลิตนิวตรอนผลิตแก๊สมันตรังสี การวิเคราะห์โครงสร้างของสารใด ๆ อย่างไรก็ตาม บทบาทของสารตัวนำยวดยิ่ง ในเรื่องนี้ เป็นเรื่องของการประหยัดพลังงานเท่านั้น เมื่อมี Supermagnet ก็สามารถพัฒนารถไฟรางเดี่ยวที่วิ่งลอยอยู่ในสนามแม่เหล็กได้โดยง่าย

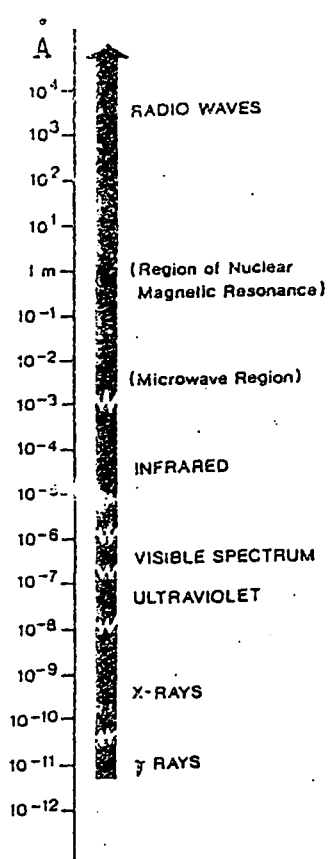
นอกจากการใช้สารตัวนำยวดยิ่งช่วงสร้าง Supermagnet โดยใช้กระแสไฟฟ้าผ่านมาก ๆ แล้ว ยังมีการนำสารตัวนำยวดยิ่งไปใช้พัฒนาทรานซิสเตอร์ ที่ทำด้วยสารตัวนำยวดยิ่งแทนที่จะเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน การวิจัยทางนี้ถือว่าการวิจัยทางกระแสต่ำ ประโยชน์โดยทั่วไปก็เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์และไอซี ผิดกันเพียงแต่ว่าโครงสร้างใหม่จะใช้ได้ที่มีความถี่สูงกว่า กล่าวคือ ที่ล้านล้านเมกะเฮิร์ตซ์แทนที่จะเป็นพันล้านเมกะเฮิร์ตซ์ในสารกึ่งตัวนำยิ่งความถี่สูงมากเท่าใด ก็สามารถทำงานได้เร็วกว่าและเก็บข้อมูลได้มากกว่าเท่านั้น ทิศทางการวิจัยที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ก็คือการสร้าง devices ด้วยสารตัวนำยวดยิ่ง โดยปกติในทางฟิสิกส์ เมื่อนำสารตัวนำยวดยิ่ง 2 ชิ้นมาประกบกับกันจนจูนหนึ่ง จะก่อให้เกิดรอยต่อที่เรียกว่าโจเซฟสัน (Josephson junction) ดังนั้น จึงเรียกอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นด้วยสารประเภทนี้ว่า Josephson Devices อุปกรณ์เหล่านี้เป็นทิศทางในการพัฒนาคอมพิวเตอร์ที่ทำงานเร็วมากเป็นพิเศษ (Supercomputer) จะขอเรียกคอมพิวเตอร์ที่ทำจากอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า Superconductive Josephson Computers

การคำนวณถูกจำกัดด้วยความถี่สูงสุดที่อุปกรณ์มูลฐานสามารถทำงานได้และการเคลื่อนที่ของสัญญาณไฟฟ้า เช่น ถ้าสร้างขึ้นด้วยสารกึ่งตัวนำที่ตอบสนองด้วยความเร็ว 10^9 วินาที (หรือความถี่พันล้านเฮิร์ตซ์) ใน 10^9 วินาที สัญญาณไฟฟ้าที่เดินทางได้เร็วเท่าแสงจะเดินทางไปได้ (ไปกลับ) ประมาณ 25 cm. เท่านั้น ในการทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานได้เร็วขึ้นวิธีหนึ่งคือ การลดขนาดของคอมพิวเตอร์ลง ถ้าจะให้สัญญาณวิ่งไปกลับในเวลา 10^9 วินาที ต้องทำให้ขนาดเล็กลงเหลือ 10 cm. ด้วยเทคโนโลยีการทำไอซีในปัจจุบัน การบรรจุคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ให้อยู่ในขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. ไม่ใช่เรื่องยาก แต่หากว่าอุปกรณ์เป็นสารกึ่งตัวนำ ความร้อนที่เกิดขึ้นมีมาก ขนาดที่ระบายออกจากปริมาตรขนาดนี้ไม่ทัน ความร้อนจะสูงขึ้นและคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ถ้าเปลี่ยนอุปกรณ์ภายในคอมพิวเตอร์ให้เป็นสารตัวนำยวดยิ่งทั้งหมด ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีน้อยมาก คอมพิวเตอร์ยังคงทำงานต่อไปได้ ในอนาคตอาจจะได้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋วในบ้านที่มีพลังงานความสามารถสูงกว่าคอมพิวเตอร์ใด ๆ ในปัจจุบันเป็นพันเท่า

2.10 การตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

2.10.1 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ในปี ค.ศ. 1895 เรินต์เกน (Wilhem Conrad Rontgen) เป็นผู้ค้นพบรังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่างรังสีแกมมาและรังสีอุลตราไวโอเล็ต ดังรูปที่ 2.24



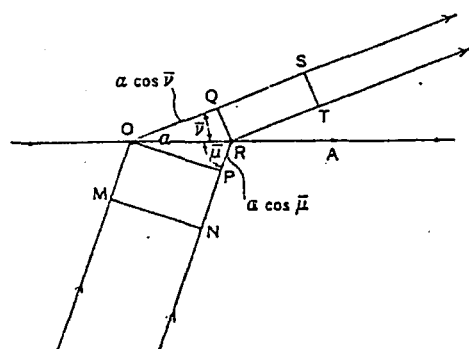
รูปที่ 2.24 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

รังสีเอ็กซ์เกิดจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงวิ่งชนอิเล็กตรอนที่อยู่ข้างใน (inner shell) โกลัสนิวเคลียสของอะตอม โกลัสนิวเคลียสของอะตอมที่ใช้ทำเป็นเป้าให้หลุดออกจากอะตอมทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกออกมา (outer shell) จะตกลงไปแทนที่แล้วปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา เนื่องจากอิเล็กตรอนในแต่ละวงของอะตอมแต่ละชนิด จะมีระดับพลังงานเฉพาะค่าที่แน่นอน รังสีเอ็กซ์ที่ได้จึงเป็นรังสีเอ็กซ์เฉพาะ (Characteristic x-ray) แต่ในบางครั้งอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงบางครั้งอาจไม่ได้วิ่งชนอิเล็กตรอนในวงต่าง ๆ เลย แต่จะวิ่งผ่านสนามไฟฟ้าที่อยู่โกลัสนิวเคลียสของอะตอมทำให้ความเร็วลดลงไปเรื่อย ๆ ทำให้อิเล็กตรอนความเร็วสูง เกิดการสูญเสียพลังงานจำนวน ΔE ไป พลังงาน ΔE จำนวนนี้ถูกปล่อยออกมาในรูปโฟตอนรังสีเอ็กซ์ (x-ray photon) ซึ่งมีความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องกันหลายค่าและสอดคล้องกับพลังงานที่ค่อย ๆ ลดลงในช่วง ΔE เรียกว่า รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray)

หมายเหตุ รังสีเอ็กซ์ที่มีความเหมาะสมในการศึกษาโครงสร้างทางผลึกควรมีค่าความยาวคลื่นในช่วง 0.5-3.0 อังสตรอม (Å)

เงื่อนไขของลาวี (Laue's condition)

เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผลึกจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของผลึกขึ้นดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงเงื่อนไขของลาวีใน 1 มิติ

โดยรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบำมุมกับ a เป็นมุม μ และรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนทำมุมกับ a เป็นมุม ν , S_0 และ S เป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดหนึ่งหน่วยของรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบและรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนตามลำดับ MN เป็นหน้าคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบ (MN มีเฟสเดียวกัน) เมื่อเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่ง OP หน้าคลื่นจะตกกระทบบตำแหน่งที่ O ก่อนแล้วเกิดกระเจิงรังสีเอ็กซ์ขึ้น แล้วเคลื่อนที่มาที่มาตกกระทบบที่ P จึงค่อยเริ่มตกกระทบบที่ R จึงเกิดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ที่ R ในขณะที่จุด Q หนึ่งบนหน้าคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงจากอะตอม O ก่อนหน้านั้นเคลื่อนที่ไปถึงจุด Q แล้ว หน้าคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงจากอะตอม O และ R จะเชื่อมรวมกันเป็นหน้าคลื่น QR ซึ่งอยู่ในแนวทิศ S (QR อยู่ในเฟสเดียวกัน) นั่นคือความแตกต่างของทางเดินของหน้าคลื่นในแนว QR และแนว PR จะต้องเป็น h เท่าของความยาวคลื่น (λ) ของรังสีเอ็กซ์

$$OQ - PR = h\lambda$$

$$a \cdot \cos \nu - a \cdot \cos \mu = h\lambda$$

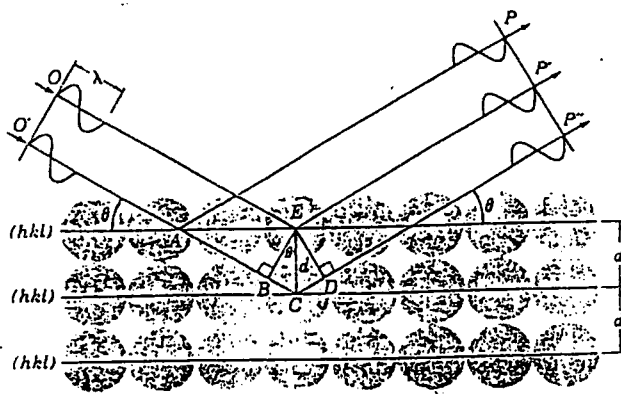
$$a \cdot (\cos \nu - \cos \mu) = h\lambda$$

$$a \cdot (S - S_0) = h\lambda$$

โดย $h = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ เป็นอันดับการเลี้ยวเบน ส่วนการเลี้ยวเบนในสามมิติก็จะเป็นในลักษณะเดียวกัน

กฎของแบรกก์ (Bragg law)

แบรกก์ (Bragg) อธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยการกำหนดระนาบชุดหนึ่งขึ้นมาและระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d รังสีเอ็กซ์ตกกระทบบระนาบที่จุด B และ C ทำมุมตกกระทบบระนาบผลึกเป็นมุม θ แล้วสะท้อนออกจากระนาบผลึก โดยทำมุมกับระนาบผลึกเป็นมุม θ เท่าเดิม มุม θ นี้เรียกว่า " มุมของแบรกก์ "



รูปที่ 2.26 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

จากรูปที่ 2.26 BE เป็นหน้าคลื่นรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบและมีรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนจาก E และ C ทำให้เกิดหน้าคลื่น ED ของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อน โดยรังสีเอ็กซ์ทั้งสองจะต้องมีความแตกต่างของทางเดินเป็นจำนวน n เท่าของความยาวคลื่น λ ของรังสีเอ็กซ์ นั่นคือ

$$BC + CD = n\lambda$$

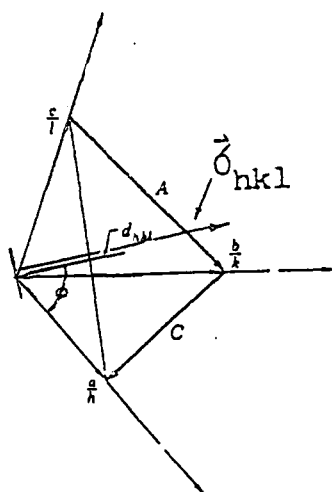
$$2d\sin\theta = n\lambda$$

เมื่อ $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ เป็นเลขที่บอกอันดับการสะท้อน

แลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice)

จากการที่ทราบว่าจะตอมต่าง ๆ ในผลึกมีการจัดเรียงตัวซ้ำกันเป็นคาบใน 3 มิติ ดังนั้นไม่ว่ารูปร่างของอะตอมในผลึกต่างชนิดกันจะเป็นเช่นไร ตราบใดที่เป็นลักษณะผลึกจะต้องมีการจัดเรียงตัวซ้ำกันเป็นคาบเสมอ ถ้าใช้จุดแทนตำแหน่งที่อยู่ของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมต่าง ๆ ที่เหมือนกันในผลึก จุดเหล่านี้จะแสดงลักษณะของการเรียงซ้ำกันเป็นคาบเหมือนเดิม ในทางปฏิบัติจึงใช้จุดแทนตำแหน่งที่อยู่ของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอม ที่มีการจัดเรียงตัวซ้ำกันเป็นคาบ และเรียกจุดเหล่านี้ว่า จุดแลตทิซ (Lattice point)

แต่มีแลตทิซอีกแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า "แลตทิซส่วนกลับ" ซึ่งได้จากการพิจารณาว่า ถ้าเลือกจุดแลตทิซจุดใดจุดหนึ่งในแลตทิซปริภูมิเป็นจุดกำเนิด (origin point) แล้วลากเส้นตรงไปตั้งฉากกับระนาบ hkl ของผลึก โดยให้ความยาวของเส้นตั้งฉากเป็น d_{hkl} ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงจุดส่วนกลับที่ใช้แทนระนาบ hkl ใดๆ

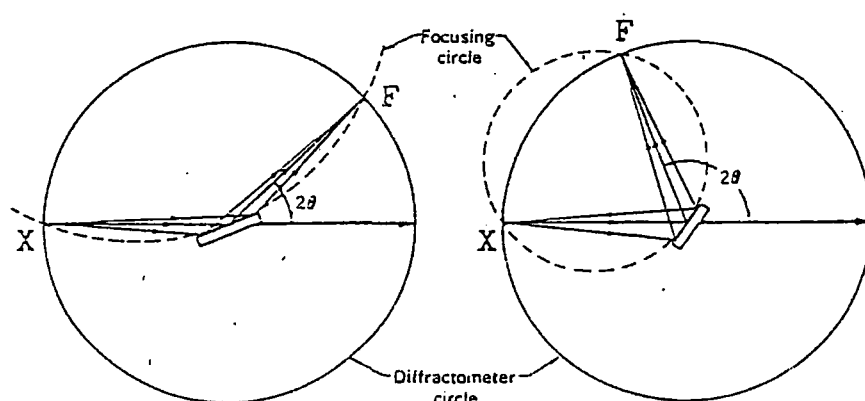
ดังนั้นจะแทนระนาบ hkl ด้วยจุดๆ หนึ่งซึ่งอยู่ที่ปลายเวกเตอร์ที่ลากตั้งฉากกับระนาบ hkl แต่อยู่ห่างจากจุดกำเนิดเป็นระยะ σ_{hkl} โดยที่

$$\sigma_{hkl} = 1/d_{hkl}$$

2.10.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผงในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

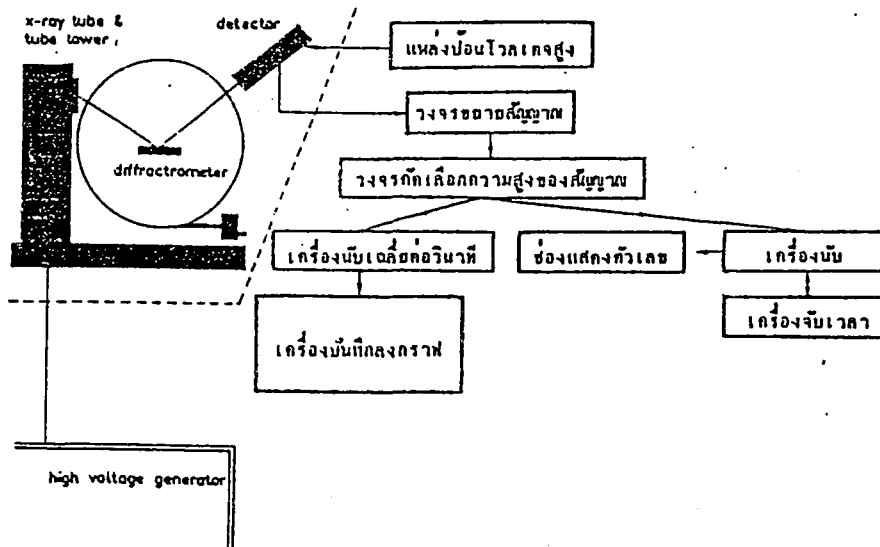
ลักษณะและหลักการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการทำงานที่ว่า ให้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิด (x-ray source) X ตกกระทบผลึกผงสารตัวอย่างตัวอย่างเป็นมุม θ ทำให้รังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนไปทำมุม 2θ กับแนวของรังสีที่ตกกระทบและไปรวมกันที่จุดๆหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าจุดโฟกัส (focus) F โดยที่ X และ F อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ทั้งนี้จุดกำเนิดรังสีเอ็กซ์และผลึกผงสารตัวอย่างกับจุดโฟกัส จะต้องอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมโฟกัส (focusing circle)



รูปที่ 2.28 แสดงหลักการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

ในขณะที่ผลึกผงของสารตัวอย่างอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมและดิฟแฟรคโตมิเตอร์หมุนไป ทำให้มุมตกกระทบ θ เปลี่ยนไปนั้น แนวของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนจะเปลี่ยนไปด้วย เนื่องจากสารตัวอย่างเป็นแผ่นราบจึงทำให้จุดโฟกัสเคลื่อนไปเล็กน้อย แต่ทั้งนี้ก็ยังคงถือว่าอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมโฟกัสอยู่ ส่วนความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนจะทำการวัดโดยตัวตรวจวัด (detector) ซึ่งทำหน้าที่แปลงโฟตอนของรังสีเอ็กซ์เป็นสัญญาณ โวลเตจผ่านวงจรขยายสัญญาณ วงจรคัดเลือกความสูงของสัญญาณแล้วเข้าเครื่องนับ (scaler) และเครื่องจับเวลา (timer) แสดงเป็นตัวเลขให้เห็น



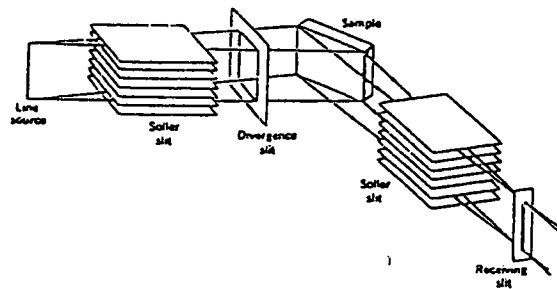
รูปที่ 2.29 แสดงการทำงานของเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์

