

การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2554

การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2554
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2554

ฐิติพงศ์ เครือหงส์.(2554). การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO

ปริญญาานิพนธ์ ปร.ด. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณะกรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย,

อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แหมมณี, อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง การเตรียมสารได้กำหนดสูตรทางเคมีโดยให้จำนวนอะตอมของยิทเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ จากแนวทางนี้ได้สังเคราะห์สารสูตรใหม่ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO ขึ้นมา 5 สูตรได้แก่ Y156 Y3-8-11 Y5-8-13 Y7-11-18 และ Y13-20-33 โดยตัวเลขลำดับที่ 1 2 และ 3 หมายถึง จำนวนอะตอมของยิทเทรียม จำนวนอะตอมของแบเรียม และจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ ตามลำดับ สารตั้งต้นที่ใช้คือ ยิทเทรียมออกไซด์(Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์(CuO) นำสารตั้งต้นผสมให้เข้ากันแล้วนำไปสู่การเผาสามกระบวนการ คือ กระบวนการเผาแบบผง กระบวนการเผาแบบขึ้นรูปและกระบวนการเผาแบบอบตามลำดับ จะได้สารมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 เซนติเมตรและมีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ศึกษาคุณลักษณะของสารโดยใช้วิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว เพื่อหาค่าของอุณหภูมิวิกฤต วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และใช้โปรแกรมฟูลพรอพเพื่อหาโครงสร้าง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาสัณฐานพื้นผิว การวัดเอกซ์เรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงานเพื่อวิเคราะห์ธาตุ และการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์เพื่อหาค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกพบว่า Y358 Y3-8-11 และ Y5-8-13 มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่ 94 เคลวิน และ Y156 มีความต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด อย่างไรก็ตามสารทั้งหมดมีค่าอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับ Y123 องค์ประกอบของสารมีอยู่สองชนิด คือ สารนำยวดยิ่งและสารปกติ สารนำยวดยิ่งมีกลุ่มปริภูมิเป็นแบบ Pmmm ในขณะที่สารปกติมีหลายกลุ่มปริภูมิ รูปแบบโครงสร้างของสารนำยวดยิ่งเป็นแบบอโรทอมบิกโดยค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ a และ b มีค่าใกล้เคียงกับ Y123 และ c มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้น สารทั้งหมดมีขนาดของเกรนประมาณ 0.8 ไมโครเมตร และมีปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนเช่นเดียวกับ Y123

คำสำคัญ: ตัวนำยวดยิ่ง อุณหภูมิวิกฤต ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

THE PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF THE NEW YBaCuO
SUPERCONDUCTORS



AN ABSTRACT
BY
THITIPONG KRUAEHONG

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Doctor of Philosophy Degree in Physics
at Srinakharinwirot University

November 2011

Thitipong Kruaehong. (2011). *The Preparation and Characterization of The New YBaCuO Superconductors*, Ph.D.(Physics).Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc.Prof.Dr.Pongkaew Udomsamuthirun, Dr.Supitch Khemmani, Dr.Suppadate Sujinnapram.

In this research, the new YBaCuO superconductors synthesized by solid state reaction. The preparation was made by setting the chemical formulae that the amount of yttrium atoms plus barium atoms equal to the amount of copper atoms. From this approach, the five new formulae of YBaCuO superconductors were synthesized ie., Y156, Y3-8-11, Y5-8-13, Y7-11-18 and Y13-20-33 where the 1st, 2nd and 3rd number refer to the number of Y-atom, the number of Ba-atom and the number of Cu-atom, respectively. The precursor of substances were yttrium oxide(Y₂O₃), barium carbonate(BaCO₃) and copper oxide(CuO). They were mixed and undergone the three ordered processing ie., calcination, sintering and annealing, respectively. Finally, the samples with approximate dimension of 3 centimetres diameter and 5 millimetres thickness were obtained. The samples were characterized by four probes method to determine the critical temperature, XRD and the Fullprof program to determine the crystal structure, SEM to study surface morphology, EDX to analysis elements and DTA to determine the peritectic temperature. We found that Y358, Y3-8-11 and Y5-8-13 have the highest critical temperature (T_c) at 94 Kelvins and the highest electrical resistivity was found in the Y156. However, all samples had the critical temperature close to that of Y123. Our samples consist of two phases i.e. the superconducting phase and normal phase. The superconducting phase had the Pmmm space group while the normal phase had various space groups. The crystal structure of superconducting phase was orthorhombic that the unit cell of *a* and *b* were closed to that of Y123 and *c* increases as the amount of copper atom increases. All samples had the grain size of 0.8 μm approximately with the similar endothermic reaction as Y123.

Keywords: Superconductor, Critical temperature, Solid state reaction.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO
ของ
ฐิติพงศ์ เครือหงส์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)
วันที่.....เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2554

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์	คณะกรรมการสอบปากเปล่า
.....ประธาน	ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย)
.....กรรมการ	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แหมมณี)	(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ)
.....กรรมการ	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม)	(อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แหมมณี)
	กรรมการ
	(อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม)
	กรรมการ
	(ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ)



งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จาก
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
และโครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีการศึกษา 2551

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำตลอดระยะเวลาการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ และเป็นผู้ขอทุนจากโครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีการศึกษา 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ให้กับข้าพเจ้าตลอดการศึกษาระดับดุษฎีบัณฑิต รวมทั้งอาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แคมมณี ได้แนะนำในการแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ และ อาจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรม ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรมฟูลพรอพ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย และ ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์และคุณอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณธัญนพ นิลกำจร คุณเสริมสุข รัตเร่ง คุณวิวัฒน์ เครือวงศ์ และ คุณณัฐชานันท์ นิลเชษฐ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกการใช้อุปกรณ์เพื่อทำการวิจัย ขอขอบคุณ คุณอภาพงศ์ ชั่งจันทร์ คุณ วชิรินทร์ บุญเอียด คุณสุวัฒน์ รักพาณิชย์ เพื่อนนิสิตปริญญาเอก สาขาวิชาฟิสิกส์และคุณนุศรียา จิตตารมย์ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติๆ ทุกคนที่สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยตลอดมา

ฐิติพงศ์ เครือหงส์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ประวัติความเป็นมาและสมบัติพื้นฐาน.....	1
การค้นพบตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม YBaCuO.....	4
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	7
ความสำคัญของการวิจัย.....	7
ขอบเขตของการวิจัย.....	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	8
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
ทฤษฎีบีซีเอส.....	9
ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว.....	10
ประเภทของตัวนำยิ่งยวด.....	11
การเตรียมตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y123.....	12
การเตรียมตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y124.....	14
การเตรียมตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y247.....	15
การเตรียมตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม Y358.....	16
การเปรียบเทียบโครงสร้างของตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม YBaCuO.....	19
การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว.....	22
การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	24
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวัดเอกซ์เรย์แบบกระจาย	
พลังงาน.....	28
การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์.....	30

บทที่	หน้า
3 กระบวนการทดลอง.....	32
แนวทางการทดลอง.....	32
การเตรียมสารกลุ่ม YBaCuO.....	32
การวัดความต้านทานไฟฟ้าของสาร.....	35
การวัดสมบัติทางฟิสิกส์.....	37
4 ผลการวิจัย.....	38
การศึกษาเบื้องต้น.....	38
การวัดความต้านทานไฟฟ้าของสาร.....	39
การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสาร.....	44
การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	44
การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวและวิเคราะห์ธาตุ.....	52
การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์.....	55
5 สรุป อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	59
สรุปผลการทดลอง.....	59
อภิปรายผลการทดลอง.....	60
ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	68

ตาราง	หน้า
1 อัตราส่วนและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมของยิทเทรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียม.....	33
2 ลักษณะทางกายภาพของสารที่ผ่านกระบวนการเผาขึ้นรูป.....	38
3 ความต้านทานไฟฟ้าของสารที่อุณหภูมิห้อง.....	39
4 ค่าของอุณหภูมิวิกฤตแต่ละช่วงของสาร.....	43
5 จำนวนเปอร์เซ็นต์และกลุ่มปริภูมิของสารนำยวดยิ่งและสารปกติ.....	45
6 ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่งและตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทางของสาร.....	46
7 หน่วยเซลล์และกลุ่มปริภูมิของสารปกติ 3 ชนิด.....	47
8 ตำแหน่งอะตอมของสาร.....	49
9 ค่า R_p , R_{wp} และ χ^2 ของสาร.....	50
10 ตำแหน่งอะตอมของธาตุต่างๆ ของสาร.....	51
11 อัตราส่วนของธาตุยิทเทรียม(Y) แบเรียม(Ba) คอปเปอร์(Cu)และออกซิเจน(O) ของสาร.....	55
12 ค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสารกลุ่มอื่นๆ.....	56