นอกจากนี้สัญญาณที่ออกจากวงจรคัดเลือกความถี่สูงของสัญญาณ อาจจะถูกเลือกให้ผ่านเข้าเครื่องนับเฉลี่ยต่อวินาที (rate meter) แล้วไปยังเครื่องบันทึกผลกราฟ (recorder)

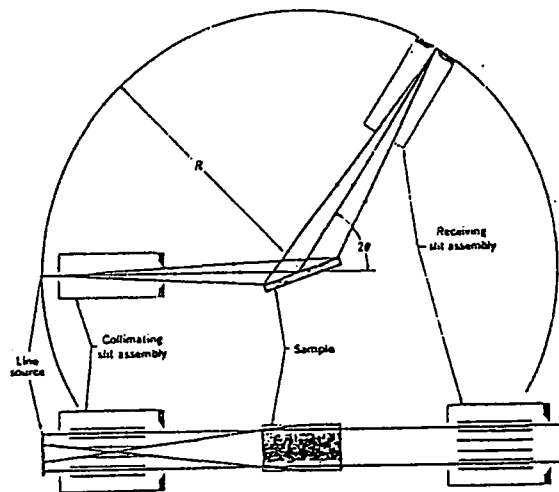
ลักษณะการทำงานของเครื่อง

1. ทำงานในลักษณะตำแหน่งของตัวตรวจวัดอยู่ที่จุดโฟกัส
2. แผ่นผลึกของสารตัวอย่างอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมของดิฟแฟรกโตมิเตอร์ แล้วหมุนไปจากเดิมเป็นมุม θ ทำให้ตัวตรวจวัดหมุนไปจากตำแหน่งเดิมตามแนวเส้นรอบวงของวงกลมเป็นดิฟแฟรกโตมิเตอร์เป็นมุม 2θ อย่างสัมพันธ์กันพอดี

เครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการที่ 2 จะต้องมีอุปกรณ์ต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์



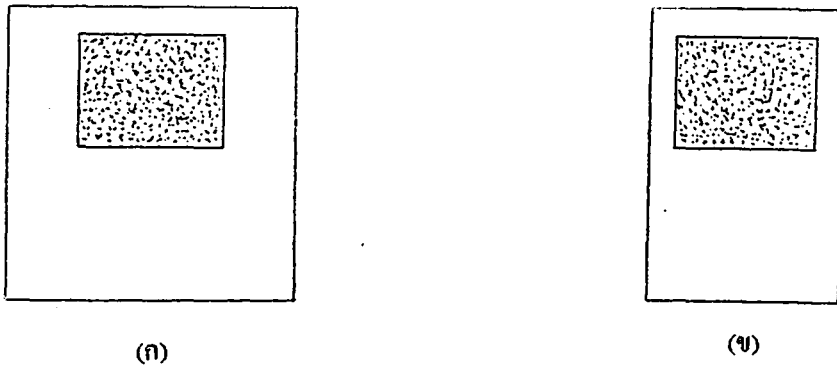
รูปที่ 2.31 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

จากรูปทั้ง 2 การทำงานจะเริ่มจากแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเส้น (line source) กำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่มีแนวลู่ออก ผ่านช่องโซลเลอร์ (soller slit) และช่องลู่ออก (divergence slit) แล้วไปตกกระทบบนแผ่นผลึกสารตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนผ่านช่องโซลเลอร์อีกชุดหนึ่ง โดยมีแนวรังสีลู่ออก (converge) แล้วผ่านเข้าไปยังช่องรับ (receiving slit) เข้าไปยังตัวตรวจวัดช่องลู่ออก ทำหน้าที่ป้องกันมิให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนอุปกรณ์อื่น ๆ ของเครื่อง นอกจากสารตัวอย่างเท่านั้น ทั้งช่องโซลเลอร์และช่องลู่ออกซึ่งปกติจะทำอยู่ในชุดเดียวกันรวมเรียกว่า ชุดช่องทำงาน (Collimating slit assembly) ส่วนช่องโซลเลอร์และช่องตัวรับก็จะทำรวมอยู่ในชุดเดียวกัน เรียกว่า Receiving slit assembly

2.10.3 การหาค่าคงที่แอดทิกซ์จากข้อมูลรูปกราฟที่ได้จากเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์

จากข้อมูลที่ได้จากกราฟคือเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์คือมุม 2θ ของเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทำให้สามารถหาค่า $\sin^2 \theta$ ของแต่ละระนาบ (hkl) ที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ออกมา

การเตรียมสารเพื่อถ่ายภาพในเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ เตรียมได้ 2 แบบ



รูปที่ 2.32 ก. ที่บรรจุสารตัวอย่างในเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์
ข. แผ่นสไลด์ที่ใช้ในการเตรียมสารในการทดลอง

ก. เตรียมสารในแผ่นโลหะที่ทำด้วยอลูมิเนียมและเจาะเป็นช่องไว้สำหรับใส่สาร โดยนำสารตัวอย่างมาบดให้ละเอียด แล้วนำผลึกผงไปอัดลงในช่องสี่เหลี่ยมให้แน่นและเรียบเสมอแผ่นโลหะ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ ทำได้ง่ายและรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือทำให้เปลืองสารตัวอย่าง

ข. ทำบนแผ่นสไลด์ โดยการนำผลึกผงของสารตัวอย่างมาวางลงบนแผ่นสไลด์ แล้วทำการเกลี่ยให้ผลึกผงกระจายอย่างสม่ำเสมอ ให้มีพื้นที่เท่ากับช่องสี่เหลี่ยมของเครื่องบรรจุสารในข้อที่ 1 วิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่เปลืองสารตัวอย่าง แต่มีข้อเสียคือ ขั้นตอนการเตรียมยุ่งยาก

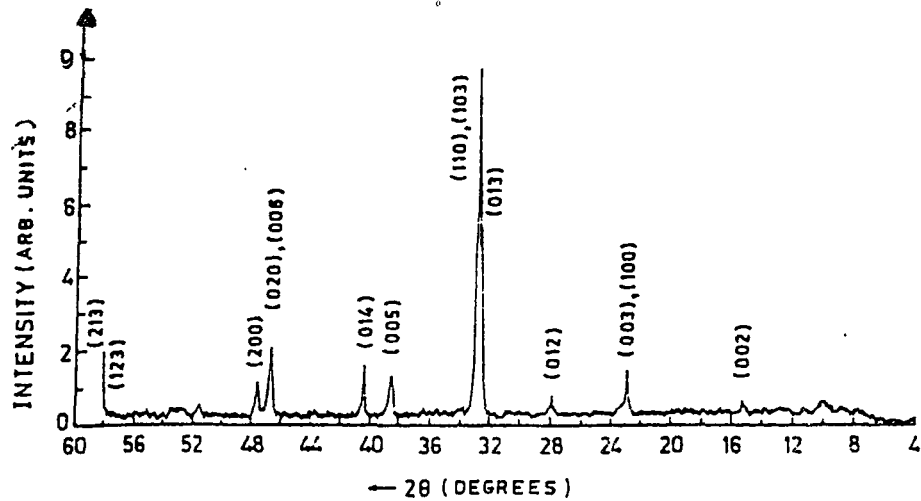
2.10.4 การตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์

การศึกษาโครงสร้างของผลึกของสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$ โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งเพื่อใช้ตรวจสอบสารที่เตรียมได้ว่าเป็นสารตัวนำยวดยิ่งหรือไม่ นอกเหนือจากที่ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการนำยวดยิ่งโดยอาศัยปรากฏการณ์ไมสเนอร์แล้ว และมีรูปร่างของผลึกเป็นแบบใด แต่เนื่องจากในการทำโครงงานครั้งนี้ ได้ใช้เวลาส่วนใหญ่ไปในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง ทำให้ไม่มีเวลาพอที่จะเอื้ออำนวยในการศึกษาโครงสร้างโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จึงไม่ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ของผลึกของสารตัวอย่าง เพียงแต่กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการหาโครงสร้างผลึกโดยคร่าว ๆ เท่านั้น ส่วนรายละเอียดและการทดลองจริง ๆ คงต้องให้ผู้สนใจทางด้านนี้มาทำการศึกษาในรายละเอียดต่อไป ซึ่งนับว่าเป็นเรื่องที่น่าสนใจมาก

เนื่องจากผลึกของสารต่าง ๆ จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือไอออนของผลึกอย่างเป็นระเบียบ และระยะห่างระหว่างอะตอมหรือไอออนในแต่ละมิติ (Dimension) จะมีค่าเท่ากันในมิตินั้น ๆ ถ้าพิจารณาใน 3 มิติ อะตอมหรือไอออนจะมีการจัดเรียงตัวกลายเป็นแลตทิซปริภูมิ ดังนั้นจึงสามารถจำแนกระบบผลึก โดยพิจารณาจากหนึ่งหน่วยเซลล์ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยตัวแปร 6 ตัว คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมในแต่ละมิติได้แก่ a , b และ c และมุมระหว่างแนวของมิติได้แก่ α , β และ γ

โดยอาศัยความแตกต่างของความยาวแกน a , b , และ c และมุมระหว่างแกน α , β และ γ จึงสามารถแบ่งผลึกออกเป็น 7 แบบ คือ ไตรคลินิก, โมโนคลินิก, ออโรโรมบิก, เตตระโกนอล, รมบโอบีคิริล, เฮกแซกโกนอล และคิวบิก

ดังนั้นจึงใช้เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ในการหาโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างมาทำการเอ็กซ์เรย์ โดยให้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดตกกระทบบนผลึกผงของสารตัวอย่าง และผ่านวงจรถ่าง ๆ ของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ จะได้กราฟซึ่งแสดงพีคของมุม 2θ ซึ่งมุมของการเลี้ยวเบน ซึ่งก็คือมุม θ นั่นเอง



รูปที่ 2.33 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$,
ซึ่งเป็นผลจากการทดลองของ P. Rajasekar, P. Barat, N. Ray, S. D. Day
S. K. Bandyopadhyay, P. Barat และ Udayan De

เมื่อทราบมุม θ จากกราฟ สามารถหาค่า d ได้จากกฎของแบรกก์ คือ

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

จะได้ค่า d ซึ่งเป็นค่า d_{hkl} เพื่อนำไปหาค่า $Q = 1/(d_{hkl})^2$ และจากค่า Q นี้ สามารถนำไปหาค่าพารามิเตอร์ได้จากการคำนวณ ซึ่งต้องศึกษาต่อไป

บทที่ 3

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

การเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งจะต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

- 3.1.1 ครกบดสาร (Mortar and pestal)
- 3.1.2 เครื่องอัดเม็ดสาร (Die)
- 3.1.3 เครื่องอัดไฮดรอลิกส์
- 3.1.4 วัสดุรองสารเพื่อทำการเผา (Boat)
- 3.1.5 ช้อนตักสาร (Spatular)
- 3.1.6 เครื่องชั่งสาร
- 3.1.7 เครื่องแกว่งสาร

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาสารตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

- 3.2.1 เตาเผาสาร (Furnace)
- 3.2.2 เครื่องควบคุมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control)
- 3.2.3 โซลิดสเตทรีเลย์ (Solid State Relay)
- 3.2.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)
- 3.2.5 ท่อแก้วควอทซ์ (Quartz)
- 3.2.6 ก๊าซออกซิเจน
- 3.2.7 เครื่องควบคุมอัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (Flowmeter)

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์

- 3.3.1 ไนโตรเจนเหลวและถังบรรจุไนโตรเจนเหลว
- 3.3.2 แม่เหล็ก

3.1 อุปกรณ์ในการเตรียมสารตัวอย่าง

3.1.1 ครกบดสาร

ใช้ในการบดสารตัวอย่างให้ละเอียดและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ครกที่ใช้ในการทำโครงการครั้งนี้ ทำจากหินซึ่งเป็นหินที่มีเนื้อละเอียดมาก ทำให้สารเคมีที่ถูกบดไม่ติดอยู่ในเนื้อครก จึงไม่มีการสูญเสียสารเคมี

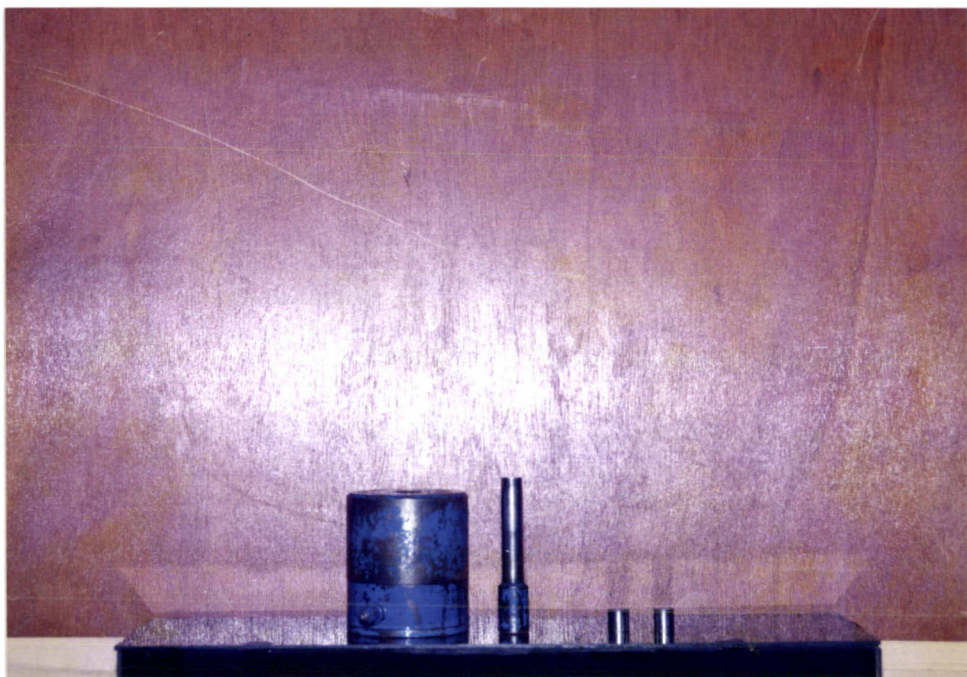


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของครกที่ใช้ในการบดสาร

3.1.2 เครื่องอัดเม็ดสาร

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดเม็ดผงสารที่เตรียมได้ ซึ่งจะต้องมีความแข็งแรง และสามารถทนแรงอัดได้มาก สาเหตุที่ต้องใช้แรงอัดมาก ๆ ก็เพื่อต้องการใช้โมเลกุลของสารอยู่ชิดกัน เพื่อให้ปฏิกิริยาในการเผาสารเป็นไปอย่างสมบูรณ์

ในการอัด จะใช้หลักการอัดโดยตรงผ่านแกนอัด โดยจะมีฐานรองรับการอัด และมีระบบทำสูญญากาศ ลักษณะเป็นท่อต่อจากแกนกลางเพื่อเข้าสู่ปั๊มสูญญากาศ ชั้นส่วนทุกส่วนจะต้องผ่านการชุบแข็ง เพื่อให้สามารถรับแรงอัดได้มากโดยไม่เกิดการขยายตัวของลูกป็น



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของเครื่องอัดเม็ดสาร

ส่วนประกอบที่สำคัญ

1 ครอบอกอัด

ครอบอกอัดเป็นส่วนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ตรงกลางมีรูเพื่อใช้อัดสาร ผงด้านในของรูจะต้องมีความแข็งและความเรียบมาก เพื่อให้สามารถทนแรงอัดได้มาก และได้เม็ดสารที่มีผิวเรียบ ตรงส่วนล่างจะมีร่อง โอ-ริง (O-ring) เพื่อสวมใส่กับชิ้นส่วนต่อไป

2 ครอบอกสวม

ครอบอกสวมเป็นส่วนที่สวมใส่เข้ากับด้านล่างของครอบอกอัด มีลักษณะเป็นทรงครอบอกกลวง ด้านในมีร่อง โอ-ริง ตรงส่วนกลางจะต่อท่อเพื่อต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ ในขณะที่ทำการอัด ลดการเกิดฟองอากาศในเนื้อสาร ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างครอบอกอัดกับส่วนฐานเป็นส่วนที่รับแรงอัดน้อยกว่าส่วนอื่น ๆ

3 ฐาน

ฐานเป็นส่วนล่างสุดที่มีโอ-ริง เพื่อต่อเข้ากับครอบอกสวม มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม 2 ชั้น เป็นส่วนที่รับแรง โดยตรงส่วนฐานเป็นส่วนที่รับแรงอัดน้อยกว่าส่วนอื่น ๆ

4 แกนอัด

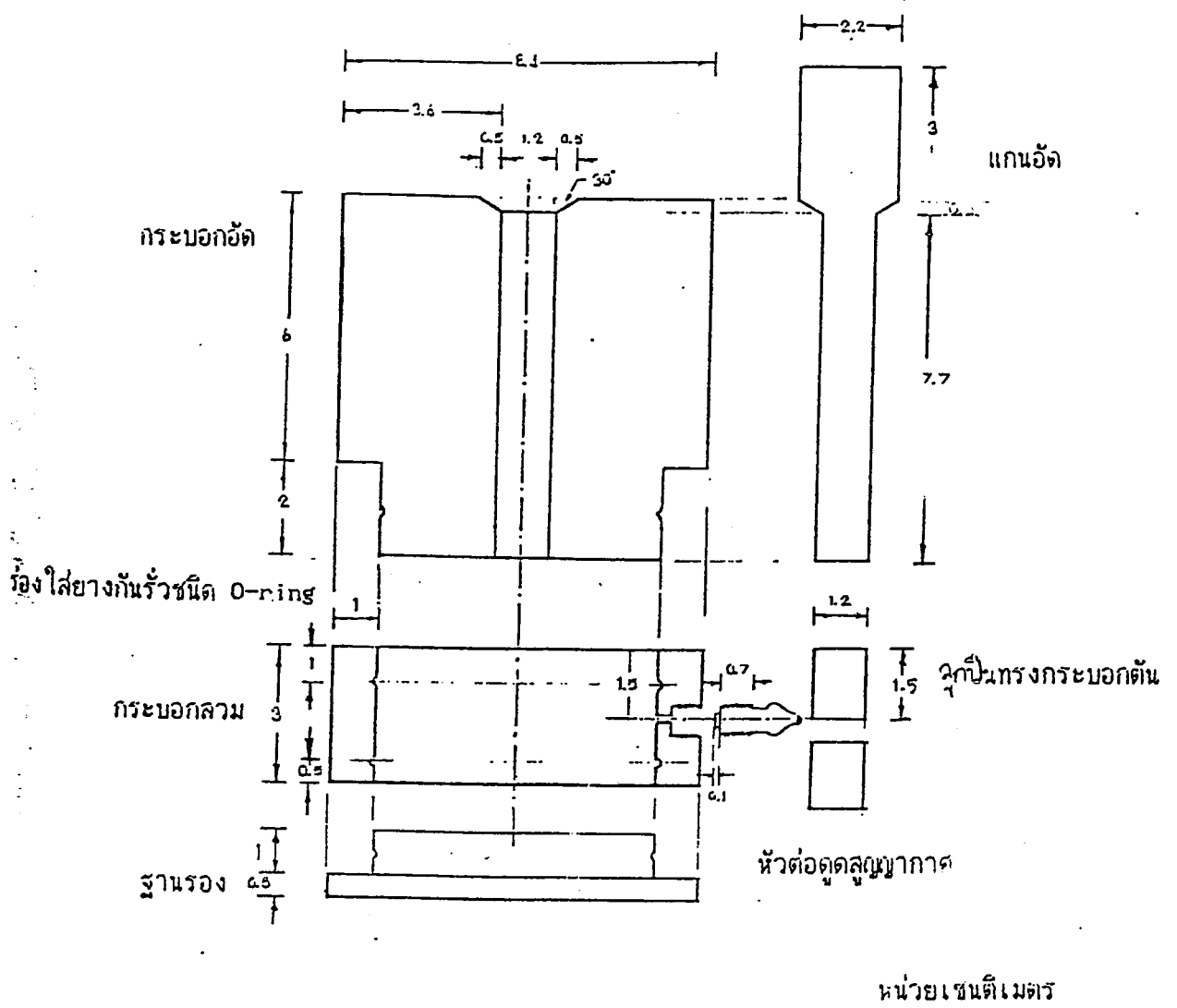
แกนอัดมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ส่วนบนจะมีขนาดใหญ่กว่าส่วนล่างเพื่อรับแรงอัด ส่วนล่างจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของครอบอกอัด แต่ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าเล็กน้อย เพื่อความสะดวกในการใส่แท่งแกนเข้าไปยังครอบอกอัด

5 ลูกป็นทรงกระบอกตัน

ลูกป็นนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเล็ก ๆ 2 อัน ใช้เป็นส่วนอัดที่สัมผัสกับสาร ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพอดีกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรูครอบอกอัด และผิวหน้าของลูกป็นส่วนที่สัมผัสกับสารควรมีลักษณะเรียบ เพื่อให้ได้เป็นเม็ดสารที่ดีตามต้องการ

6 หัวต่อดูดสุญญากาศ

เป็นส่วนที่ใช้ต่อระบบสุญญากาศ เพื่อให้ทำให้ภายในครอบอกเป็นสุญญากาศในขณะที่ใช้งาน ลดการเกิดฟองอากาศภายในเม็ดสารที่อัด

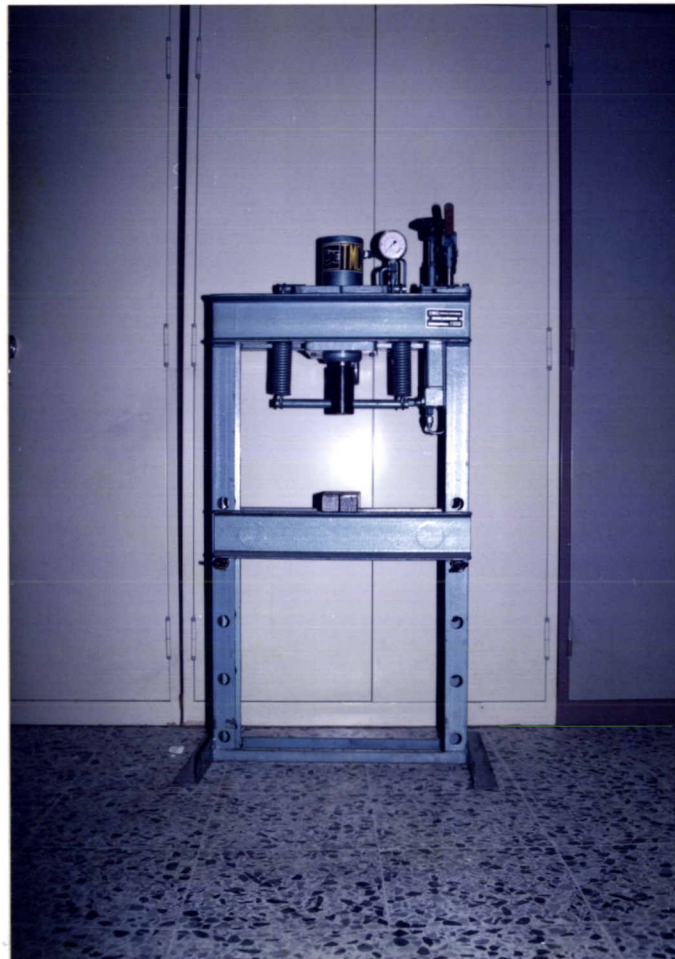


รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอัดเม็ดสาร

3.1.3 เครื่องอัดไฮดรอลิกส์

ต้นกำเนิดของเหลวของระบบไฮดรอลิกส์

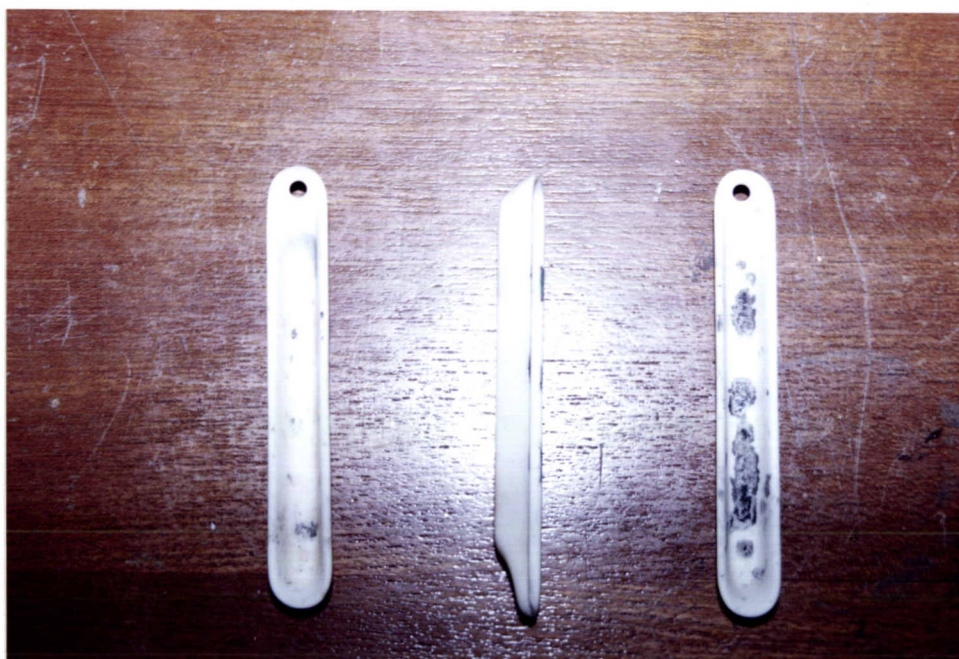
ระบบไฮดรอลิกส์ เป็นระบบที่ทำงานได้โดยใช้ของเหลวเป็นสื่อกลางการถ่ายเทกำลัง ทิศทางและความเร็ว วงจรไฮดรอลิกส์ที่ใช้งานแต่ละประเภทจะมีลักษณะของวงจรไม่เหมือนกัน ขึ้นกับว่าจะนำไปใช้งานอะไรหรืออย่างไร แต่ไม่ว่าวงจรจะเป็นอย่างไรก็ตาม ทุก ๆ วงจรที่ใช้ก็สามารถแยกลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ออกเป็น ส่วน ๆ ได้อย่างชัดเจน และใช้ประโยชน์ในการอัดเม็ดสาร



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่ใช้ในการอัดเม็ดสาร

3.1.4 วัสดุรองสารเพื่อทำการเผา

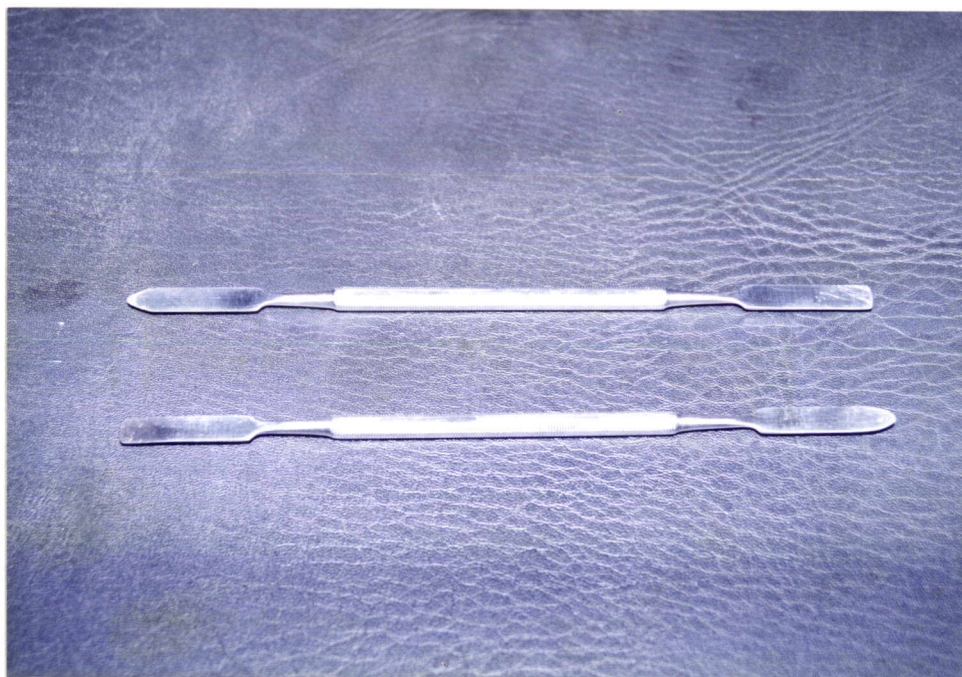
เป็นส่วนที่สัมผัสกับสารในขณะที่ทำการเผา เพราะฉะนั้นจะต้องเลือกวัสดุรองสารชนิดเนื้อแน่น, ไม่ระเหยง่าย ทนอุณหภูมิได้สูง ๆ ซึ่งปกติจะทำจาก แก้วควอทซ์ อลูมินา หรือเซรามิกส์ อุปกรณ์ส่วนนี้ควรมีไว้เฉพาะของแต่ละสาร เพื่อป้องกันการเจือปนอันเกิดจากสารตกค้าง ในขณะที่นำสารเข้าและออกจากเตา ควรระวังเรื่องการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของโบทเพราะอาจทำให้เกิดการแตกหักได้



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของวัสดุรองสารที่ใช้ในการเผาสาร

3.1.5 ซ้อนดักสาร

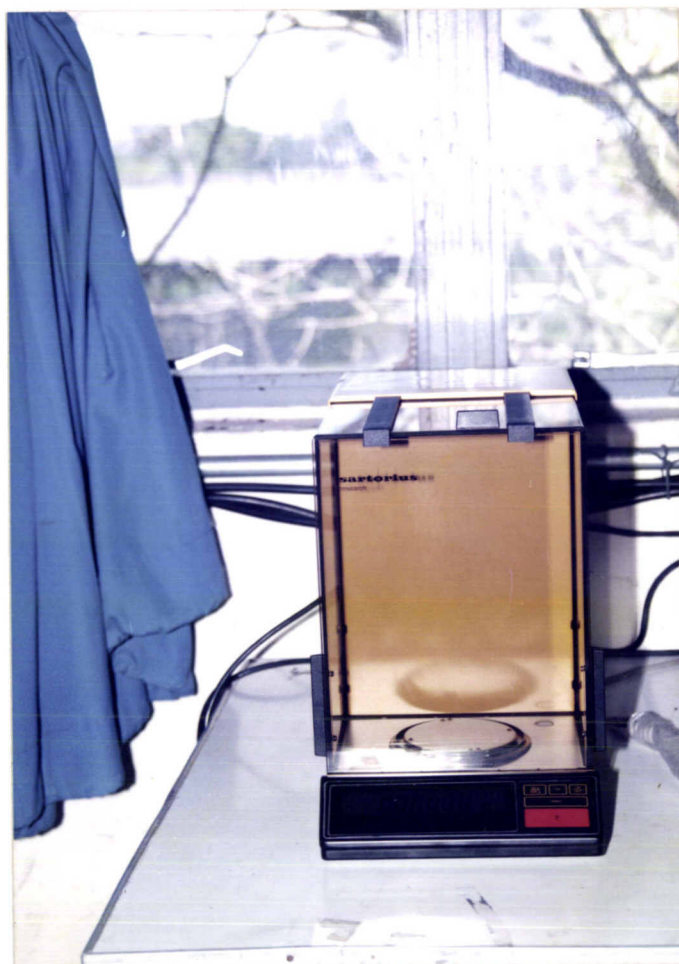
ใช้ในการดักสารเคมี มีลักษณะเป็นแท่งโลหะ ปลายข้างหนึ่งมีลักษณะแบนราบเป็นเหลี่ยม ส่วนอีกปลายข้างหนึ่งมีลักษณะแบนแหลม ในการใช้งานแต่ละครั้ง ควรทำความสะอาดก่อนทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารเคมีในการใช้ครั้งต่อไป



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของซ้อนดักสาร

3.1.6 เครื่องชั่งสาร

เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการชั่งสารเคมี เพื่อให้ได้อัตราส่วนของสารองค์ประกอบในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยเครื่องชั่งสารที่ใช้นี้เป็นระบบสูญญากาศ แบบคิจิตอล



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของเครื่องชั่งสารระบบคิจิตอล

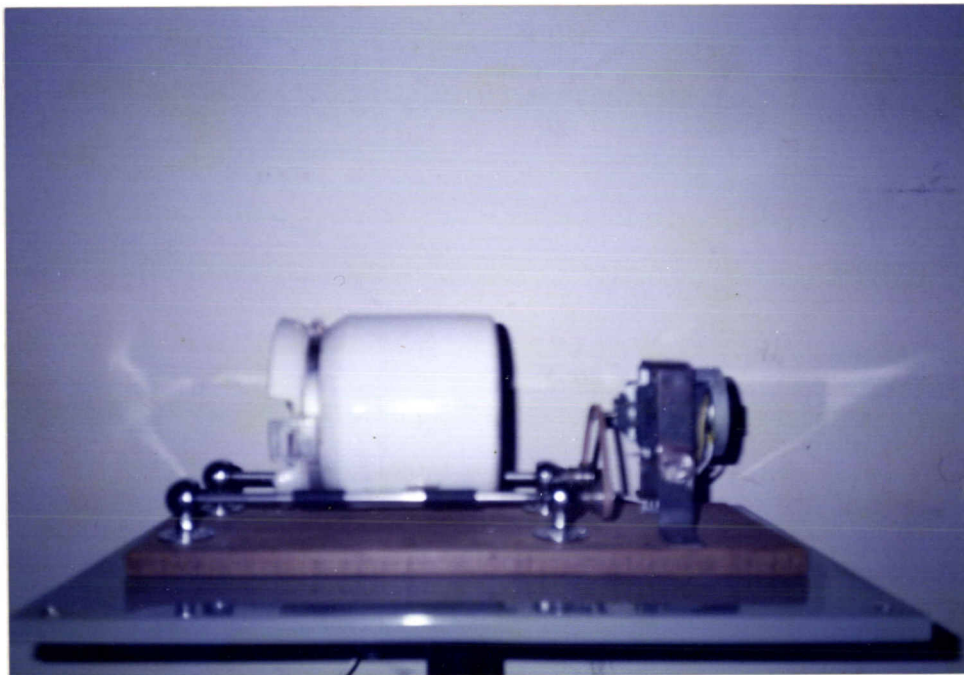
วิธีการใช้เครื่องชั่งสาร

1. ทำการปรับลูกน้ำ เพื่อให้เครื่องชั่งอยู่ในระดับสมดุล
2. กดปุ่ม ON เพื่อทำการเปิดเครื่อง
3. นำที่รองสาร(ซึ่งในการทำโครงการนี้ ใช้กระดาษฟรอยด์) วางบนตราชั่งแล้วปิดหน้าต่าง รอจนกระทั่งตัวเลขแสดงน้ำหนักคงที่และแสดงหน่วย g
4. กด T เพื่อทำการ Reset ให้น้ำหนักเป็น 0.000000 g โดยขณะที่รอนั้นจะปรากฏตัวอักษร BUSY
5. ตักสารเคมีใส่ในที่รองสาร แล้วปิดหน้าต่าง รอจนกระทั่งตัวเลขแสดงน้ำหนักคงที่และแสดงหน่วย g
6. ตักสารเพิ่ม หรือตักสารออก จนได้ค่าน้ำหนักตามที่ต้องการ แล้วทำการปิดหน้าต่างรอจนกระทั่งตัวเลขคงที่
7. นำที่รองสารที่บรรจุสารเคมีออกจากเครื่องชั่ง ปิดหน้าต่าง และกด T รอจนปรากฏ 0.000000 แล้วทำการชั่งสารใหม่ต่อไปได้

3.1.7 เครื่องแกว่งสาร

เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการผสมสารองค์ประกอบที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ก่อนทำการเผาให้เป็นเนื้อเดียวกัน และเข้ากันมากที่สุด โดยใช้เวลาในการแกว่งสาร เป็นอย่างน้อย 6 ชั่วโมง