ภาพประกอบ

หน้า

1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทบริสุทธิ์.....	1
2 ตัวนำปกติในสนามแม่เหล็กและตัวนำยิ่งยวดในสนามแม่เหล็ก.....	2
3 ฟลักซ์แม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวดสถานะปกติและฟลักซ์แม่เหล็กขณะเป็นตัวนำ ยิ่งยวด.....	3
4 ค่าคงตัวของการคู่ควบ λ กับอุณหภูมิ.....	5
5 การเกิดการเสียรูปชั่วคราวของไอออนของ Cu^{3+} และ Cu^{2+}	6
6 ปีการค้นพบตัวนำยิ่งยวดกลุ่ม YBaCuO และอุณหภูมิวิกฤต.....	7
7 แผนภาพของอันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดคูคูเปอร์.....	9
8 ตัวนำยิ่งยวดประเภทที่ 1.....	11
9 ตัวนำยิ่งยวดประเภทที่ 2.....	12
10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างของ Y358.....	17
11 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยิ่งยวด Y358.....	18
12 สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยิ่งยวดของ Y358 กับอุณหภูมิ.....	18
13 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยิ่งยวด Y123.....	19
14 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยิ่งยวด Y124.....	20
15 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยิ่งยวด Y247.....	21
16 อุปกรณ์การวัดแบบ 4 ขั้ว.....	22
17 การหาอุณหภูมิวิกฤตของมูราเซและคณะ.....	23
18 อุปกรณ์การวัดด้วยเครื่องเอกซ์เรย์.....	25
19 โปรแกรมฟูลพรอฟ.....	26
20 หลักการทำงานของโปรแกรมฟูลพรอฟ.....	27
21 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
22 หลักการทำงานของเครื่องวัดเอกซ์เรย์สเปกโตรโกปีแบบกระจายพลังงาน.....	30
23 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์.....	31
24 กระบวนการเผาแบบผง.....	34
25 กระบวนการเผาแบบขึ้นรูป.....	34
26 กระบวนการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสาร.....	36

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

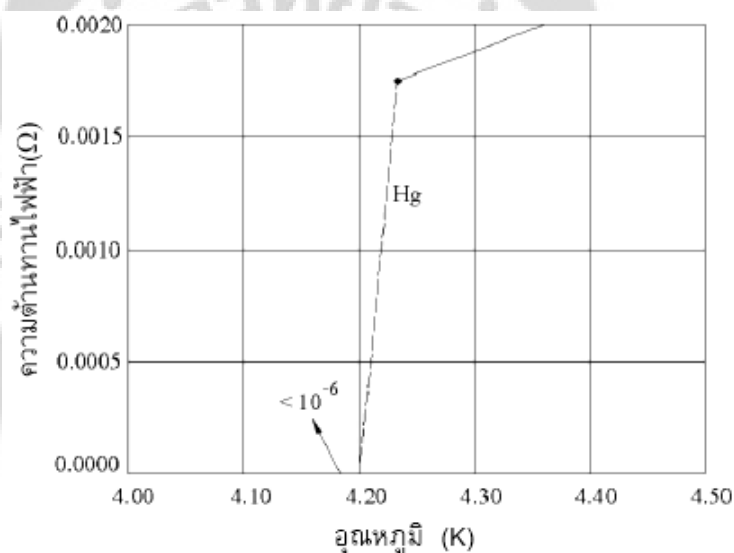
ภาพประกอบ	หน้า
27 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y123 กับอุณหภูมิ.....	40
28 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y156 กับอุณหภูมิ.....	40
29 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y358 กับอุณหภูมิ.....	41
30 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y3-8-11กับอุณหภูมิ.....	41
31 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y5-8-13 กับอุณหภูมิ.....	42
32 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y7-11-18 กับอุณหภูมิ.....	42
33 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y13-20-33 กับอุณหภูมิ.....	43
34 สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของสาร	44
35 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมของคอปเปอร์และความยาวของ c ของสาร...	48
36 ตำแหน่งอะตอมของ Y123.....	51
37 ภาพถ่ายผิวของ Y123.....	52
38 ภาพถ่ายผิวของ Y156.....	53
39 ภาพถ่ายผิวของ Y358.....	53
40 ภาพถ่ายผิวของ Y3-8-11.....	53
41 ภาพถ่ายผิวของ Y5-8-13.....	54
42 ภาพถ่ายผิวของ Y7-11-18.....	54
43 ภาพถ่ายผิวของ Y13-20-33.....	54
44 ปฏิริยาแบบดูดความร้อนของ Y123.....	57
45 ปฏิริยาแบบดูดความร้อนของสาร.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1. ประวัติความเป็นมาและสมบัติพื้นฐาน

ในปี ค.ศ.1911 นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ คาร์เมอร์ลิงก์ ออนเนส (Buckel. 1991: 3) ได้ทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์ โดยใช้ปรอทลงในภาชนะรูปวงแหวนแล้วแช่ลงในฮีเลียมเหลวเพื่อลดอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทลดลงอย่างทันทีทันใดจนมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวิน เขาเรียกสภาพนี้ว่าสภาพนำยวดยิ่ง (superconductivity) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดนี้ว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature: T_c) ดังภาพประกอบ 1



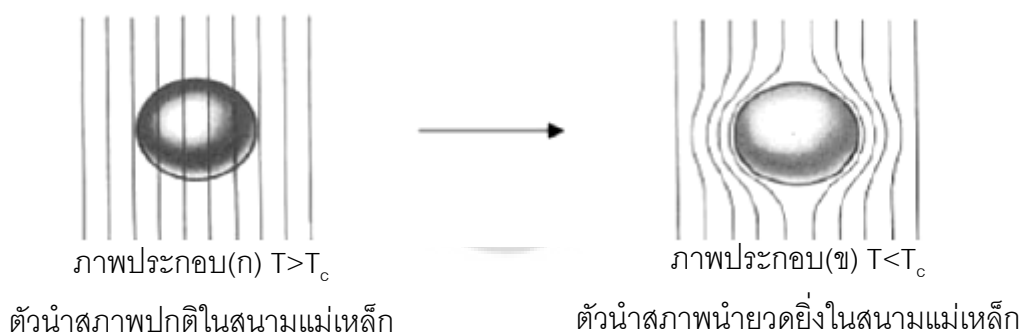
ภาพประกอบ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทบริสุทธิ์

ที่มา: Buckel. (1991). *Superconductivity fundamental and applications*. p. 3.

ในปีเดียวกัน ออนเนส ได้นำปรอทรูปวงแหวนที่มีสภาพนำยวดยิ่งใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปแล้วหยุดจ่ายกระแสพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป จะมีค่าคงตัวตลอดเวลาเนื่องจากไม่มีผลของความต้านทานไฟฟ้าในตัววัสดุ กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่นี้เรียกว่า กระแสยืนยง (persistent current) จากนั้นมาในปี ค.ศ.1913

ออนเนส ได้ศึกษาและค้นพบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่ากระแสค่าหนึ่งสภาพนำยวดยิ่งจะถูกทำลาย เรียกค่ากระแสที่สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้นี้ว่า กระแสวิกฤต (critical current) อีกหนึ่งปีถัดมา ออนเนสได้ค้นพบสมบัติของตัวนำยวดยิ่งอีกประการหนึ่งว่าสนามแม่เหล็กก็สามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้เช่นเดียวกับค่าของกระแสกล่าวคือ ถ้าให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง สนามแม่เหล็กจะสามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้เรียกค่าสนามแม่เหล็กที่ทำลายสภาพนำยวดยิ่งนี้ว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (critical magnetic field: H_c)

ในปี ค.ศ.1933 ไมส์เนอร์และออกเซนเฟลด์ (Meissner; & Ochsenfeld. 1933: 787) ค้นพบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่งอีกประการหนึ่งว่า ถ้าสารมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปจะสามารถทะลุผ่านสารนี้ได้ และถ้าลดอุณหภูมิของสารลงจนกระทั่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสารจะเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่ง จากนั้นใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปอีกครั้งพบว่าสนามแม่เหล็กนี้ไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผิวของตัวนำยวดยิ่งและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นทำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไป เป็นผลให้สนามแม่เหล็กภายในตัวนำยวดยิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ($B = 0$) ทำให้ตัวนำยวดยิ่งมีสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะแมกเนติกแบบสมบูรณ์ (perfect diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 (ก) ตัวนำปกติในสนามแม่เหล็ก (ข) ตัวนำยวดยิ่งในสนามแม่เหล็ก

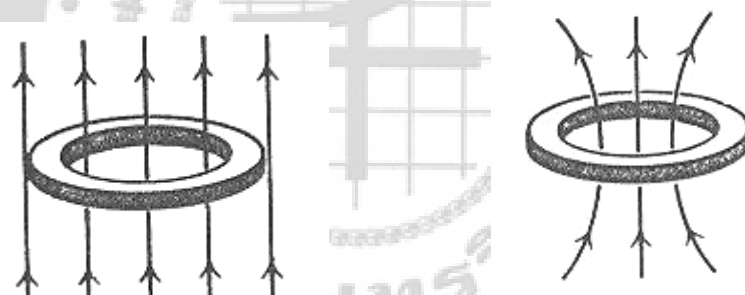
ที่มา: Kittel. (1997). *Introduction to solid state physics*. p. 321.

ในปี ค.ศ. 1950 แมกซ์เวลและเรย์โนลด์ (Maxwell; & Reynold. 1950: 43) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ไอโซโทปโดยพบว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งจะแปรผกผันกับรากที่สองของมวลไอโซโทปตามสมการ

$$T_c \propto M^{-\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

เมื่อ M คือมวลไอโซโทป และ T_c คือ อุณหภูมิวิกฤต

ในปี ค.ศ.1955 เดเวอร์และแฟร์แบงค์ (Deaver; & Fairbank. 1961: 43) ได้ค้นพบฟลักซ์ควอนไทเซชัน (Flux Quantization) โดยการขึ้นรูปสารให้เป็นรูปวงแหวนแล้วใส่สนามแม่เหล็กเข้าไป ในขณะที่สารมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต พบว่าสนามแม่เหล็กดังกล่าวสามารถทะลุผ่านสารนี้ได้ แต่เมื่อลดอุณหภูมิของสารให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสารนี้จะมีสภาพนำยวดยิ่ง แล้วนำสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปออก พบว่าฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกกักอยู่ในวงแหวนของตัวนำยวดยิ่งและมีค่าเท่ากับ $\frac{nhc}{2e}$ เมื่อ n คือ จำนวนเต็ม ดังภาพประกอบ 3



(ก) สถานะปกติ $T > T_c$

(ข) สถานะนำยวดยิ่ง $T < T_c$

ภาพประกอบ 3 (ก) ฟลักซ์แม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่งในสภาพปกติ

(ข) ฟลักซ์แม่เหล็กขณะเป็นตัวนำยวดยิ่ง

ที่มา: Fetter, & Walecka. (1995). *Quantum theory of many particle system*. p. 416.

จากภาพประกอบ 3(ข) สนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนอยู่ในวงแหวนนั้น และจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กลอดผ่านพื้นที่ในวงแหวน โดยมีค่าจากการคำนวณเท่ากับ $\Phi_0 = \frac{hc}{e} = 4 \times 10^{-7} \text{ gauss-cm}^2$ และฟลักซ์ที่วัดจากการทดลองเป็น

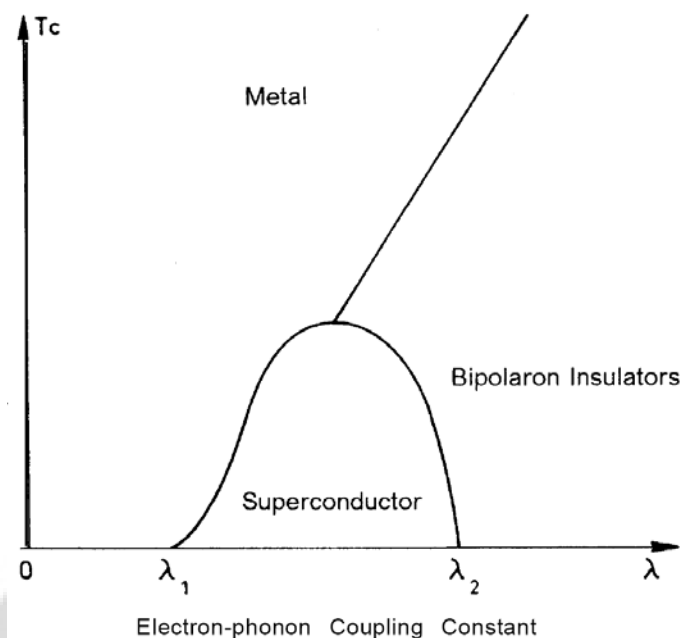
$\Phi_0 = \frac{hc}{2e} = 4.0679 \times 10^{-7} \text{ gauss-cm}^2$ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่า $e^* = 2e$ เมื่อ e^* ประกอบด้วยอิเล็กตรอนสองตัว ทำให้เป็นการยืนยันว่ากลไกของการเกิดสภาพนำยวดยิ่งมาจากคู่คูเปอร์ตามทฤษฎีบีซีเอส (Bardeen; Cooper; & Schriver. 1957: 1175-1204)

2. การค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO

ในปี ค.ศ.1986 เบทนอร์สและมุลเลอร์ (Bednorz; & Muller. 1986: 189) ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารกลุ่ม Ba-La-Cu-O ซึ่งเป็นสารที่มีคอปเปอร์และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เรียกสารประกอบประเภทนี้ว่า คิวเพรต (Cuprate) การเตรียมสารของเบทนอร์สและมุลเลอร์ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยเตรียมสารหลายๆ สัดส่วนซึ่งกำหนดให้เบเรียมต่อแลนทานัมมีสัดส่วนต่างๆ กันและในสารตัวอย่างหนึ่งพวกเขาสามารถพบตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิประมาณ 11 เคลวินได้ และเมื่อได้ทำการเตรียมใหม่และปรับแก้การทดลองและองค์ประกอบของสาร พบว่าพวกเขาสามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ที่มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 35 เคลวิน ซึ่งพวกเขาเล่าว่า (Nobel lecture. p: 442) สารที่เตรียมขึ้นได้จะมีสัดส่วนที่คล้ายกับกลุ่มของฝรั่งเศสแต่พวกเขาโชคดีกว่ามาก เนื่องจากกลุ่มของฝรั่งเศสเตรียมสารด้วยวิธี wet-chemical process ซึ่งไม่สามารถทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งได้ แต่พวกเขาใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งซึ่งสามารถทำให้เกิดชั้นของโครงสร้างแบบเพอร์อฟสไกต์ (perovskite) ได้และต่อมาพบว่า เป็นเงื่อนไขที่สำคัญของการเกิดสภาพนำยวดยิ่งในสารกลุ่มนี้ด้วย พวกเขาคิดว่าการค้นพบนี้เป็นการค้นพบที่ยิ่งใหญ่ จึงได้เสนองานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ โดยไม่ได้ทำการวัดสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งบทความของพวกเขามีชื่อ “Possible High T_c Superconductivity in Ba-La -Cu-O System” (Bednorz; & Muller. 1986: 189) และในปีถัดมาพวกเขาได้รับรางวัลโนเบลจากการค้นพบครั้งนี้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นรางวัลโนเบลที่มีช่วงเวลาการค้นพบถึงเวลาในการประกาศรางวัลที่สั้นที่สุด การค้นพบของเบทนอร์สและมุลเลอร์นี้ทำให้กลุ่มนักฟิสิกส์คาดกันว่ามีโอกาสค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิห้อง การแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งนี้สามารถแบ่งได้จากอุณหภูมิวิกฤตได้อีกทางหนึ่งโดย ถ้าตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นไม่เกิน 35 เคลวิน เรียกตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ว่าตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม (Conventional superconductors) และเรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นสูงกว่า 35 เคลวินว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High temperature superconductors) (Murakami. 1999: 1)