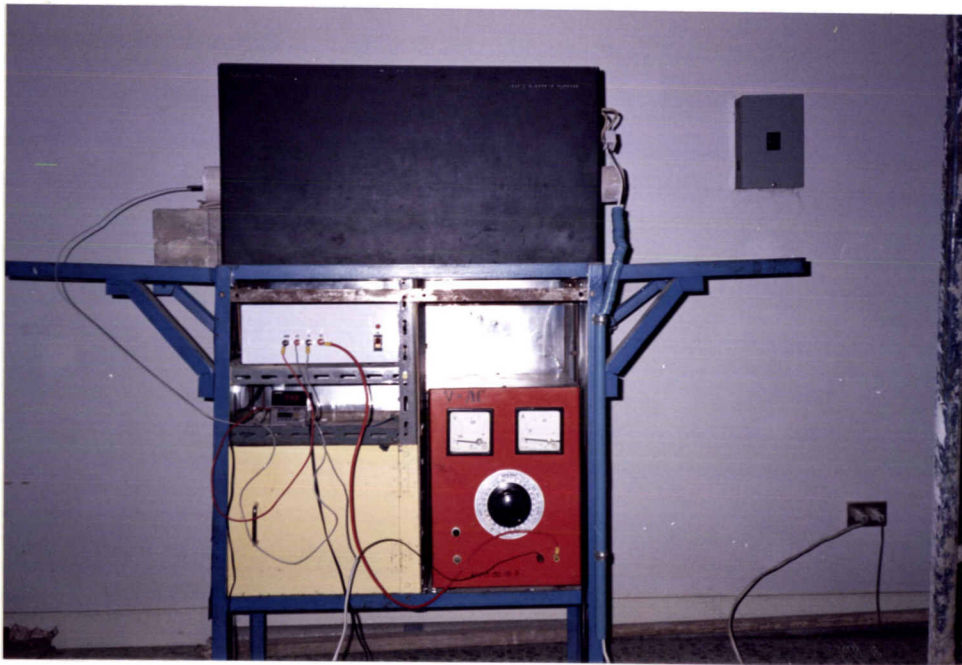
เครื่องแกว่งสารที่ใช้ในการทำโครงงานนี้ประกอบด้วย แกนหมุน 3 แกน โดยที่แกนหนึ่ง นั้นเป็นส่วนที่ยื่นออกมาจากมอเตอร์ โดยอาศัยโอ-ริงช่วยในการหมุน และแกนอีก 2 อันซึ่งเป็น ส่วนของแกนใช้รองรับขวดใส่สาร และใช้สายพานยึดแกนทั้ง 3 ในการหมุน



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของเครื่องแกว่งสาร

3.2 อุปกรณ์ในการเผาสารตัวอย่าง

3.2.1 เตาไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมสาร



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมสาร

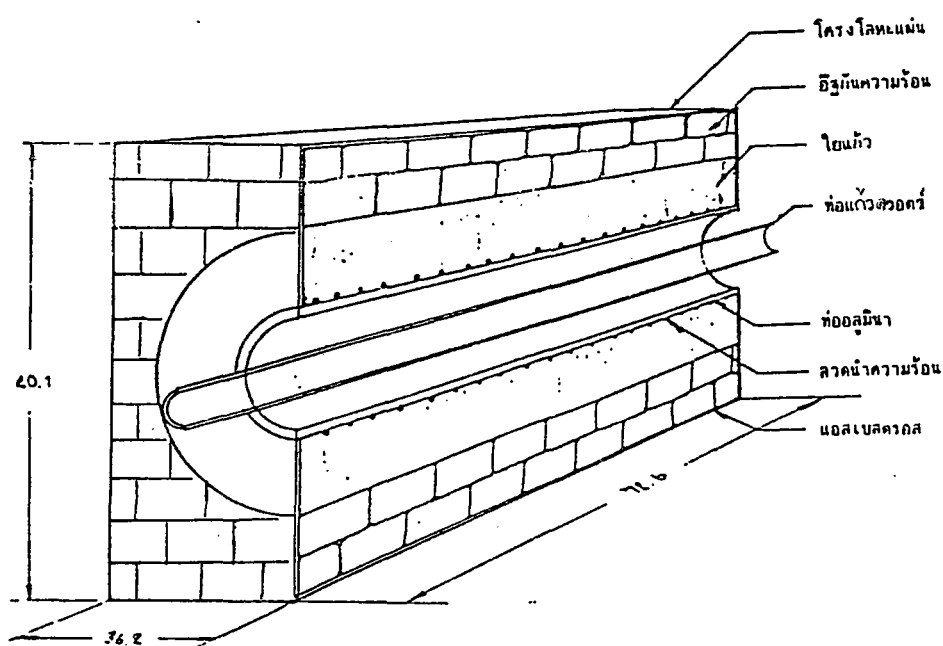
คุณสมบัติของเตาไฟฟ้าชนิดขดลวดเหนี่ยวนำ ควรมีลักษณะดังนี้

1. ควบคุมอุณหภูมิได้แน่นอนและมีความไวสูง รวมทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมิกำง่ายและเป็นไปตามต้องการ
2. อุณหภูมิภายในเตามีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพสูง ตลอดจนสามารถนำไปใช้กับกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี
3. ป้องกันการเจ็บปนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก และไม่มีมลภาวะในขณะที่ทำการทดลองหรือใช้งาน

ส่วนประกอบสำคัญของเตา

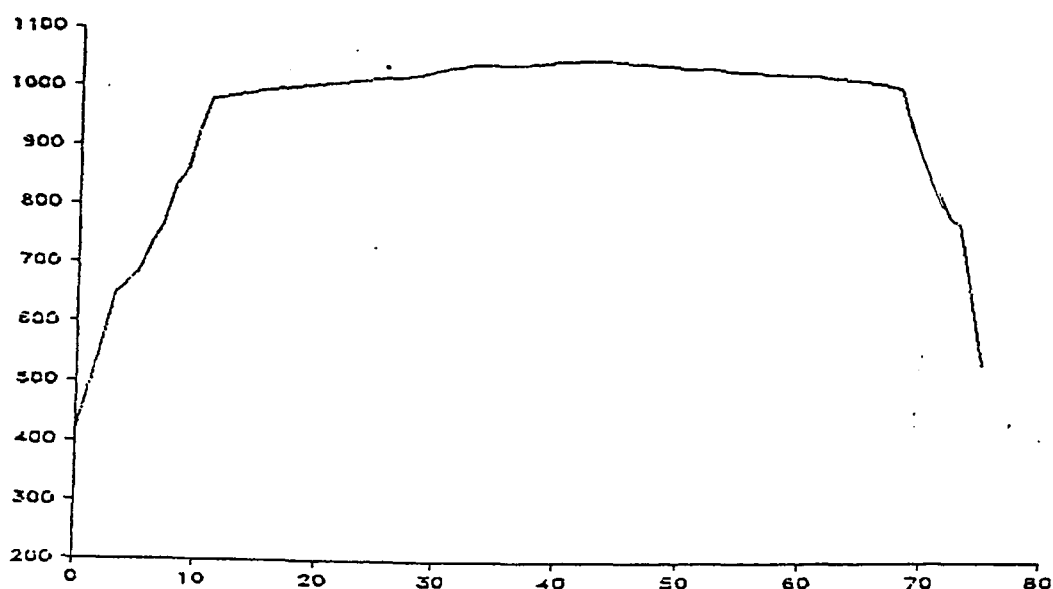
1. อุณหภูมิของเตา

ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$ จะใช้ปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 940°C เพราะฉะนั้น อุณหภูมิของเตาควรมีค่ามากกว่าอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 2 - 10 % เพื่อชดเชยการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นอุณหภูมิของเตาที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 960°C - 1034°C ซึ่งอุณหภูมิของเตาจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) เพื่อรักษา ระดับอุณหภูมิให้คงที่ในขณะที่ใช้งาน



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของเตาไฟฟ้า

นอกจากนี้สิ่งที่จะต้องพิจารณาอย่างหนึ่งที่จะต้องทราบคือ ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเตาทั้งนี้เพื่อจะได้รู้บริเวณที่จะต้องใช้งานก่อนทำการเตรียมสาร เตาที่มีการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาดังแสดงในรูป 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา

2. ขดลวดนำความร้อน

ในการเผาสาร ใช้ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึง 940°C ดังนั้นขดลวดที่จะเลือกใช้จะต้องมีความทนต่ออุณหภูมิได้มากกว่า 940°C ซึ่งในการใช้งานจริง ๆ จะเลือกใช้ขดลวดโลหะประเภท Kanthal Alloy Grade A1 ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิได้สูงถึง 1375°C โดยเลือกชนิดที่เป็นเส้นลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.225 cm . และมีความยาวประมาณ 30m .

3. ผนังของเตา

วัสดุที่จะนำมาใช้ทำเป็นผนังจะต้องคำนึงถึง อุณหภูมิการใช้งาน เพราะปัจจัยเหล่านี้ จะมีผลอย่างมากต่ออายุการใช้งานของเตา ซึ่งโดยทั่วไปจะเลือกวัสดุที่มีอายุการใช้งานนาน ๆ ในกรณีเตาอุณหภูมิสูงนี้ พื้นที่ผิวของท่อที่ใช้พันขดลวดจะต้องมากพอ เพื่อรักษาการกระจายความร้อน สำหรับเตาที่ใช้เลือก Alumina Tube ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.4 cm . เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8.7 cm . เส้นผ่านศูนย์กลางถึงตำแหน่งร่องตัวนำเป็น 8 cm . และมีความยาว 75 cm . โดยมีร่องพันเป็นเกลียวรอบ Alumina Tube เพื่อใช้ใส่ขดลวดความร้อนมีขนาด 0.65 cm .

เมื่ออุณหภูมิสูงมาก ๆ สิ่งหนึ่งที่ต้องเกิดขึ้นคือ การขยายตัวของขดลวดนำความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดที่ลวดสามารถทนได้ จึงเป็นตัวกำหนดขอบเขตของพื้นที่ผิวของขดลวด เมื่อใช้ขดลวดกับเตาอุณหภูมิสูงมาก ๆ ขนาดของขดลวดจะต้องไม่ใหญ่เกินไป หรืออาจกล่าวได้ว่า

ขนาดของขดลวดจะแปรผันกับอุณหภูมิของเตา ซึ่งความสัมพันธ์นี้ไม่สามารถแสดงได้อย่างแจ่มชัดในทุก ๆ กรณี และสามารถกำหนดขนาดของขดลวด โดยใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งก็คือ ที่อุณหภูมิสูง ๆ ความแข็งแรงของขดลวดนำความร้อนจะลดลง

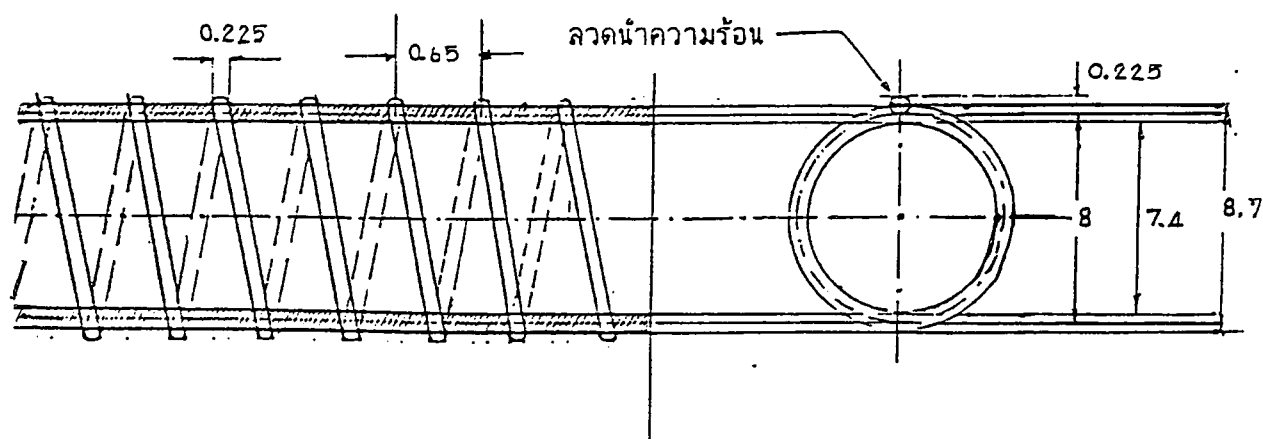
4. รูปแบบของการพันขดลวด

เนื่องจากเตาที่ใช้เป็นแบบอุโมงค์ (Tunnel) ดังนั้นการพันขดลวดจะพันในลักษณะรอบแกน Alumina Tube โดยขดลวดที่ใช้ควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 mm. สำหรับขดลวด Kanthal A1 ที่พันอยู่ในร่องของ Alumina Tube อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ Alumina Tube (D) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (d) จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังนี้

$$\text{อุณหภูมิของขดลวด} < 1000^{\circ}\text{C} ; D/d = 6 - 8$$

$$\text{อุณหภูมิของขดลวด} > 1000^{\circ}\text{C} ; D/d = 5 - 6$$

ระยะระหว่างร่อง (s) ของ Alumina Tube ควรมีค่าน้อยที่สุด 2 หรือ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด ($s > 2d$) ทั้งนี้เพื่อให้การแผ่รังสีความร้อนเข้าไปในเตาเป็นไปได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ในการรักษาให้ขดลวดเกิดความมั่นคงบนผิวของท่ออลูมินาร่องบนท่อเซรามิกส์ควรมีค่าน้อย 1/3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด โดยเตาที่ใช้จะใช้ลวด Kanthal A1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.225 cm. ระยะห่างระหว่างร่อง 0.65 cm. ร่องมีความลึก 0.7 cm. และมีจำนวนรอบของการพัน 115 รอบ ดังแสดงในรูป 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการพันขดลวด

5. ส่วนรองรับที่ทำจากเซรามิกส์

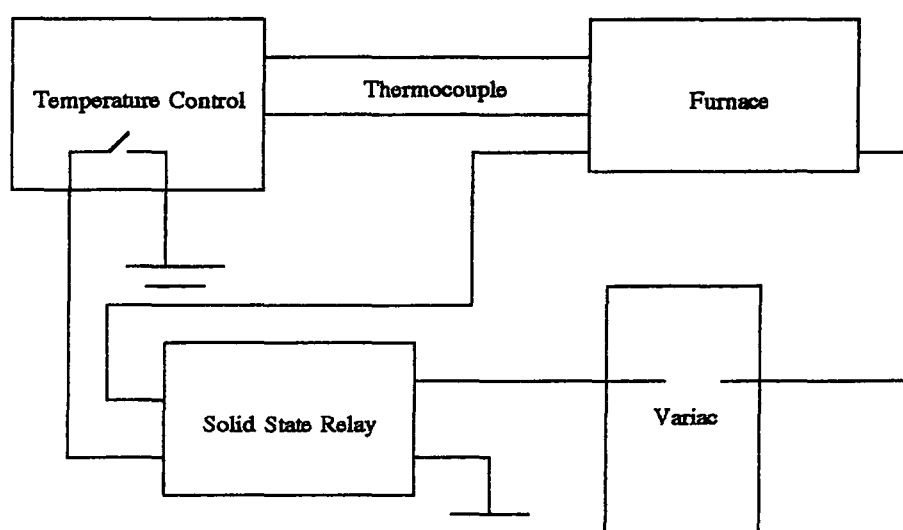
คุณภาพของเซรามิกส์จะมีผลต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิของเตา, สมบัติการทำงาน ตลอดจนอายุการใช้งานของเตา ในการพิจารณากรณี Alumina Tube ความเข้มข้นของ Alumina มากกว่า 40% และส่วนประกอบของเหล็กต่ำกว่า 1% เซรามิกส์ควรมี Alkaline น้อย เพื่อจะมีความเป็นฉนวนสูง สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความเค้นที่เกิดขึ้น สำหรับการจัด และรูปร่างของเซรามิกส์จะขึ้นกับขนาดรูปแบบ และอุณหภูมิของเตา โดยทั่วไปใช้เซรามิกส์ในรูปของอิฐทนไฟ ความเป็นฉนวนของอิฐทนไฟนี้จะช่วยกันการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นให้ออกไปจากตัวเตาน้อยที่สุด

6. กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเตา

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนนั้นจะต้องสามารถให้ความร้อนอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อชดเชยความร้อนบางส่วนที่เกิดการสูญเสียไป สำหรับอุณหภูมิส่วนเกินจุดที่ต้องการ สามารถลดและควบคุมได้โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะมีเทอร์โมคัปเปิลเป็นตัวตรวจสอบ เมื่ออุณหภูมิเกินจุดที่ต้องการ เครื่องควบคุมอุณหภูมิก็นำทำการเปิดวงจรตัดกระแสไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่ต้องการเครื่องควบคุมอุณหภูมิก็นำทำการปิดวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในขดลวด ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถเลือกอุณหภูมิที่ต้องการได้ โดยตั้งที่ตัวเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าของเตาเกือบไม่มีผลต่อการใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเลย เพราะอุณหภูมิของเตาจะถูกตัดโดยอัตโนมัติ ดังนั้นความต้องการพลังงานและประสิทธิภาพของมันจะขึ้นอยู่กับ การสูญเสียความร้อน ซึ่งจะโยงไปถึงประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนที่ใช้ อย่างไรก็ตาม การจ่ายพลังไฟฟ้าให้กับเตา จะต้องคำนึงถึงขนาดของเตาที่ใช้ด้วย เพื่อไม่ให้เกิดการสิ้นเปลืองโดยเปล่าประโยชน์

การควบคุมอุณหภูมิของเตา

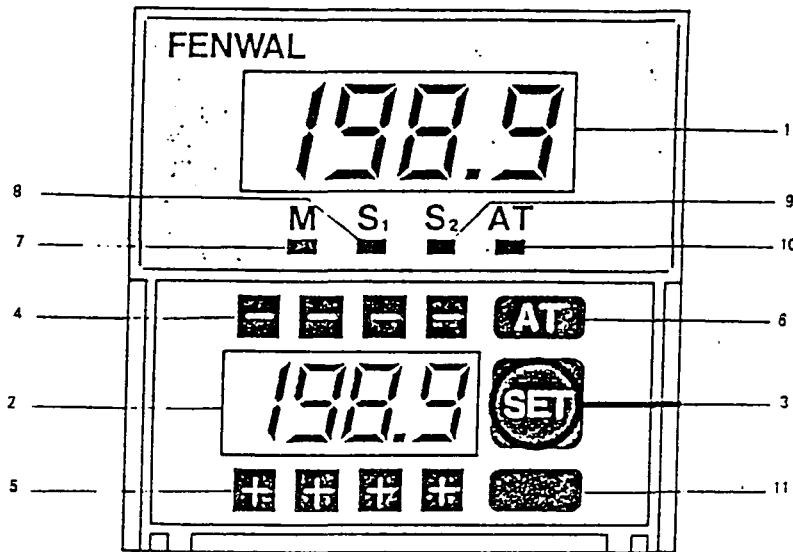
เตาที่ใช้ในการเผาสารนี้ ใช้ขดลวดเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นที่ขดลวดได้มาจากการป้อนไฟกระแสสลับ 0 - 165 Volt จาก Variac และควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดโดยใช้โซลิดสเตทรีเลย์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนสวิตช์คอยเปิด/ปิด คอยตัดกระแสไฟที่ป้อนให้กับขดลวด ซึ่งโซลิดสเตทรีเลย์มาคอยควบคุมการทำงานอีกทีหนึ่ง โดยถ้าอุณหภูมิของเตายังไม่ถึงอุณหภูมิที่เซ็ทไว้ที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ, โซลิดสเตทรีเลย์จะทำงานในสภาวะปกติ คือให้ไฟกระแสสลับผ่านตัวมันไปยังขดลวดได้ ทำให้ขดลวดมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของเตาถึงอุณหภูมิที่เซ็ทไว้ที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ, เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะทำงานในลักษณะ normal close คือไม่จ่ายกระแสให้กับโซลิดสเตทรีเลย์ ทำให้โซลิดสเตทรีเลย์ไม่ทำงาน คือไม่สามารถให้กระแสสลับผ่านตัวมันไปได้ อุณหภูมิของเตาก็จะไม่เพิ่มขึ้นไปจากที่เซ็ทไว้