ก่อนการค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้เบทนอร์สและมุลเลอร์ได้พยายามศึกษาสิ่งที่ทำให้ตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นที่สูงขึ้น จากการรายงานพบว่าในสารที่เกิดโพลาารอน (polaron) ดังภาพประกอบ 4 สามารถทำให้มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นได้ โดยจะมีภาวะที่เหมาะสมและอยู่

ในช่วงที่จำกัด ซึ่งเป็นแนวความคิดที่ถูกเสนอโดยฮ็อคและคณะ (Hock; & et al. 1983: 273) ในปี ค.ศ.1983 โดยเรียกแบบจำลองนี้ว่า แจนเทลเลอร์โพลารอน(Jahn-Teller polaron)

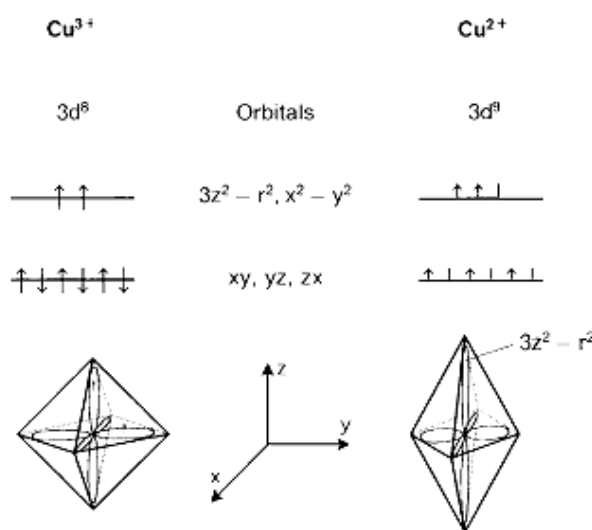


ภาพประกอบ 4 ค่าคงตัวของการคู่ควบ λ กับอุณหภูมิ

ที่มา: Bednorz; & Muller. (1986). *Nobel lecture*. p. 427.

แบบจำลองแจนเทลเลอร์โพลารอนใช้อธิบายโครงสร้างของโมเลกุลที่ซับซ้อนหรือไม่เป็นเชิงเส้นที่มีการซ้อนทับกัน(degeneracy)ของพลังงานตัวนำทำให้เกิดการเสียรูปได้ชั่วคราว (spontaneous distort) สำหรับโลหะทรานซิชัน(transition metal) ซึ่งเบทนอสและมุลเลอร์พบว่าไอออนของ Ni^{3+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้

โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งประเภทคิวเพรท มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนซึ่งทำให้เกิดการเสียรูปของโครงสร้างคือ ไอออนของ Cu^{2+} โดยอิเล็กตรอนของ Cu^{2+} และ Cu^{3+} ซึ่งเป็นโพลารอนจะต้องอยู่ในสถานะผสมกัน และสถานะของ Cu^{2+} และ Cu^{3+} จะต้องเกิดการจับคู่กัน (Terrell. 1991: 88) จากภาพประกอบ 5 เห็นว่า Cu^{2+} ที่มีอยู่ในโครงสร้างจะเกิดการบิดเบี้ยวมากกว่า Cu^{3+}



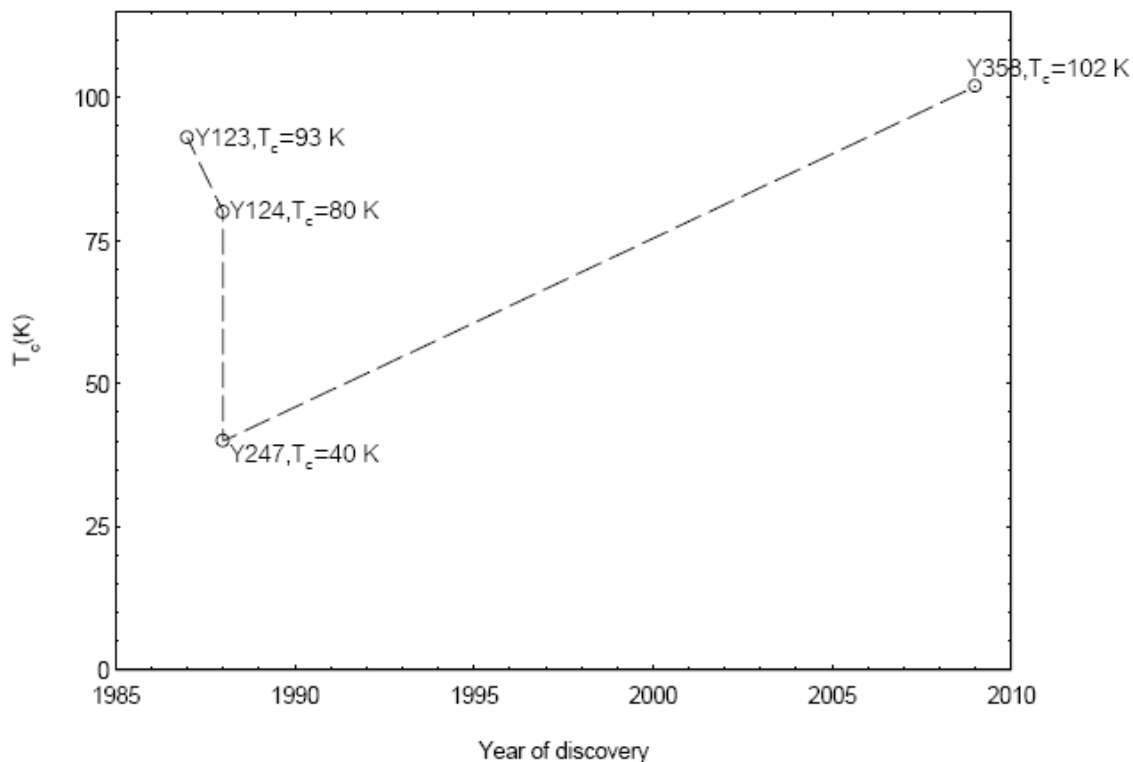
ภาพประกอบ 5 การเกิดแฉกของออร์บิทัลของไอออน Cu^{3+} มีระดับพลังงาน $3d^6$ แสดงพลังงานแบบครึ่ง (half filled) และ Cu^{2+} มีระดับพลังงาน $3d^9$ จะเกิดการเสียรูปชั่วขณะ

ที่มา: Bednorz; & Muller. (1986). *Nobel lecture*. p. 428.

ในปี ค.ศ.1987 กลุ่มวิจัยของวูและคณะ (Wu; & et al. 1987: 908) ได้ใส่ยทเทรียม (Yttrium) แทนที่ในกลุ่มแลนทานัม (Lanthanum) ทำให้อุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจากเดิม 35 เคลวิน เป็น 93 เคลวิน สาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นเนื่องจากอะตอมของยทเทรียมมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของแลนทานัม ทำให้มีช่องว่างระหว่างอะตอมเพิ่มมากขึ้นจึงเกิดการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า เรียกตัวนำยวดยิ่งที่มียทเทรียมเป็นองค์ประกอบนี้ว่า Y123

การค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ทำให้ได้ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวเป็นครั้งแรก นำมาซึ่งความตื่นเต้นในวงการฟิสิกส์เนื่องจากไนโตรเจนที่ใช้เป็นสารหล่อเย็นในการลดอุณหภูมิมีราคาถูก หลังจากที่มีการพบ Y123($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) ในปี ค.ศ.1987 แล้วได้มีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มยทเทรียม ในปี ค.ศ.1988 คือ Y124($\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_{8-x}$) โดยมาร์ชและคณะ(Marsh; et al. 1988: 141)ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 80 เคลวิน และ Y247($\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-x}$)โดยบอเดตและคณะ (Bordet; et al. 1988: 569) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 40 เคลวิน จนกระทั่งในปี ค.ศ.2009 อะไลบาดีและคณะ(Aliabadi; et al. 2009: 2012)ได้พบ Y358($\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$)ที่มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นสูงถึง 102 เคลวิน ภาพประกอบ 6 แสดงปีการค้นพบและอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มยทเทรียม จากปี ค.ศ.1987 ถึง ปี ค.ศ.2009 ซึ่งเป็นข้อมูล

ข้างต้นที่ผู้วิจัยพยายามเตรียมนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่เพื่อให้มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นสูงกว่า Y358 ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการเตรียมและการวัดสมบัติต่างๆ จะได้กล่าวในลำดับต่อไป



ภาพประกอบ 6 ปีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO และอุณหภูมิวิกฤต

3. ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO ได้แก่ อุณหภูมิวิกฤต หน่วยเซลล์ (lattice parameter) เฟสส่วนผสม กลุ่มปริภูมิ (space group) และอุณหภูมิเพอริเทคติก (peritectic temperature)

4. ความสำคัญของการวิจัย

ทำให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมและศึกษากระบวนการวัดสมบัติของตัวนำยวดยิ่งชนิดใหม่และมีความเข้าใจในสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO มากยิ่งขึ้น

5. ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถเตรียมนำยวดยี่ห้อใหม่กลุ่ม YBaCuO ได้
2. สามารถสร้างชุดอุปกรณ์เพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตขึ้นเองได้
3. สามารถศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารโดยใช้เครื่องมือดังนี้

3.1 ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) และสามารถหาหน่วยเซลล์ เฟสส่วนผสม และกลุ่มปริภูมิที่เป็นองค์ประกอบของสารด้วยการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมฟูลพรอฟ (Fullprof)

3.2 ศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) และวิเคราะห์ธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDX)

3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิด้วยการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential Thermal Analysis: DTA) เพื่อหาอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของตัวนำยวดยี่ห้อใหม่

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ทราบถึงกระบวนการเตรียมนำยวดยี่ห้อใหม่กลุ่ม YBaCuO ได้ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
2. สามารถสร้างชุดอุปกรณ์เพื่อหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยี่ห้อโดยใช้วิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว
3. ทราบโครงสร้างและสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของตัวนำยวดยี่ห้อใหม่กลุ่ม YBaCuO
4. เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมนำยวดยี่ห้อสูตรอื่นๆ
5. เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมนำยวดยี่ห้อแบบฟิล์ม

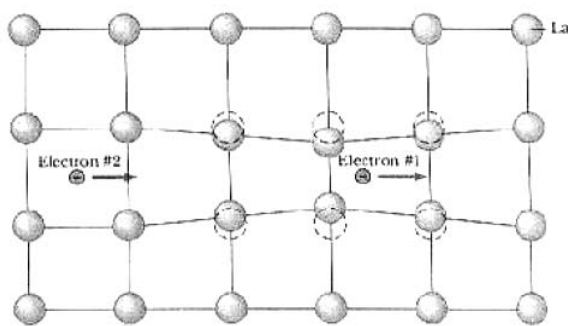
บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่สามารถอธิบายสมบัติของตัวนำยิ่งยวดและปรากฏการณ์เกี่ยวกับตัวนำยิ่งยวดได้กว้างขวางและครอบคลุมกว่าทฤษฎีอื่นคือทฤษฎีบีซีเอสซึ่งถูกนำเสนอโดย บาร์ดีน คูเปอร์และشريฟเฟอร์ (Bardeen, Cooper; & Schrieffer. 1957: 1175) และ ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว (Ginzburg; & Landau. 1950: 1064) ซึ่งสามารถอธิบายทฤษฎีทั้งสองได้ดังนี้

1. ทฤษฎีบีซีเอส

ทฤษฎีบีซีเอสเป็นทฤษฎีถูกนำเสนอโดยบาร์ดีน คูเปอร์และشريฟเฟอร์ ในปี ค.ศ.1957 เป็นทฤษฎีที่สามารถใช้อธิบายกลไกการเกิดและสมบัติต่างๆ ของตัวนำยิ่งยวดได้ดีที่สุดจนกระทั่งถึงปัจจุบัน ทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีแบบจุลภาค(Microscopic theory) ที่แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอน โดยมีแนวคิดที่ว่า กลไกของการเกิดสภาพนำยิ่งยวดเกิดจากการดึงดูดกันของอิเล็กตรอนสองตัว ซึ่งอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นลบ ตามหลักการทั่วไปประจุที่เหมือนกันจะผลักรันแต่ทฤษฎีบีซีเอสกลับเสนอว่ากลไกการเกิดสภาพนำยิ่งยวดจะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนสองตัวดึงดูดกันภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมโดยอันตรกิริยาแบบดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนสองตัวภายในตัวนำยิ่งยวดนี้จะอาศัยโฟนอนเป็นสื่อกลางในการจับคู่อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนที่สามารถจับคู่กันจะต้องมีโมเมนตัมและสปินตรงข้ามกัน



ภาพประกอบ 7 แผนภาพของอันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดคู่คูเปอร์

ที่มา: Buckel. (1991). *Superconductivity fundamental and applications*. p. 31.

อันตรกิริยาทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไประหว่างกลุ่มไอออนที่มีประจุบวก และอิเล็กตรอนตัวนี้จะดึงดูดไอออนบวกในบริเวณรอบๆ ให้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ ทำให้บริเวณรอบๆ อิเล็กตรอนตัวนี้มีความหนาแน่นของไอออนบวกเพิ่มขึ้น ทำให้มีผลกระทบต่ออิเล็กตรอนตัวที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณนั้น โดยอิเล็กตรอนตัวนี้จะถูกกลุ่มไอออนบวกดึงดูดให้เข้าใกล้กับอิเล็กตรอนตัวแรก ทำให้ดูเหมือนว่าอิเล็กตรอนตัวแรกดึงดูดอิเล็กตรอนตัวใกล้ เรียกอิเล็กตรอนที่เกิดการจับคู่กันว่า คู่อุปเปอร์ (Cooper pair)

2. ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดอว

ในปี ค.ศ.1935 ฟิรื่องตระกูลลอนดอน (London F.; & London H. 1935: 71) เป็นผู้ให้นำเสนอทฤษฎีแบบปรากฏการณ์ (Phenomenological theory) ที่สามารถอธิบายตัวนำยวดยิ่งได้ประสบความสำเร็จ และสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ไมสเนอร์ได้ดี ลอนดอนได้นำเสนอการประยุกต์ใช้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell equation) ในระบบตัวนำยวดยิ่ง โดยกำหนดให้การนำไฟฟ้าในตัวนำยวดยิ่งเกิดจากอิเล็กตรอนยวดยิ่ง (super electrons) ที่มีสมบัติแบบของไหลอุดมคติ (Ideal Fluid) กล่าวคือเป็นของไหลที่ไม่มีความหนืดและไม่ถูกอัด โดยลอนดอนได้กำหนดค่าคงตัว λ_L ต่อมาถูกเรียกว่า ความลึกซาบซึมได้ของลอนดอน (London penetration depth) เป็นตัวแปรแบบปรากฏการณ์ (Phenomenological parameter) และในปัจจุบันค่า λ_L ได้ถูกนำมาใช้ในการกำหนดสมบัติและประเภทของตัวนำยวดยิ่งอย่างกว้างขวาง

ต่อมากินซ์เบิร์กและแลนดอวได้นำแนวคิดของลอนดอนมาประยุกต์โดยกำหนดให้ระบบของตัวนำยวดยิ่งมีตัวแปรของความเป็นระเบียบเกิดขึ้นเพื่อใช้ในการอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กและทฤษฎีที่ใช้อธิบายแบบมหภาค (Macroscopic theory) จึงได้ละเว้นไม่ได้พิจารณาอันตรกิริยาของอิเล็กตรอน แต่จะดูผลที่เกิดขึ้นแทน ดังนั้นจึงมีข้อบกพร่องอยู่ที่ไม่สามารถอธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนในตัวนำยวดยิ่งทำอันตรกิริยากันอย่างไร ซึ่งจากทฤษฎีนี้ตัวนำยวดยิ่งเมื่อถูกนำมาประยุกต์ใช้งานด้านแม่เหล็กพบว่าตัวนำยวดยิ่งถูกแบ่งเป็นสองประเภทคือตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 ส่วนใหญ่จะเป็นธาตุมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตน้อยและตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 เป็นสารประกอบมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตสูงกว่าประเภทที่ 1 มาก

ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดอวได้จัดประเภทของตัวนำยวดยิ่งใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวอาพันธ์ (coherence length: ξ) และ ความลึกซาบซึมได้ของลอนดอน λ_L โดยกำหนดพารามิเตอร์ κ ขึ้นมา ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวอาพันธ์ และความลึกซาบซึมได้ของลอนดอน คือ

$$\kappa = \frac{\lambda_L}{\xi} \quad (2.1)$$

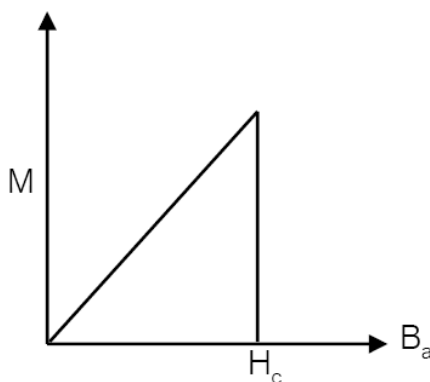
สามารถแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งได้โดยใช้ค่า κ เป็น $\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}}$ สำหรับตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และ $\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}$ สำหรับตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2

3. ประเภทของตัวนำยวดยิ่ง

การแบ่งประเภทของตัวนำยวดยิ่งโดยใช้สมมติฐานทางแม่เหล็กเป็นเกณฑ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 และตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2

3.1 ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1

ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 มีประมาณ 30 ชนิดโดยส่วนใหญ่จะเป็นธาตุ ตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต(critical magnetic field: H_c) จะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์อย่างสมบูรณ์และมีพฤติกรรมตามภาพประกอบ 8 เมื่อ M คือ ค่าความเป็นแม่เหล็ก(Magnetization) และ B_a คือสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไป ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งประเภทนี้มีค่าสูงไม่เพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

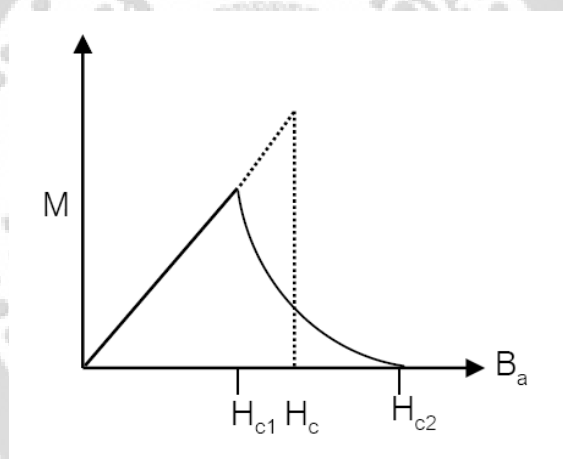


ภาพประกอบ 8 ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1

ที่มา: Buckel. (1991). *Superconductivity fundamental and applications*. p. 115.

3.2 ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2

ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 โดยส่วนใหญ่เป็นโลหะผสมและสารประกอบซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต 2 ค่า คือ สนามแม่เหล็กวิกฤตล่าง (lower critical magnetic field: H_{c1}) และ สนามแม่เหล็กวิกฤตบน H_{c2} (upper critical magnetic field: H_{c2}) เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าน้อยกว่า H_{c1} ตัวนำยวดยิ่งจะมีสภาพเป็นตัวนำยวดยิ่งอย่างสมบูรณ์ คือ แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์อย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกับตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 1 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่ามากกว่า H_{c1} แต่น้อยกว่า H_{c2} ตัวนำยวดยิ่งนี้จะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กส่วนหนึ่งสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ เรียกสถานะนี้ว่าสถานะผสม (mixed state) และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่ามากกว่า H_{c2} ตัวนำยวดยิ่งจะกลายเป็นสถานะปกติ ดังภาพประกอบ 9 โดยทั่วไปแล้วตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2 นี้จะมีค่า H_{c2} ที่สูงจึงนิยมใช้ตัวนำยวดยิ่งประเภทนี้มาประยุกต์ใช้งาน



ภาพประกอบ 9 ตัวนำยวดยิ่งประเภทที่ 2

ที่มา: Buckel. (1991). *Superconductivity fundamental and applications*. p. 137.

4. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123

ในปี ค.ศ.1987 ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย วูและคณะ (Wu; & et al.1987: 908) การเตรียมสารนี้ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้น คือ ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) การวัดอุณหภูมิวิกฤตใช้วิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว (four-probes) และใช้สารที่มีขนาด $1 \times 0.5 \times 4$ มิลลิเมตร การวัดอุณหภูมิวิกฤตใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค พบว่าสามารถวัดค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้น ($T_{c\text{onset}}$) ได้เท่ากับ 93 เคลวิน

ในปี ค.ศ.2001 คอร์ดอร์ (Corder. 2001: 41) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 มีสารตั้งต้นคือ ยิพเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และ คอปเปอร์ออกไซด์ แล้วทำการเผาแบบผงที่อุณหภูมิ 890 องศาเซลเซียส, 920 องศาเซลเซียส และ 935 องศาเซลเซียส ตามลำดับในบรรยากาศปกติ กระบวนการเผาแต่ละอุณหภูมิใช้เวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นบดสารจากกระบวนการนี้ให้มีขนาดของอนุภาคประมาณ 10-20 ไมโครเมตร แล้วนำสารไปสู่กระบวนการเผาแบบขึ้นรูปอีกครั้งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง กระบวนการเผาสุดท้ายจะให้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง นำสารที่ได้ไปวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว พบว่าอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 93 เคลวิน

ในปี ค.ศ.2006 กลุ่ม Materials Chemistry (chem. super. 2006. (online)) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นคือ ยิพเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และ คอปเปอร์ออกไซด์ นำสารทั้งสามผสมให้เข้ากันแล้วอัดขึ้นรูป วางสารที่ได้บนแผ่นอะลูมินา เริ่มกระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ลดอุณหภูมิจากอุณหภูมินี้ มายังอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วคงที่อุณหภูมิไว้ 16 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง นำสารที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่องเอกซเรย์ เพื่อหาค่าของหน่วยเซลล์ พบว่า รูปแบบโครงสร้างของสารเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (orthorhombic) มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.817$ อังสตรอม(Å) $b = 3.882$ อังสตรอม(Å) และ $c = 11.671$ อังสตรอม(Å) และมีกลุ่มปริภูมิของระบบผลึก (space group) เป็นแบบ Pmmm

ในปี ค.ศ.2007 ดูล (chabanoisedric. tripod. 2007. (online)) ได้เตรียม Y123 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นประกอบด้วย ยิพเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ นำสารทั้งสามผสมให้เข้ากันแล้วใส่แอซีโตน (acetone) นำสารที่ผสมแล้วใส่ในถ้วยอะลูมินา และทำการเผาในเตาเผาแบบท่อที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิมาสู่อุณหภูมิห้อง บดสารโดยไม่ใส่แอซีโตน นำสารที่ได้ไปเผาแบบผงอีกครั้งที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง บดสารโดยผสมแอซีโตน นำสารที่มีลักษณะเป็นผงไปอัดขึ้นรูปด้วยแรง 5,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว(psi) จะได้สารที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร มีความหนา 3 มิลลิเมตร นำสารที่อัดขึ้นรูปใส่ในถ้วยอะลูมินาที่วางอยู่ในท่อควอทซ์ เริ่มกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วให้ออกซิเจนที่อุณหภูมินี้ด้วยอัตรา 10 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิห้องและวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว พบว่าสารมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 93 เคลวิน

5. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y124

ในปี ค.ศ.1988 มาร์ชและคณะ (Marsh; & et al. 1988: 141) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง Y124 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_{8-x}$) พบว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y124 เป็นตัวนำยวดยิ่งที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างของ Y123 ในโครงสร้างของ Y124 มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของ a และ b มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของ a และ b ใน Y123 แต่มีความแตกต่างกันในค่าคงตัวของ c โดยสารกลุ่มนี้มีค่าคงตัวของ c เท่ากับ 27.2 อังสตรอม และมีกลุ่มปริภูมิของระบบผลึกเป็นแบบ Ammm มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 80 เคลวิน ด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว

ในปี ค.ศ.1995 ไฮจาร์และคณะ (Hijar; et al. 1995: 13) ได้ทดลองศึกษาโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง Y124 โดยมีการใส่แคลเซียม (Ca) จำนวน 0.02 โมลลงไป มีสูตรทางเคมีของสารกลุ่มนี้เป็น $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ พบว่าตัวนำยวดยิ่งที่ได้มีกลุ่มปริภูมิของระบบผลึกเป็นแบบ Ammm มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ เท่ากับ $a = 3.82$ อังสตรอม $b = 3.86$ อังสตรอม และ $c = 27.11$ อังสตรอม