รูปที่ 3.13 แสดงการต่อวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตา

3.2.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

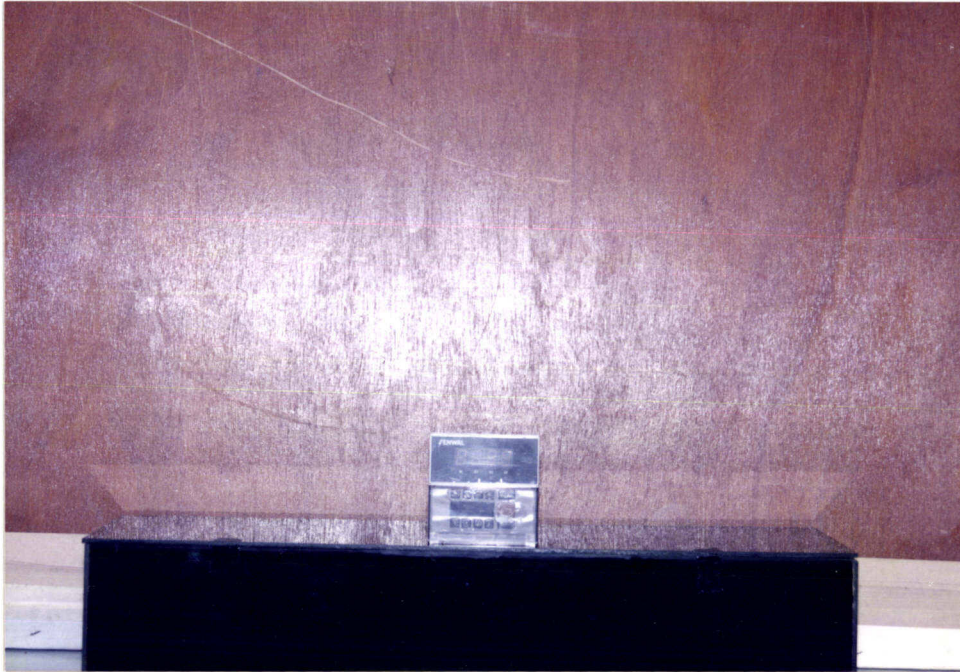
เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ คือ Fenwal รุ่น AR 24L ซึ่งมีลักษณะดังรูป 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงส่วนประกอบของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ FENWAL รุ่น AR 24L

1. ค่าของอุณหภูมิที่ได้จากตัวเซนเซอร์
2. ค่าของอุณหภูมิที่ควบคุม
3. ปุ่มเซ็ท (set)
4. ปุ่มลดค่า
5. ปุ่มเพิ่มค่า
6. ปุ่ม AUTO - TUNING
7. LED แสดงสถานะของเอาท์พุท
8. LED แสดงสถานะของ ALARM 1
9. LED แสดงสถานะของ ALARM 2
10. LED แสดงสถานะของ AUTO - TUNING
11. ปุ่มเปิด/ปิด เครื่อง

การเข้าสู่โปรแกรมของเครื่อง AR-L series



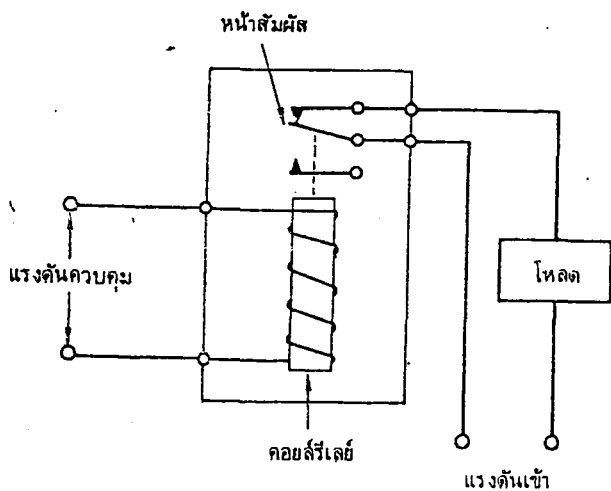
รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

<u>ระดับของโปรแกรม</u>	<u>กดปุ่ม</u>	<u>เวลาที่ต้องกดปุ่มค้าง</u>
LEVEL 1	SET	-
LEVEL 2	1 และ 5	3 วินาที
LEVEL 3	1 และ 8	7 วินาที
LEVEL 4	1 และ 4	10 วินาที
LEVEL 5	5 และ 8	15 วินาที

3.2.3 โซลิตสเตทรีเลย์

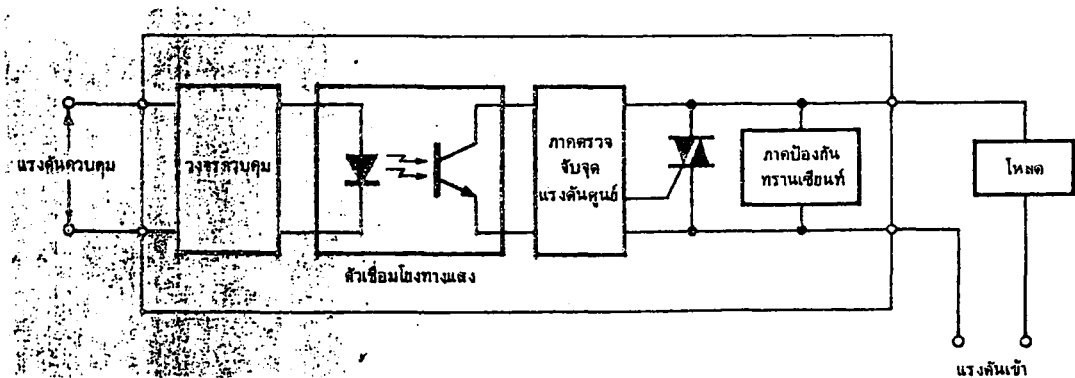
รีเลย์แบบกลไกกับโซลิตสเตทรีเลย์ รีเลย์ทั้ง 2 แบบทำงานโดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าทำให้เกิดการตัดต่อวงจรไฟฟ้า

รีเลย์แบบกลไกประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเกิดอำนาจแม่เหล็ก ไปดึงชุดหน้าสัมผัสที่ติดอยู่กับส่วนเคลื่อนที่เข้ามาต่อวงจร ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้เมื่อต้องการให้หน้าสัมผัสแยกออกจากกัน ก็ทำได้โดยหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไปเข้าคอยล์ของรีเลย์ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดง โครงสร้างของรีเลย์แบบกลไก

ส่วนโซลิตสเตทรีเลย์มีโครงสร้างประกอบด้วยภาคต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.17 ประกอบด้วยภาคควบคุมตัวเชื่อมโยงทางแสง ภาคตรวจรับจุดแรงดันศูนย์ ภาคป้องกันทรานเซียนท์ และไดรแอคแทนหน้าสัมผัส



รูปที่ 3.17 แสดงแผนผังภายในของโซลิตสเตทรีเลย์

ภาคตรวจจับจุดแรงดันศูนย์ (Zero Crossing Detector)

ขณะที่ใช้รีเลย์แบบกลไก เมื่อรีเลย์เริ่มทำงานจึงให้หน้าสัมผัสต่อวงจร ซึ่งอาจจะเป็นช่วงที่แรงดันไฟสลับมีค่าสูงสุด ทำให้กระแสผ่านหน้าสัมผัสสูงกว่าปกติในช่วงแรก เช่น โหลดพวกมอเตอร์ไฟฟ้า หลอดไฟ หรือขดลวดไฟฟ้า (ขณะเย็นมีความต้านทานต่ำ) และทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเข้าไปในสายไฟฟ้า ดังนั้นโซลิตสเทรีเลย์จำเป็นต้องมีวงจรตรวจจับจุดแรงดันศูนย์ เพื่อช่วยในการกำหนดจุดที่ป้อนกระแสแก่ทริแอก แต่ข้อเสียของโซลิตสเทรีเลย์คือมีกระแสรั่วไหลผ่านวงจรตรวจจับจุดแรงดันศูนย์ แต่ก็เป็นกระแสจำนวนน้อยมาก

หลักการทำงาน

จากรูปที่ 3.17 วงจรควบคุมการทำงาน มีวงจรด้านแรงดันต่ำใช้ควบคุมการเปิดปิดของโซลิตสเทรีเลย์ โดยใช้ตัวเชื่อมโยงทางแสง (opto - coupler) แบบ LED กับทรานซิสเตอร์ ด้าน LED มีเพ็ท Q_1 ทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน LED ให้มีค่าคงที่ เมื่อป้อนแรงดันควบคุมด้านต่าง ๆ กันในช่วงตั้งแต่ 3 ถึง 32 โวลต์ D_1 เป็นตัวป้องกันการเสียหายของตัวเชื่อมโยงทางแสงและเพ็ทจากการป้อนแรงดันควบคุมกลับชั่ว วงจรตรวจจับจุดแรงดันศูนย์ ประกอบด้วย Q_2 , SCR_1 และ $D_2 - D_3$ เมื่อป้อนแรงดันควบคุมเข้าไป Q_1 จะควบคุมให้กระแสไหลผ่าน LED ภายใน IC_1 ให้มีค่าประมาณ 5 มิลลิแอมป์คงที่ (ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเพ็ท จากการทดลองพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 15 mA) LED ที่อยู่ใน IC_1 ทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์ภายในนำกระแส ทำให้กระแสไบแอสให้กับ Q_2 ลดลง Q_2 จึงหยุดนำกระแส ขาคอลเลกเตอร์ของ Q_2 จึงมีแรงดันสูง ทำให้มีกระแสไปกระตุ้นให้ SCR_1 นำกระแสต่อวงจร ให้กระแสไหลผ่านวงจรบริดจ์ ซึ่งประกอบด้วย $D_2 - D_3$ ทำให้มีกระแสไปที่เกทของไทรแอก Q_1 ทำให้ Q_1 นำกระแสได้ จึงมีกระแสไหลผ่านโหลด แต่ SCR_1 จะเริ่มนำกระแสก็ต่อเมื่อ แรงดันในสาย (รูปคลื่นซายน์) มีค่าเริ่มจากศูนย์เพิ่มขึ้นทางบวกหรือทางลบ ไทรแอกก็จะเริ่มนำกระแสที่จุดนี้ทุกครั้งเป็นไปไม่ได้ในขณะที่ให้แรงดันควบคุมกับวงจรจะตรงกับเวลาที่แรงดันนั้นผ่านจุดศูนย์ทุกครั้งไป SCR_1 จึงเป็นตัวตรวจสอบในการกระตุ้นที่จุดศูนย์ให้กับไทรแอก ดังนั้นโซลิตสเทรีเลย์จะตัดและต่อวงจรที่จุดศูนย์ของแรงดันในสายเสมอ R_1 เป็นตัวแบ่งกระแสที่ไหลผ่านเกทของไทรแอกไม่ให้สูงเกินไป C_1 เป็นตัวป้องกันการทำงานผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนจากภายนอก R_2 และ C_2 เป็นตัวป้องกันทรานเซียนท์จากการเพิ่มแรงดันของโหลดอย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้ไทรแอกเสียได้ นอกจากนี้ C_2 ยังเป็นตัวลดสัญญาณรบกวนและแรงดันกระชากในสายไฟด้วย R_3 เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลผ่าน C_2

ข้อมูลทางเทคนิคของโซลิดสเตทรีเลย์

ภาคเปิดปิด

nominal voltage	240	Vrms
maximum off - state voltage	400	V
critical rise of off - stage voltage	500	V/ μ s
maximum load current	8	A
peak current max. 20 mS.	70	A
peak current max. 10 mS.	80	A
minimum load current	60	mA
maximum reverse current	10	mA
maximum zero - crossing connection voltage	+30	V
maximum forward voltage	1.6	V

ภาคควบคุม

control DC voltage	3 - 32	V
control current	5 - 15	mA
rise time (max. 1 half - wave)	10	mS
fall time (max. 1 half - wave)	10	mS

การนำไปใช้งาน

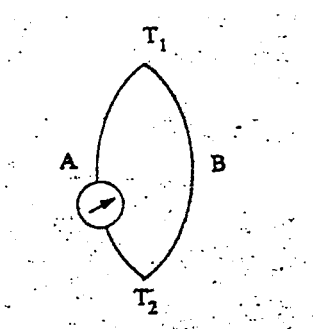
การนำไปใช้งานของโซลิดสเตทรีเลย์จะใช้เป็นสวิตช์เปิด-ปิด ในการควบคุมการจ่ายไฟให้กับเตาเผาสาร โดยใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิโดย เครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวควบคุมการทำงานของโซลิดสเตทรีเลย์

3.2.4 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล นับเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้งานได้กว้างขวางที่สุด เทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอื่นสามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่อุณหภูมิต่ำสุดใกล้ศูนย์องศาสมบูรณ์และสูงสุดกว่า 2000°C ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 630°C ถึง 1064°C International Temperature Scale ได้จัดอันดับให้เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ละเอียด ถูกต้อง น่าเชื่อถือที่สุด

หลักการการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล

หลักการการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลแสดงได้ง่ายๆ ดังรูปที่ 3.18 โลหะต่างชนิดกัน 2 ชั้น A และ B ต่อเป็นวงจรโดยมีขั้วต่อ T_1 และ T_2 แตกต่างกัน จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรมหาของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 และ T_2 และขึ้นกับค่าของ T_1 และ T_2 และวัสดุ A และ B ด้วย โดยการใช้มิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าในวงจรถาบค่าของอุณหภูมิ T_1 เมื่อทราบค่าของอุณหภูมิ T_2 โดยเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของค่าวัสดุ A และ B



รูปที่ 3.18 ภาพแสดงหลักการของเทอร์โมคัปเปิล



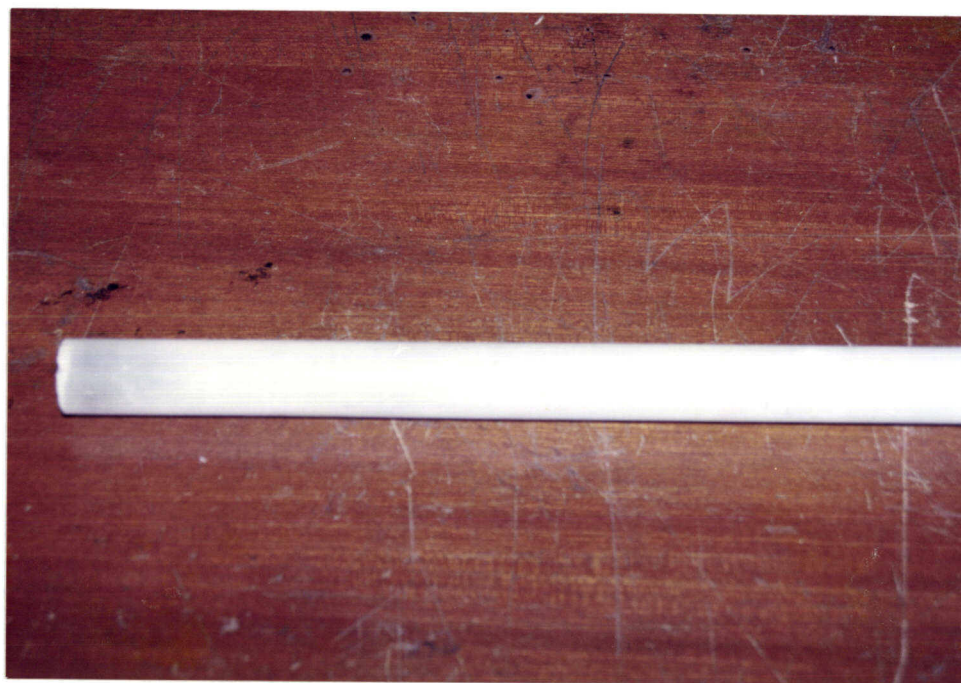
รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะของเทอร์โมคัปเปิล Type K

ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$ จำเป็นต้องอาศัยการเผาสารที่อุณหภูมิ 940°C จึงมีการเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิล Type K มีคุณสมบัติในการตรวจวัดอุณหภูมิในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือมี positive thermo element เป็นโลหะผสมระหว่าง Ni - 10% Cr และมี negative คือ โลหะผสมระหว่าง Ni - 5%(MnAlSi) ที่อุณหภูมิสูง Type K สามารถใช้งานได้เฉพาะในสภาพออกซิเดชั่น (อุณหภูมิ 1260°C) และใช้กันมากในช่วงอุณหภูมิเกิน 540°C และอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ถึง -250°C

3.2.5 ท่อแก้วควอทซ์

การเผาสารจะเกิดขึ้นภายในท่อแก้วควอทซ์นี้ เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่อาจเกิดขึ้นในขณะเตรียมสาร สาเหตุที่เลือกใช้ท่อแก้วควอทซ์ก็เนื่องจาก มีความแข็งแรง และทนอุณหภูมิได้สูงมาก ถึง 1583°C สำหรับท่อแก้วควอทซ์ที่ใช้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.5 cm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.81 cm. และมีความยาว 1 m. ก่อนที่จะใช้งานควรจะทำความสะอาดเสียก่อน เพื่อขจัดฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกออกให้หมด โดยการล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน หรืออาจใช้เครื่องเป่าลมช่วยก็ได้

ในขณะที่ทำการเตรียมสาร ถ้าเกิดการตกหล่นของสารภายในท่อแก้วควอทซ์ จะเกิดการแพร่ของสารเข้าไปในเนื้อท่อแก้วควอทซ์ เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นเหตุให้ท่อแก้วควอทซ์สกปรกและเสื่อมคุณภาพ จึงควรเพิ่มความระมัดระวังในขณะที่เตรียมสาร



รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะของท่อแก้วควอทซ์

การทำมาความสะอาดท่อแก๊วควอทซ์ในกรณีเกิดการตกหล่นของสาร

1. ใส่สารละลายกรดเจือจางของ HF + HNO₃ (อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร) ลงไปจนเต็มท่อ แซ่ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที รินออกเล็กน้อย เขย่าหลอดสักครู่ รินออกเล็กน้อย เติมน้ำกลั่นเข้าไปแทนที่ กระทำซ้ำแบบเดิมประมาณ 10 ครั้ง แล้วจึงรินสารละลายเจือจางออกทั้งหมด
2. ล้างท่อแก๊วควอทซ์ด้วยน้ำกลั่นอีกหลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าไม่มีกรดหลงเหลืออยู่
3. เมื่อท่อแก๊วควอทซ์สะอาดดีแล้ว เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน อาจใช้เครื่องเป่าผมช่วยให้แห้งเร็วก็ได้

สิ่งหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ก็คือ การเสื่อมคุณภาพของท่อแก๊วควอทซ์ เมื่อใช้งานไปนาน ๆ โดยเฉพาะบริเวณส่วนกลางของท่อซึ่งจะได้รับความร้อนมากที่สุด จะมีลักษณะโค้งงอ เป็นฝ้าสีขาว เนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างไปของท่อแก๊วควอทซ์ ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ท่อแก๊วควอทซ์นาน ๆ หรืออุณหภูมิสูงจนเกินไป เพราะอาจจะทำให้เกิดการเสียหายเกิดขึ้นได้

3.2.6 ก๊าซออกซิเจน

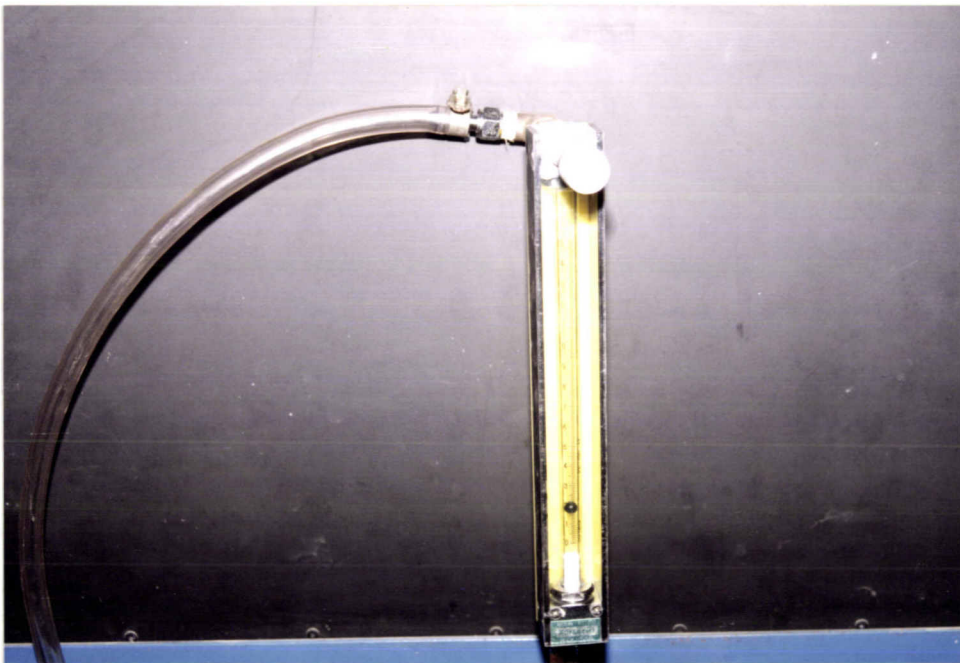
ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาสารในซินเทอร์ริงไซเคิล ซึ่งออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สารที่เตรียมได้มีคุณสมบัติที่น่าพอใจเพราะฉะนั้นในการเตรียมสารตัวอย่างแต่ละครั้งต้องเตรียมก๊าซออกซิเจนให้เพียงพอกับเวลาที่ใช้เตรียมสาร



รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของถังใส่ก๊าซออกซิเจนเหลว

3.2.7 เครื่องควบคุมอัตราการไหล

ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ให้กับเตาให้คงที่ โดยในการทำโครงการครั้งนี้ ได้ใช้ปริมาณออกซิเจน 2 ลบ.ซม.ต่อนาที



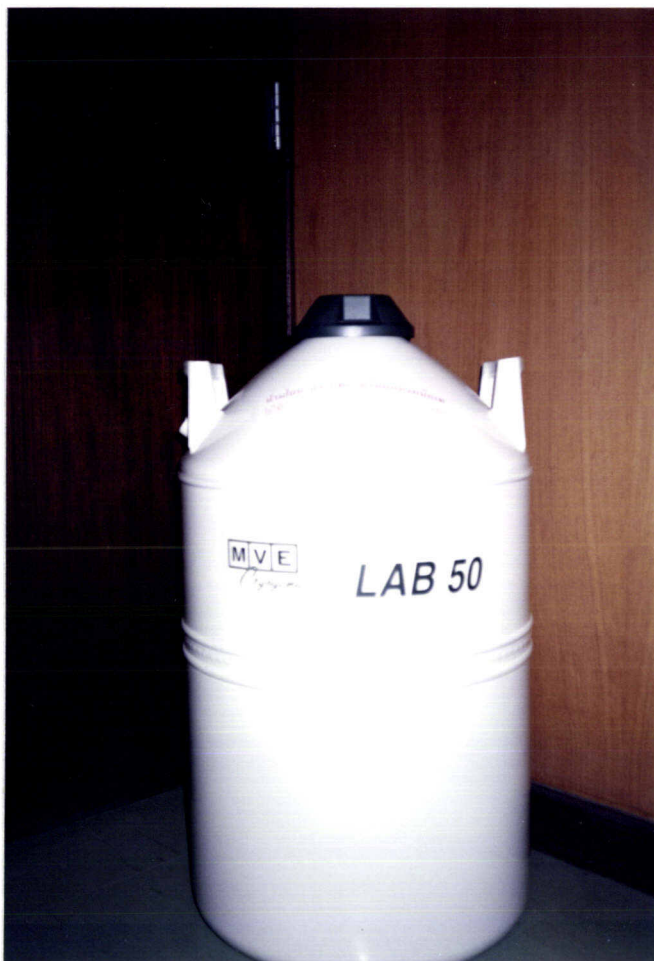
รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะของเครื่องควบคุมอัตราการไหล

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ในการทดสอบคุณสมบัติความเป็นสารตัวนำยิ่งยวด ต้องอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์ต่อไปนี้

3.3.1 ไนโตรเจนเหลวและถังบรรจุไนโตรเจนเหลว

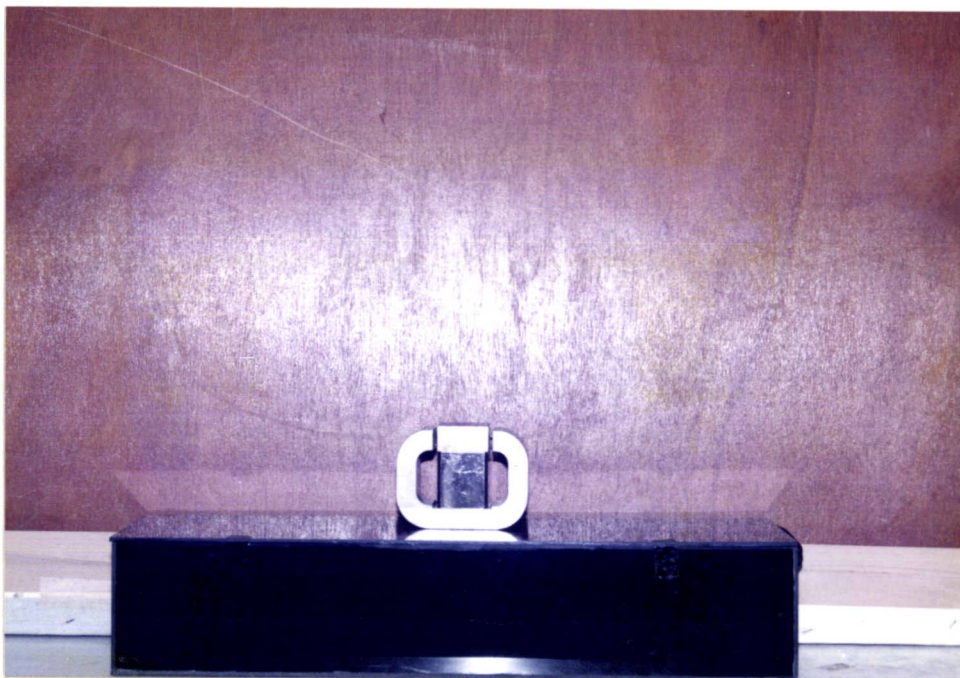
ไนโตรเจนเหลวใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยไนโตรเจนเหลวจะถูกเก็บอยู่ในถังบรรจุไนโตรเจนเหลว ในการนำไนโตรเจนเหลวมาใช้ ต้องใช้ท่อสูบน้ำไนโตรเจนเหลว แล้วใส่ในภาชนะที่สามารถทนความเย็นของไนโตรเจนเหลวได้ ในการทดสอบ ควรระมัดระวังไม่ให้ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายถูกไนโตรเจนเหลว ซึ่งเป็นอันตรายได้



รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะถังบรรจุไนโตรเจนเหลว

3.3.2 แม่เหล็ก

แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้กับสารตัวนำยิ่งยวด โดยแม่เหล็กที่ใช้ จะต้องเป็นแม่เหล็กที่ให้สนามแม่เหล็กออกมาสูงพอที่จะสังเกตเห็นปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้



รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะของแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

บทที่ 4

การเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด YBa₂Cu₃O₇

ขั้นตอนการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด (YBa₂Cu₃O₇)

การเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดชนิด YBa₂Cu₃O₇ สามารถเตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 940 °C และจะทำการเผา 2 ครั้ง เพื่อให้ได้สารตัวอย่างที่มีคุณสมบัติความเป็นสารตัวนำยิ่งยวดตามที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

4.1 การคำนวณหาอัตราส่วนสารที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด YBa₂Cu₃O₇

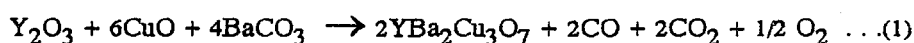
สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดประกอบด้วย

Y₂O₃ : ยิทเทรียมออกไซด์ (Yttrium Oxide)

BaCO₃ : แบเรียมคาร์บอเนต (Barium Carbamate)

CuO : คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper Oxide)

ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะรวมตัวเป็นสารตัวนำยิ่งยวด YBa₂Cu₃O₇ ดังสมการ



4.1.1 จำนวนน้ำหนักของสารที่จะชั่งในอัตราส่วนจากวิธีการเตรียมสารที่มีอยู่ (Advanced electronic materials and technology group) ซึ่งเตรียมได้ดังนี้

จากข้อมูล YBa₂Cu₃O₇ 5 กรัม จะต้องใช้ Y₂O₃ 0.76 กรัม

BaCO₃ 2.64 กรัม

CuO 1.60 กรัม

สารที่เตรียม YBa₂Cu₃O₇ 1.5 กรัม จะต้องใช้ Y₂O₃ = $\frac{0.75}{5} \times 1.5$

= 0.228 กรัม

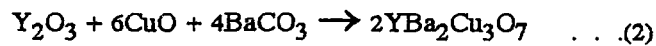
BaCO₃ = $\frac{2.64}{5} \times 1.5$

= 0.792 กรัม

CuO = $\frac{1.60}{5} \times 1.5$

= 0.48 กรัม

4.1.2 การตรวจสอบปริมาณสารที่เตรียมได้กับปริมาณสารจากการคำนวณจากสมการ



จากตารางธาตุจะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้

Y : ยทเทรียม มีมวลอะตอม 88.905

O : ออกซิเจน มีมวลอะตอม 15.999

Cu : คอปเปอร์ มีมวลอะตอม 63.546

Ba : แบเรียม มีมวลอะตอม 137.340

C : คาร์บอน มีมวลอะตอม 12.010

นำมวลอะตอมที่ได้แทนในสมการที่ (2) จะได้

$$Y_2O_3 = 2(88.905) + 3(15.999) \\ = 225.847$$

$$6CuO = 6(63.546 + 15.999) \\ = 477.27$$

$$4BaCO_3 = 4\{ 137.34 + 12.01 + 3(15.999) \} \\ = 789.388$$

$$2YBa_2Cu_3O_7 = 2\{ 88.905 + 2(137.34) + 3(63.546) + 7(15.999) \} \\ = 1332.432$$

$$YBa_2Cu_3O_7 \quad 1332.432 \quad \text{จะต้องใช้} \quad Y_2O_3 = 225.847$$

$$YBa_2Cu_3O_7 \quad 1.5 \text{ กรัม} \quad \text{จะต้องใช้} \quad Y_2O_3 = \frac{225.847}{1332.432} \times 1.5$$

$$\text{จะต้องใช้} \quad Y_2O_3 = 0.253 \text{ กรัม}$$

$$Y_2O_3 \quad 225.847 \quad \text{จะต้องใช้} \quad CuO = 477.27$$

$$Y_2O_3 \quad 0.253 \text{ กรัม} \quad \text{จะต้องใช้} \quad CuO = \frac{477.27}{225.847} \times 0.253$$

$$\text{จะต้องใช้} \quad CuO = 0.534 \text{ กรัม}$$

$$Y_2O_3 \quad 225.847 \quad \text{จะต้องใช้} \quad BaCO_3 = 789.388$$

$$Y_2O_3 \quad 0.253 \text{ กรัม} \quad \text{จะต้องใช้} \quad BaCO_3 = \frac{789.388}{225.847} \times 0.253$$

$$\text{จะต้องใช้} \quad BaCO_3 = 0.884 \text{ กรัม}$$

จากการคำนวณน้ำหนักของสารจากอัตราส่วนจากข้อมูลที่มีอยู่ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักสารจากการคำนวณดังกล่าว ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน น้ำหนักสารที่ใช้จึงใช้ตามที่คำนวณได้ในหัวข้อ 4.1

4.1.3 การชั่งสาร

การชั่งสารจะทำการชั่งสารทีละชนิด โดยใช้เครื่องชั่งสูญญากาศระบบดิจิทัล และใช้กระดาษฟรอยด์ในการรองรับสาร ดังรูปที่ 4.5 โดยทำตามลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ทำการชั่งกระดาษฟรอยด์ โดยไม่มีสารอยู่ในกระดาษฟรอยด์
2. นำกระดาษฟรอยด์วางลงบนเครื่องชั่ง ค่อยๆตักสารใส่ลงในกระดาษฟรอยด์ให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการ
3. ทำการเปลี่ยนกระดาษฟรอยด์อันใหม่เพื่อทำการชั่งสารครั้งต่อไป

4.2 การผสมสาร

ในการผสมสารมีจุดประสงค์เพื่อให้สารประกอบต่าง ๆ คลุกเคล้าจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน แต่ในการเตรียมสารครั้งนี้ใช้ขั้นตอนการผสมสารเพียง 2 แบบ

แบบที่ 1 การใช้เครื่องแก้วสารใช้ในการเตรียมสารครั้งละหลายๆ โดยก่อนที่จะนำสารมาอัดเม็ดหรือนำมาเผาในรีแอกติงไซเคิล (Reacting Cycle) จะนำสารประกอบต่างๆ ที่ทำการชั่งได้ถูกต้องแล้วมาใส่รวมกันในขวดขนาดเล็ก ทำการปิดฝาขวดให้แน่นเพื่อป้องกันการกระเด็นของสารตัวอย่าง นำขวดดังกล่าวมาวางไว้ในเครื่องแก้วสาร ทำการเปิดเครื่องแก้วสารเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้สารคลุกเคล้าเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 4.6

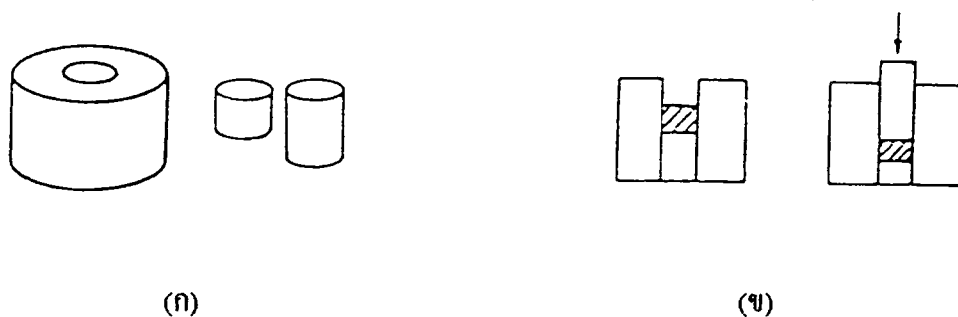
แบบที่ 2 ใช้ครกบดสารในการบดสารครั้งละไม่มาก โดยจะนำสารที่ต้องการบดใส่ลงในครกและใช้ที่บด ทำการบดสารในลักษณะหมุนบดสารให้ละเอียดเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยทำการบดประมาณ 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ซึ่งการผสมสารในแบบที่ 1 จะทำให้สารคลุกเคล้าเข้าเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าแบบที่ 2 จึงเลือกใช้การผสมสารในแบบที่ 1

4.3 การอัดเม็ดสาร

การอัดเม็ดสาร มีจุดประสงค์เพื่อให้สารตัวอย่างทำปฏิกิริยากันเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง ได้ดียิ่งขึ้น เพราะการอัดเม็ดสารจะทำให้โมเลกุลของสารอยู่ใกล้ชิดกัน และการอัดเม็ดสารยังมีประโยชน์ในการนำสารตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วมาทำการทดสอบหาปรากฏการณ์ไมสเนอร์เพื่อยืนยันคุณสมบัติการเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งขั้นตอนการอัดเม็ดสารมีดังนี้

1. เตรียมสารที่ต้องการจะอัดเม็ด โดยเตรียมจากสารตัวอย่างที่ผ่านการผสมคลุกเคล้าเข้ากันดีแล้ว นำมาทำการชั่งโดยจะใช้สารปริมาณ 1.5 กรัมต่อสาร 1 เม็ด
2. นำสารที่เตรียมได้จากข้อ 1 เทใส่ในเบ้าอัดเม็ด ดังรูปที่ 4.1(ก)
3. หยดแอลกอฮอล์ 2 หยดลงบนสารตัวอย่างเพื่อให้สารตัวอย่างเกาะตัวกันดีขึ้นและแอลกอฮอล์ที่หยดลงไปจะระเหยออกจากเนื้อสารตัวอย่างทำให้ไม่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง
4. อัดลูกสูบลงในเบ้าอัดเม็ด ดังรูปที่ 4.1(ข) โดยทำการอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ใช้แรงอัด 5 ตัน
5. ในการอัดสารจะทำการอัดสองครั้ง โดยเว้นช่วงในการอัดแต่ละครั้งประมาณ 10 นาที
6. นำเม็ดสารออกจากเบ้าอัดเม็ดอย่างระมัดระวัง



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการอัดเม็ดสาร

ได้มีการแบ่งสารออกเป็น 2 ส่วน โดยนำสารส่วนหนึ่งมาทำการอัดเม็ด โดยมีปริมาณสารเม็ดละ 1.5 กรัม จำนวน 3 เม็ด ส่วนที่เหลือไม่ทำการอัดเม็ด แต่เก็บไว้รอการเผาไนรีแอกติงไซเคิล

4.4 การเผาสาร

ในการเผาสารเพื่อให้ได้สารตัวนำวอยด์ที่สมบูรณ์ จะต้องทำการเผาใน 2 ครั้ง โดยในครั้งแรกเรียกว่า รีแอกติงไซเคิล เป็นการเผาเพื่อให้เนื้อสารแต่ละชนิดทำปฏิกิริยากัน โดยปราศจากการหลอมละลายของเนื้อสาร ส่วนครั้งที่ 2 เป็นการเผาเพื่อให้สารทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์โดยการบีบอนุภาคเล็กๆเข้าด้วยกันในก้อนแร่ของสาร ซึ่งจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า ซินเทอริง (Sintering Cycle)

การเผาในรีแอกติงไซเคิล จะแตกต่างจากการเผาในขั้นตอนซินเทอริงในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ โดยในการลดอุณหภูมิในขั้นตอนซินเทอริง จะมีการให้ก๊าซออกซิเจนเข้าไปในเตาเผาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง และเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารตัวนำวอยด์

4.4.1 การเผาสารในรีแอกติงไซเคิล

เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์ในการเผาไซเคิลนี้ จะต้องทำการควบคุมอุณหภูมิของเตาให้ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 940°C และยังคงควบคุมอุณหภูมิในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ ซึ่งในการเผาจะใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิในการควบคุมอุณหภูมิของเตา ดังนั้นก่อนทำการเผาสารจะต้องทำการเช็คเครื่องควบคุมอุณหภูมิตามคู่มือการใช้เครื่อง

ขั้นตอนการเผาสาร

1. นำสารที่อัดเม็ดและสารที่เป็นผงที่เตรียมจากขั้นตอนการเตรียมสารมาบรรจุลงในโบท
2. ทำการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเป็น 40°C
3. นำสารตัวอย่างที่เตรียมไว้วางในท่อควอทซ์ในเตาเผาที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา
4. ทำการปรับอุณหภูมิของเตา โดยเพิ่มอุณหภูมิของเตาจากอุณหภูมิ 40°C เป็น 940°C ภายในเวลา 6 ชั่วโมง โดยควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 150°C ต่อชั่วโมง

ตาราง 4.1 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
ในขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิในรีแอกติง ไชเคิล

ชั่วโมง	โวลท์ที่จ่ายให้กับเตา (volt)	เซ็ทอุณหภูมิที่เครื่อง ควบคุมอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
0	40	40
1	50	190
2	70	340
3	80	490
4	90	640
5	100	790
6	100	940

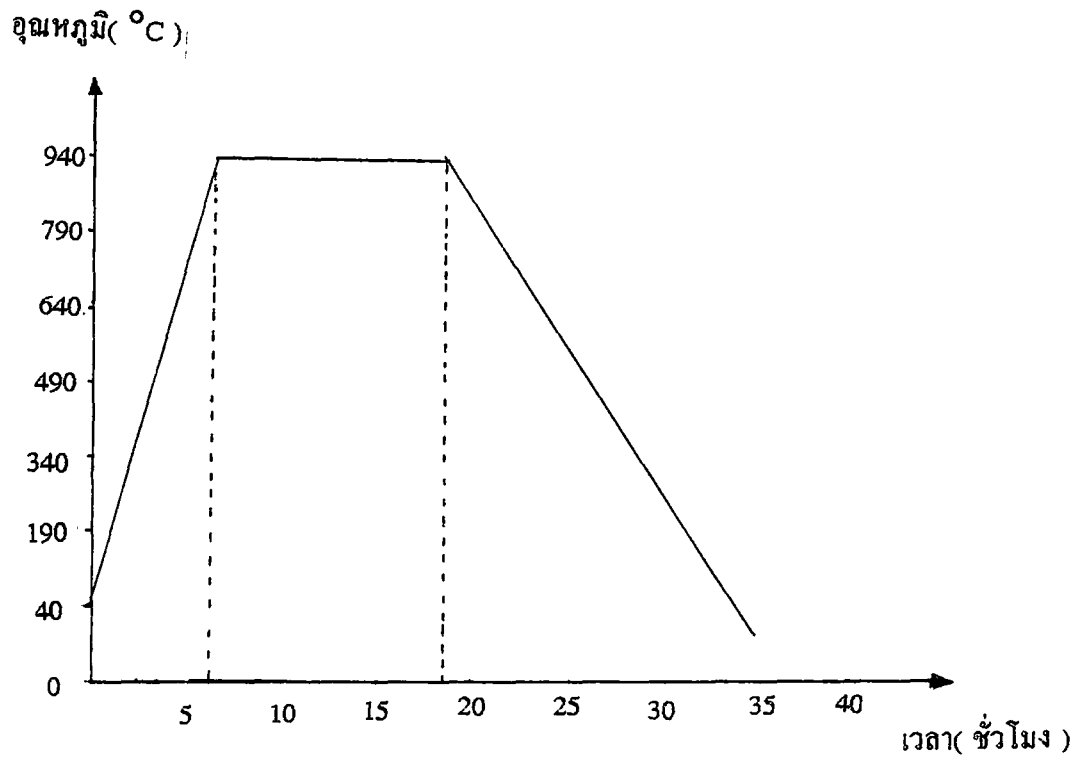
ในการเซ็ทอุณหภูมิจะกดปุ่มเซ็ทที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ จอจะปรากฏสัญลักษณ์ S.P ให้ทำการกดปุ่มบวกและลบให้ได้ค่าตัวเลขเป็นอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นทำการกดปุ่มเซ็ทอีกครั้ง

5. ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิ 940°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

6. ทำการลดอุณหภูมิอย่างช้าๆ โดยใช้อัตราการลดด้วยอัตรา 60°C ต่อชั่วโมง โดยใช้เวลาในการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้องประมาณ 12 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย

ตาราง 4.2 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิในรีแอกติง ไซเคิล

ชั่วโมง	โวลท์ที่จ่ายให้กับเตา (volt)	เซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุม อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
18	100	940
19	100	880
20	100	820
21	100	760
22	100	700
23	100	640
24	100	580
25	100	520
26	0	460
27	0	400
28	0	340
29	0	280
30	0	220
31	0	160
32	0	100
33	0	40
34	0	32



รูปที่ 4.2 แสดงการเพิ่มและลดอุณหภูมิในรีแอกติงไซเคิล

4.4.2 การเผาสารในซินเตอร์ริงไซเคิล

การเผาสารในไซเคิลนี้มีขั้นตอนสำคัญคือ การลดอุณหภูมิในขั้นตอนการลดอุณหภูมิจะต้องมีการให้ก๊าซออกซิเจนภายในเตาเผา ซึ่งการให้ก๊าซออกซิเจนจะต้องให้อย่างสม่ำเสมอ และต่อเนื่องตลอดเวลาของการลดอุณหภูมิ

ขั้นตอนการเผาสาร

1. นำสารที่ได้จากการเผาในรีแอกติง ไซเคิล มาทำการบดและอัดเม็ด แล้วบรรจุลงในโบท
2. ทำการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเป็น 40°C
3. นำสารตัวอย่างที่เตรียมไว้วางในท่อควอทซ์ในเตาเผาสารไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา
4. ทำการปรับอุณหภูมิของเตา โดยเพิ่มอุณหภูมิของเตาจากอุณหภูมิ 40°C เป็น 940°C ภายในเวลา 6 ชั่วโมง โดยควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ในอัตรา 150°C ต่อชั่วโมง

ตาราง 4.3 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
ในขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิในซินเตอร์ริง ไซเคิล

ชั่วโมง	โวลท์ที่จ่ายให้กับเตา (volt)	เซ็ทอุณหภูมิที่เครื่อง ควบคุมอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
0	40	40
1	50	190
2	70	340
3	80	490
4	90	640
5	100	790
6	100	940

5. ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิ 940°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
6. ทำการลดอุณหภูมิต่างช้าๆ โดยใช้อัตราการลดประมาณ 60°C ต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ 500°C พร้อมทั้งให้ก๊าซออกซิเจนเข้าไปภายในของเตาเผาสาร โดยให้ก๊าซออกซิเจนในปริมาณ 2 ลบ.ซม ต่อนาที

ตาราง 4.4 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิในซินเตอร์ริงไซเคิล

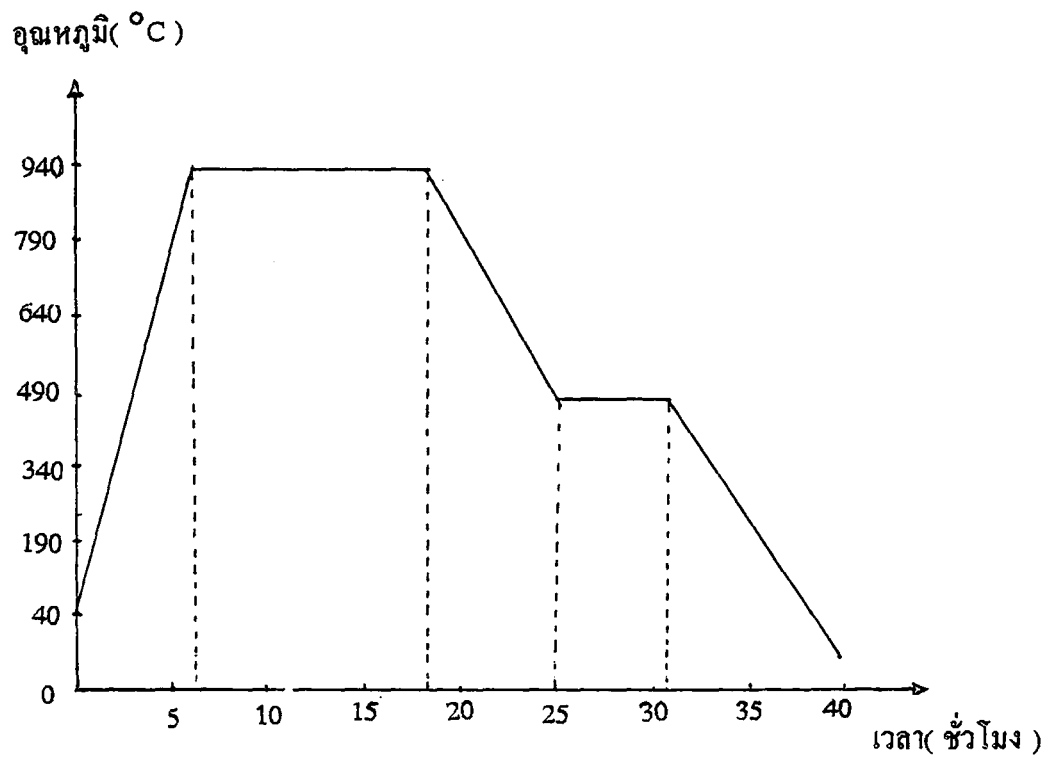
ชั่วโมง	โวลต์ที่จ่ายให้กับเตา (volt)	เซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุม อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
18	100	940
19	100	880
20	100	820
21	100	760
22	100	700
23	100	640
24	100	580
25	100	500

7. ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 500°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยยังคงมีการให้ก๊าซออกซิเจนอยู่

8. ทำการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราการลดประมาณ 60°C ต่อชั่วโมง

ตาราง 4.5 แสดงการเซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิในซินเตอร์ริงไซเคิล

ชั่วโมง	โวลต์ที่จ่ายให้กับเตา (volt)	เซ็ทอุณหภูมิที่เครื่องควบคุม อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
31	100	500
32	0	440
33	0	380
34	0	320
35	0	260
36	0	200
37	0	140
38	0	80
39	0	32

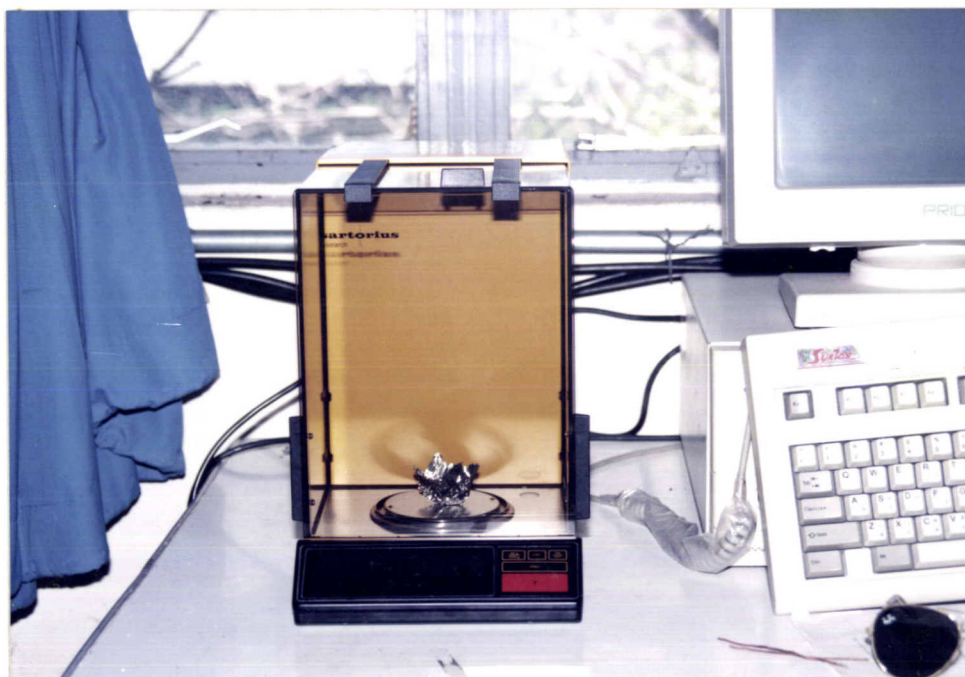


รูปที่ 4.5 แสดงการเพิ่มและลดอุณหภูมิในซินเตอร์ริงไซเคิล

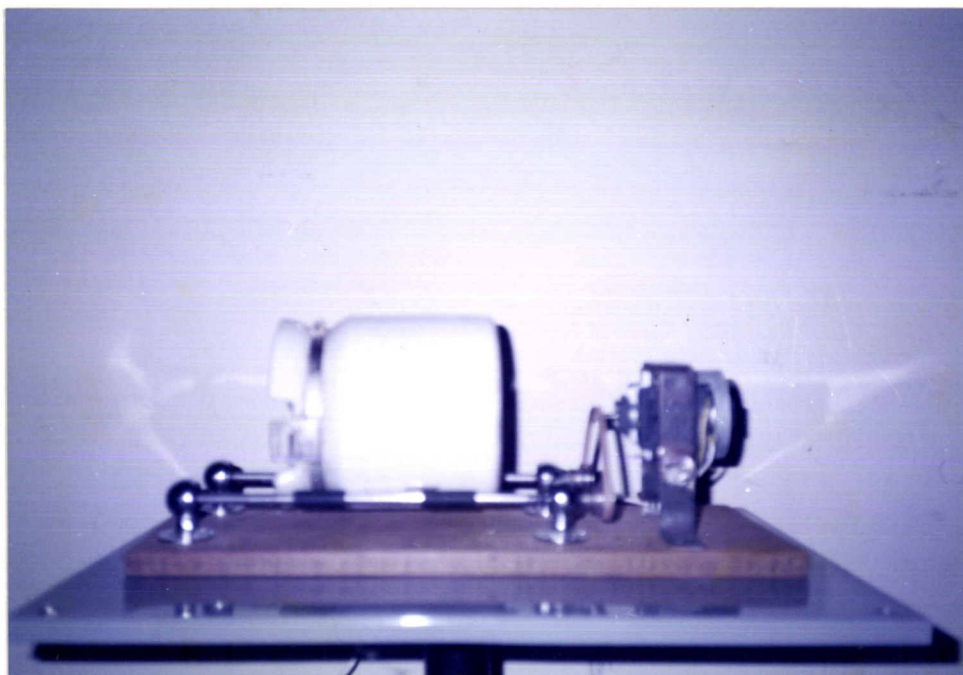
ภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวดครั้งที่ 2