ในปี ค.ศ.1997 เฮดและคณะ (Hegde; et al. 1997: 1147) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y124 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นประกอบด้วย ยิทเทรียมออกไซด์, แบเรียมไนเตรต $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ และคอปเปอร์ออกไซด์ มีความบริสุทธิ์ 99.99% ใส่โซเดียมออกซาลेट ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0.2 โมล เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการเตรียมสาร จากนั้นเริ่มต้นกระบวนการเผาแบบผงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที บดสารแล้วอัดขึ้นรูปเป็นแท่งสี่เหลี่ยม นำสารที่ได้เข้าสู่กระบวนการเผาแบบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และให้ออกซิเจนที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส คงที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำสารที่ได้ศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าสารมีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ $a = 3.835$ อังสตรอม $b = 3.860$ อังสตรอม และ $c = 27.200$ อังสตรอม มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 80 เคลวิน

ในปี ค.ศ.1998 เชียงและคณะ (Zheng; et al. 1998: 1213) เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y124 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นประกอบด้วย ยิทเทรียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แบเรียมไนเตรต $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ คอปเปอร์ไอโอไดด์ (CuI) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) เริ่มกระบวนการเผาแบบผงที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นบดสารที่ได้และอัดสารเป็นแท่งสี่เหลี่ยมมีขนาด $15 \times 3 \times 0.4$ มิลลิเมตร นำสารไปสู่กระบวนการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงอีกครั้ง นำสารที่ได้มาศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อหาค่าคงตัวของหน่วยเซลล์พบว่าค่า $a = 3.85$ อังสตรอม $b = 3.87$ อังสตรอม และ $c = 27.21$ อังสตรอม สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นได้เท่ากับ 82 เคลวิน ด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว

ในปี ค.ศ.2007 สโตรีและคณะ (Storey; et al. 2007: 31) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งของกลุ่ม Y124 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_{8-x}$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งมีสารตั้งต้นประกอบด้วย ยิทเทรียมออกไซด์มีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ แบเรียมคาร์บอเนตมีความบริสุทธิ์ 99.98 เปอร์เซ็นต์ และคอปเปอร์ออกไซด์ มีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ นำสารที่ผสมแล้วไปสู่กระบวนการเผาแบบผงในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำสารไปสู่กระบวนการเผาแบบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดสารแล้วอัดสารใหม่อีกครั้งจากนั้นนำไปสู่กระบวนการเผาแบบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 930 935 940 และ 950 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภายใต้ความดัน 60 บาร์บรรยากาศออกซิเจน โดยกระบวนการเผาแต่ละอุณหภูมิใช้เวลา 10 ชั่วโมง ในขั้นตอนสุดท้ายลดอุณหภูมิจาก 950 องศาเซลเซียส มายังอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 ชั่วโมงแล้วลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิห้อง โดยจะต้องใช้เวลามากกว่า 6 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการแตกของเนื้อสารเนื่องจากความเครียดซึ่งเกิดจากความร้อนและวัดอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นได้เท่ากับ 80 เคลวิน

6. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y247

ในปี ค.ศ.1998 คาโต้และคณะ (Kato; et al. 1998: 266) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y247 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นประกอบด้วย ยิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์มีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ นำสารที่ผสมแล้วอัดขึ้นรูปและนำไปสู่กระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ จากนั้นเผาแบบขึ้นรูปอีกครั้งที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และใส่ก๊าซไฮโดรเจน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่ได้ใส่ในท่อควอทซ์แล้วเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ภายใต้ความดัน 5 บาร์บรรยากาศออกซิเจน ลดอุณหภูมิจาก 950 องศาเซลเซียส อย่างรวดเร็ว(quench) ในน้ำ นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และใส่ออกซิเจน จากการศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าสารนี้มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.841$ อังสตรอม $b = 3.877$ อังสตรอม และ $c = 50.473$ อังสตรอม มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 65 เคลวิน

ในปี ค.ศ.1998 อะบากูมอฟและคณะ (Abakumov; et al. 1998: 155) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y247 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง การเตรียมสารใช้สารตั้งต้นคือ Y123 และ คอปเปอร์ออกไซด์ นำสารที่ผสมกันแล้วไปสู่กระบวนการเผาแบบผง ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 20 กิโลบาร์บรรยากาศออกซิเจน จะได้ตัวนำยวดยิ่งของกลุ่ม Y247 มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{14.92}$ จากนั้นนำสารสูตรนี้ไปอบโดยใส่ก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 625 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ควบคุมบรรยากาศออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 10^{-3} บรรยากาศ เมื่อสารผ่าน

กระบวนการนี้จะได้นำยวดยิ่งของกลุ่ม Y247 มีสูตรทางเคมีเป็น $Y_2Ba_4Cu_7O_{14.09}$ นำสารทั้งสองสูตรไปทำการศึกษาโครงสร้างและอุณหภูมิวิกฤตพบว่า ตัวนำยวดยิ่งที่มีสูตรทางเคมีเป็น $Y_2Ba_4Cu_7O_{14.92}$ มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.836$ อังสตรอม $b = 3.879$ อังสตรอม และ $c = 50.363$ อังสตรอม มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 80 เคลวิน และอีกสูตรหนึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $Y_2Ba_4Cu_7O_{14.09}$ มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.849$ อังสตรอม $b = 3.869$ อังสตรอม และ $c = 50.794$ อังสตรอม มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 30 เคลวิน

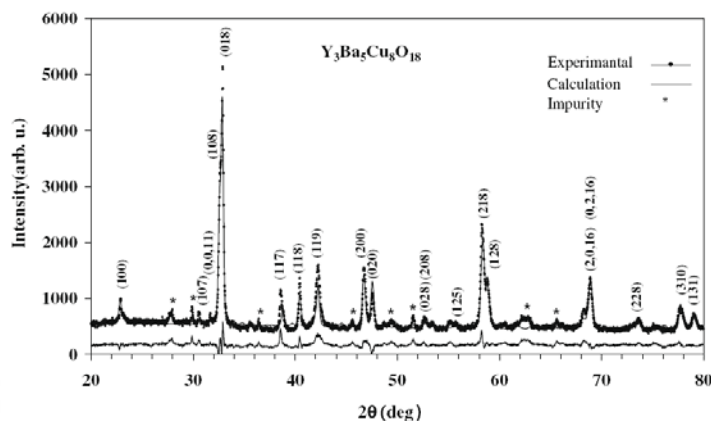
ในปี ค.ศ.2008 ฟุคุชิม่าและคณะ (Fukushima; et al. 2008: 1) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งของกลุ่ม Y247 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยใช้สารตั้งต้นประกอบด้วย Y123 และ คอปเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมล นำสารที่ผสมแล้วเผาแบบผงแล้วนำไปบดเพื่ออัดขึ้นรูป นำสารที่ได้จากการอัดใส่ในท่อควอทซ์แล้วเริ่มกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 975 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 0.8 เมกกะปาสคาล(MPa) ในบรรยากาศออกซิเจนเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่ได้ศึกษาโครงสร้างของสารโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่ามีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.844$ อังสตรอม $b = 3.878$ อังสตรอม และ $c = 50.464$ อังสตรอม วัดค่าอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นได้เท่ากับ 82 เคลวิน

ในปี ค.ศ.2009 ซาโต้และคณะ (Sato; et al. 2010: 17) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y247 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้กระบวนการเผาแบบขึ้นรูปในท่อควอทซ์ ที่อุณหภูมิระหว่าง 940-975 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 0.4-1.6 เมกกะปาสคาล(MPa) บรรยากาศออกซิเจน จากนั้นอบสารโดยใส่ก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส การหาค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.83$ อังสตรอม $b = 3.87$ อังสตรอม และ $c = 50.45$ อังสตรอม มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 60 เคลวิน

7. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y358

ในปี ค.ศ.2009 อะลีบาดีและคณะ (Aliabadi; et al. 2009: 2012) ได้เตรียมตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่คือ Y358($Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นประกอบด้วย ยิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และ คอปเปอร์ออกไซด์ นำสารที่ผสมแล้วไปสู่กระบวนการเผาแบบผงที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิห้องภายใน 5 ชั่วโมง แล้วเผาด้วยวิธีการเดียวกันนี้อีกสองครั้ง บดสารให้เป็นผงและนำไปอัดขึ้นรูปด้วยแรง 10 ตัน ต่อตารางเซนติเมตร จะได้สารมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีความหนา 1 มิลลิเมตร นำสารที่ได้เผาแบบขึ้นรูป เริ่มกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 930 องศาเซลเซียส คงที่อุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศ

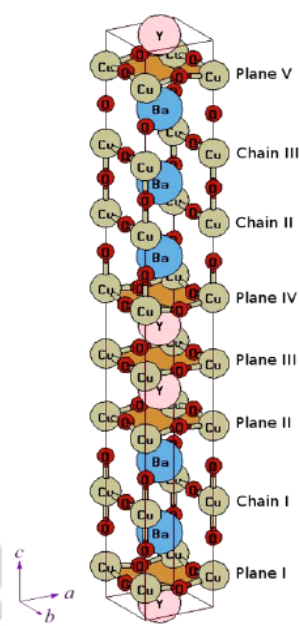
ปกติ ลดอุณหภูมิลงมายัง 500 องศาเซลเซียส ให้ออกซิเจนที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำสารที่ได้ ศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้โปรแกรม MAUD เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ พบว่ามีค่าเท่ากับ $a = 3.888$ อังสตรอม $b = 3.823$ อังสตรอม และ $c = 31.013$ อังสตรอม และมีกลุ่มปริภูมิของระบบผลึกเป็นแบบ Pmm2 มีผลการทดลองดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างของ Y358

ที่มา: Aliabadi; et al. (2009). *Physica C*. p. 2013.

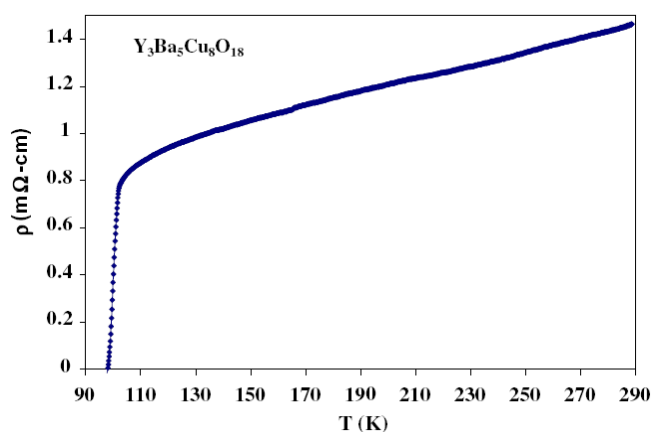
ทาวานาและคณะ (Tavana; et al. 2010: 79) ได้ใช้ทฤษฎีดีเอฟที (Density Functional Theory: DFT) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างของ Y358 ให้เป็นภาพ 3 มิติ พบว่า 1 หน่วยเซลล์ของ Y358 ประกอบไปด้วยระนาบของ CuO_2 อยู่ 5 ระนาบ และมี Cu-O อยู่ 3 พันระ ดังภาพประกอบ 11 ส่วนค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ ของ a และ b มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าของ a และ b ของ Y123 แต่ค่าของ c ของ Y358 มีค่ามากกว่าค่าของ c ของ Y123 เกือบ 3 เท่า



ภาพประกอบ 11 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y358

ที่มา: Tavana; et al. (2010). *Euro Physics Journal. B.* p. 80.

การวัดความต้านทานไฟฟ้า(Tavana; et al. 2009: 2) ใช้สารที่มีลักษณะเป็นก้อนมีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร และหนา 1 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว โดยใช้การเงินประสานขั้วและใช้ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 มิลลิแอมแปร์ วัดอุณหภูมิโดยใช้ Pt resistor และ GaAs ไดโอด พบว่าค่าอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นของสารกลุ่มนี้มีค่าสูงถึง 102 เคลวิน ดังภาพประกอบ 12 ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิวิกฤตที่สูงที่สุดในตัวนำยวดยิ่ง YBaCuO ที่มีรายงานจนถึงปี ค.ศ. 2009

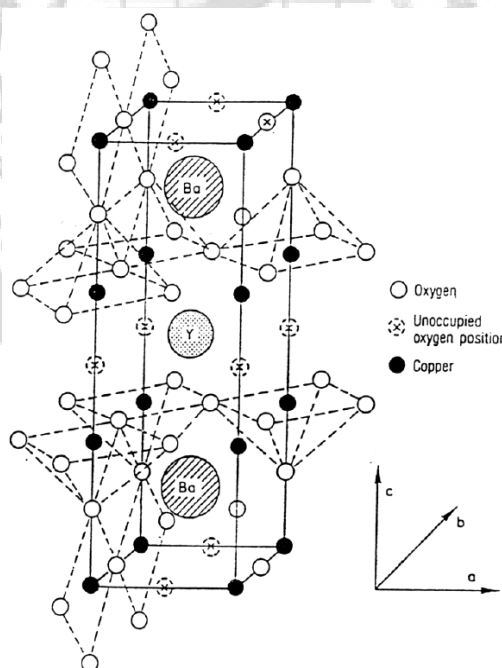


ภาพประกอบ 12 สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งของ Y358 กับอุณหภูมิ

ที่มา: Aliabadi; et al. (2009). *Physica C.* p. 2012.

8. การเปรียบเทียบโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO

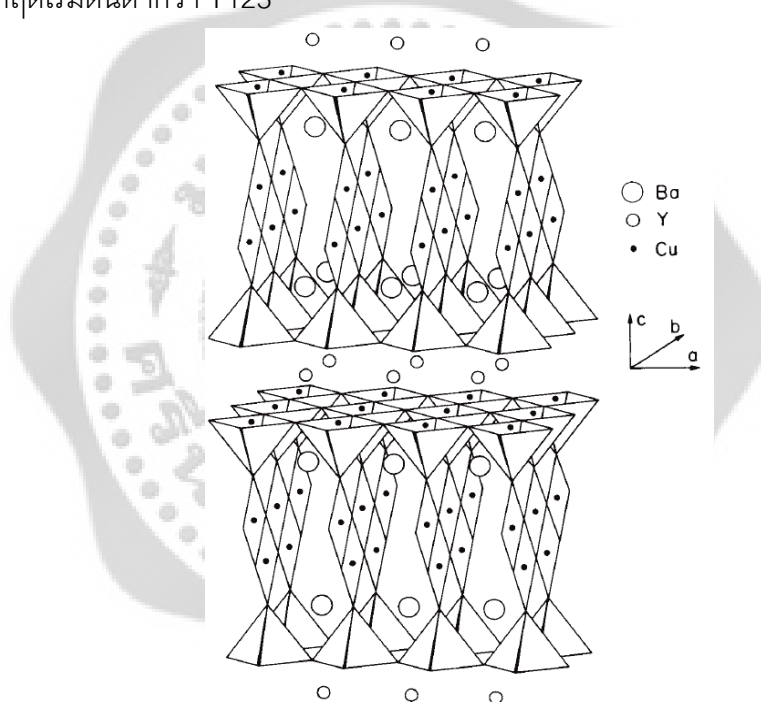
ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ที่ถูกค้นพบโดยอูและคณะในปี 1987 มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ สารนี้ใน 1 หน่วยเซลล์ประกอบไปด้วยอะตอมของยิทเทรียม 1 อะตอม มีพันธะของ Cu-O อยู่ 1 พันธะ อะตอมของแบเรียมอยู่ 2 อะตอมและมีระนาบของ CuO_2 อยู่ 2 ระนาบ อีกทั้งจำนวนอะตอมของยิทเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมจะมีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ สารกลุ่มนี้มีโครงสร้างเป็นแบบออโทรมบิกและมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 93 เคลวิน มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ $a = 3.8219$ อังสตรอม $b = 3.8844$ อังสตรอม และ $c = 11.6862$ อังสตรอม (Buckel. 1991: 295) ดังภาพประกอบ 13 ลักษณะโครงสร้างของสารกลุ่มนี้มีลักษณะเป็นชั้นๆ ประกอบไปด้วยระนาบของ