รูปที่ 4.4 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$



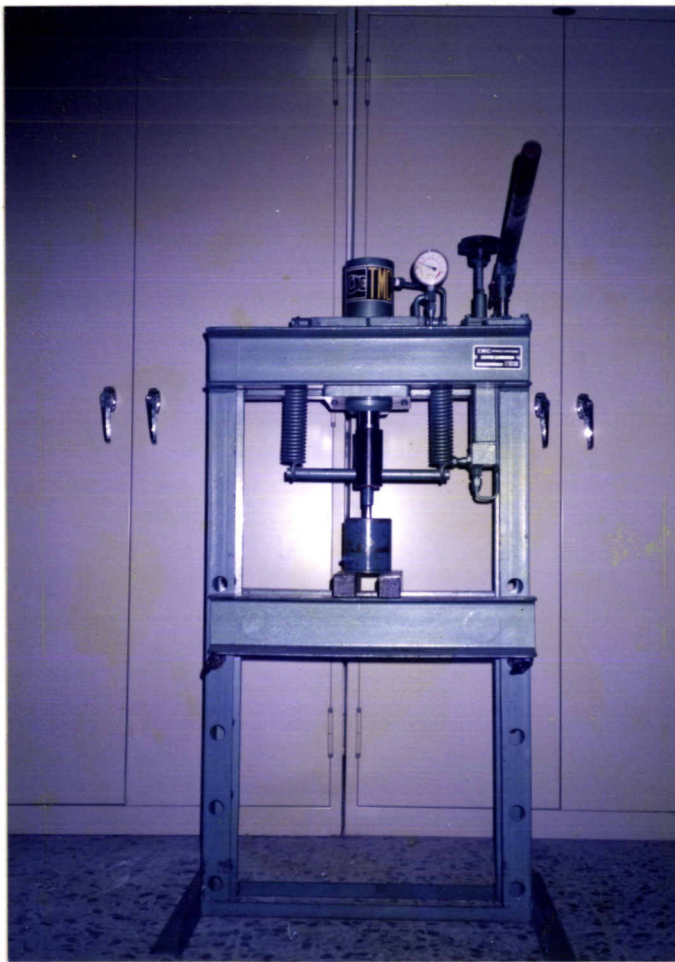
รูปที่ 4.5 แสดงการชั่งสาร



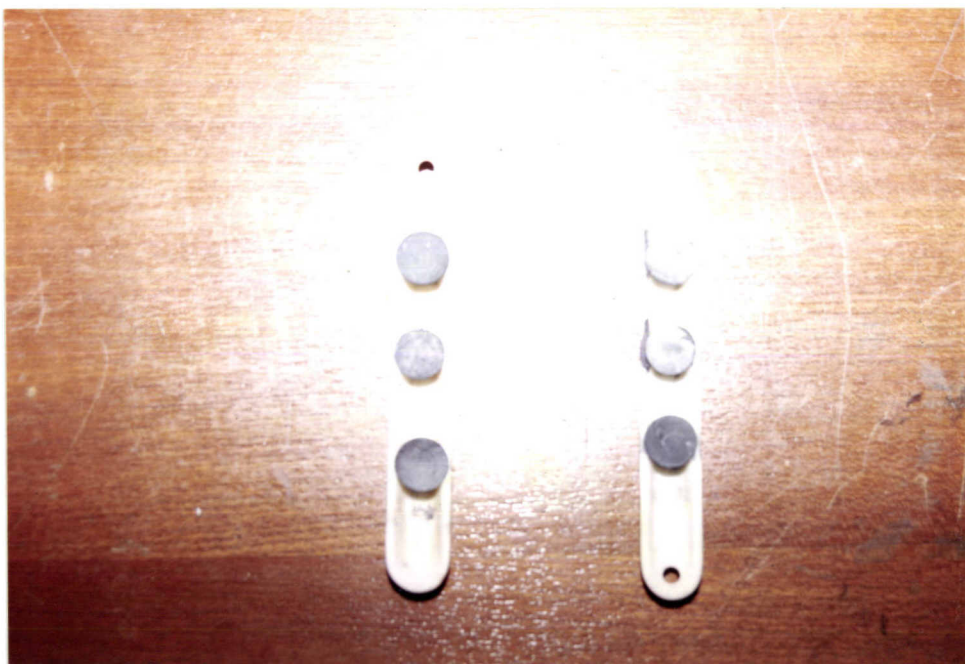
รูปที่ 4.6 แสดงการแกว่งสาร



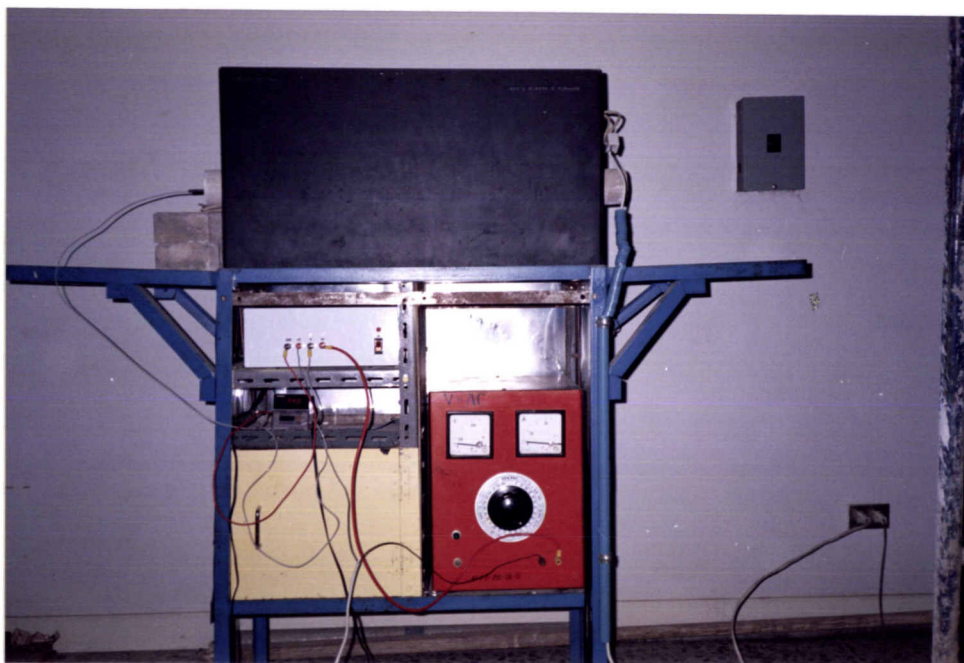
รูปที่ 4.7 แสดงการบดสารด้วยกรกบดสาร



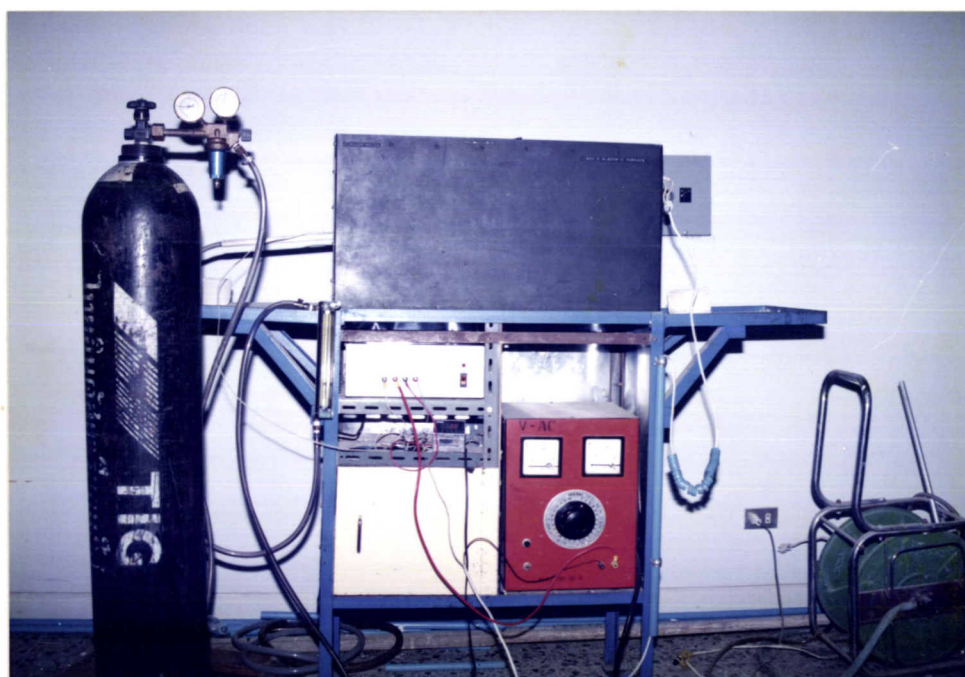
รูปที่ 4.8 แสดงการอัดเม็ดสาร



รูปที่ 4.9 แสดงการวางสารบนโบท



รูปที่ 4.10 แสดงการเผาสารไนรีแอกติงไซเคลิต



รูปที่ 4.11 แสดงการเผาสารไนซินเตอร์ริงไซเคลิต

บทที่ 5

การทดสอบและสรุปผล

หลังจากทำการเตรียมสารตัวอย่างตามวิธีและขั้นตอนในการเตรียมสารในบทที่ 4 จึงนำสารตัวอย่างที่ได้มาทำการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$, โดยในการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะอาศัยปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ รวมถึงการหาค่าความต้านทาน ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

5.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

จากคุณสมบัติการเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง ไม่เพียงแต่จะเป็นสารตัวนำที่สมบูรณ์เท่านั้นแต่ยังมีความเป็นแม่เหล็กที่สมบูรณ์อีกด้วยนั่นก็คือ สนามแม่เหล็กจะถูกขับออกไปจากเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งเมื่อถึงอุณหภูมิวิกฤติ ซึ่งสังเกตได้จากการผลักกันระหว่างสารตัวนำยวดยิ่งกับบริเวณสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสารตัวนำยวดยิ่งมาทำการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิวิกฤติและนำสารตัวนำยวดยิ่งมาวางในตำแหน่งสนามแม่เหล็ก

จุดประสงค์ในการทดสอบ

1. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ไมส์เนอร์
2. เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวอย่างที่เตรียมได้
3. เพื่อยืนยันความเป็นสารตัวนำยวดยิ่งของสารตัวอย่างที่เตรียมได้

วิธีการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

1. นำสารตัวอย่างแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 5 นาทีเพื่อเป็นการลดอุณหภูมิของสารตัวอย่าง

2. นำสารตัวอย่างมาวางในตำแหน่งสนามแม่เหล็ก
3. สังเกตผลที่ได้

ผลการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์จากสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเตรียมสารครั้งที่ 1

ไม่เกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์จากสารตัวอย่างที่เตรียมได้ ซึ่งเป็นการยืนยันว่า สารตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเตรียมครั้งที่ 1 ไม่มีคุณสมบัติความเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง

ข้อผิดพลาดจากการเตรียมสารครั้งที่ 1

1. ปริมาณเนื้อสารที่ประกอบเป็นสารตัวอย่างในขั้นตอนการบดสารผิดพลาด เนื่องจากผิวของครกบดสารมีลักษณะไม่เรียบ เนื้อสารตัวอย่างจะติดกับครกบดสาร ทำให้อัตราส่วนของสารตัวอย่างที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $YBa_2Cu_3O_7$ ผิดพลาดไป

2. เนื้อสารไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากขาดขั้นตอนการแกว่งสาร (ซึ่งได้เพิ่มขั้นตอนการแกว่งสารเข้าไปในการเตรียมสารครั้งที่ 2) ทำให้สารเคมีทำปฏิกิริยากันไม่สมบูรณ์

3. เกิดการหลอมละลายของเนื้อสารในการเผาในเตาเซรามิก เนื่องจากในบางตำแหน่งของเตามีอุณหภูมิสูงกว่า $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้ไม่สามารถนำสารนั้นมาเผาในเซรามิกต่อไปได้

4. การเผาในซินเตอร์ริงเซรามิก ขณะที่มีการลดอุณหภูมิ มีการให้ออกซิเจนที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากออกซิเจนหมดลงก่อนการลดอุณหภูมิเสร็จสิ้น ทำให้การทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการมีพันธะคอปเปอร์-ออกซิเจนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง จึงเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่ทำให้เกิดคุณสมบัติการนำยวดยิ่ง

เนื่องจากการเตรียมสารตัวอย่างครั้งที่ 1 ได้สารที่ไม่มีคุณสมบัตินำยวดยิ่ง จึงได้มีการแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ และทำการเตรียมสารครั้งที่ 2 ต่อไป

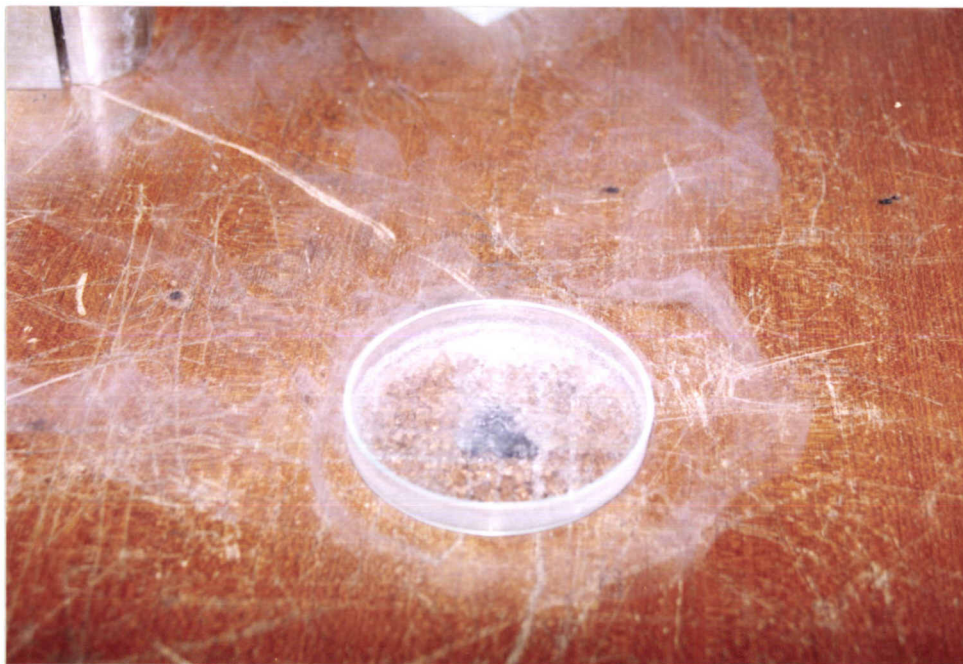
ผลการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์จากสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเตรียมครั้งที่ 2

เกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์จากสารตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยสังเกตได้จากการผลักกันระหว่างสารตัวอย่างกับแม่เหล็ก และเป็นการยืนยันว่า สารที่เตรียมได้จากการเตรียมสารครั้งที่ 2 เป็นสารตัวนำยวดยิ่ง

ข้อเสนอแนะในการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

1. ควรระมัดระวังในการให้ออกซิเจน โดยจำเป็นต้องให้ออกซิเจนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาระหว่างการเผาในซินเตอร์ริงไซเคิล เนื่องจากการมีพันธะคอปเปอร์-ออกซิเจนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง จึงเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่ทำให้เกิดคุณสมบัติการนำยวดยิ่ง
2. ในการเตรียมสารก่อนที่จะอัดเม็ดก่อนนำไปเผาในทั้ง 2 ไซเคิล จะต้องผ่านกระบวนการแกว่งสาร โดยใช้เครื่องแกว่งสาร เพื่อให้เนื้อสารคลุกเคล้าเข้ากันอย่างทั่วถึงและทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
3. ตรวจสอบความพร้อมและความสะอาดของอุปกรณ์ให้เรียบร้อยก่อนทำการเตรียมสาร

ภาพแสดงการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์
ของสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเตรียมสารครั้งที่ 2



รูปที่ 5.1 แสดงการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยแช่สารตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว



รูปที่ 5.2 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อวางสารตัวอย่างลงบนแม่เหล็ก

5.2 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้า

คุณสมบัติที่สำคัญของสารตัวนำวดยิ่งคือ เมื่อสารมีอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิจุดวิกฤติ จะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารนั้นได้ ซึ่งเป็นการยืนยันว่า สารนั้นเป็นสารตัวนำวดยิ่ง

จุดประสงค์ในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า

1. เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เตรียมได้
2. เพื่อยืนยันความเป็นสารตัวนำวดยิ่งของสารตัวอย่างที่เตรียมได้

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า

1. นำสารตัวอย่างแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 5 นาที
2. นำโอห์มมิเตอร์มาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า
3. สังเกตผลที่ได้

ผลที่ได้จากการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า

เมื่อนำโอห์มมิเตอร์มาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยแช่สารตัวอย่างไว้ในไนโตรเจนเหลว เพื่อให้สารตัวอย่างมีอุณหภูมิลดลง และมีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำวดยิ่ง สามารถสังเกตผลจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้ามูลค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าประมาณ 23 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดที่สามารถวัดได้ เนื่องจากไนโตรเจนเหลวระเหยหมด ทำให้สารตัวอย่างหมดสภาพการนำวดยิ่งเมื่ออุณหภูมิของสารตัวอย่างสูงขึ้น

ข้อเสนอแนะในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

ในบรรยากาศปกติ สารตัวนำวดยิ่งที่เตรียมได้มีการจับตัวของชั้นออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของเนื้อสาร ทำให้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่ได้ผลตามต้องการ วิธีการหนึ่งที่ช่วยในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นคือ นำกระดาษทรายเบอร์ 600 ขัดชั้นออกไซด์ออกจากผิวหน้าของสารตัวอย่าง จากนั้นจึงใช้โอห์มมิเตอร์มาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าตามปกติ

5.3 สรุปผล

จากการเตรียมสารตามขั้นตอนการเตรียมสารในบทที่ 4 จะได้สารตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง ซึ่งพิสูจน์ได้จากการเกิดปรากฏการณ์ไมสเนอร์ของสารตัวอย่าง และการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีค่าประมาณ 23 โอห์ม

เรื่องที่ควรทำเพิ่มเติม

การหาโครงสร้างผลึกของสารตัวนำยวดยิ่ง เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งซึ่งเป็นการยืนยันว่า สารตัวอย่างที่เตรียมได้เป็นสาร $YBa_2Cu_3O_7$ จริง แต่เนื่องจากมีเหตุขัดข้องทางเครื่องมือ คือเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ที่จะใช้ในการเอ็กซ์เรย์เพื่อหาโครงสร้างทางผลึกไม่อยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานได้ และต้องอาศัยระยะเวลาในการซ่อมแซมเครื่องมือให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ จึงไม่สามารถหาโครงสร้างของผลึกได้เนื่องจากระยะเวลาในการทำโครงงานมีจำกัด ดังนั้น หากมีผู้สนใจการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่ง การหาโครงสร้างผลึกก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะศึกษาต่อไป

หนังสืออ้างอิง

1. Leouid V. Azaroff & Buerger, " The powder method in X-ray crystallography ", QD 945 A99.
2. William Jones, Norman H. March, " Theoretical Solid State Physics ", Volume 2 (Non-equilibrium and Disorder) Dover, 1973.
3. S V Subramanyam, E S Raja Gopal, " High Temperature Superconductor "
4. Vladimir Z. Kresin and Stuart A. Wolf, " Fundamental of Superconductivity "
5. Terry P. Orlands, Kevin A. Delin, " Fundamental of Applied Superconductivity "
6. C M Kachhava, " Solid State Physics "
7. Harold T. Stokes, " Solid State Physics "
8. H. P. Myers, " Introductory Solid State Physics "
9. J. Richard, " Fundamental of Solid State Physics "
10. A. Bianeoni & A. Marcelli (Pergamon Press), " High T_c Superconductors Electronic Structure "
11. S. NAKAJIMA, H. FUKUYAMA, " Superconducting Materials "
12. คู่มือ เครื่องาน, " โซลิดสเตทฟิสิกส์ ", บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด
13. สุ่น อ่างประยูร, " การศึกษาโครงสร้างของผลึกสารกึ่งตัวนำแบบชาลโคไพไรท์ $AgGeTe_2$, $AgInSe_2$, $AgInTe_2$ และ $CuInTe_2$ โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ "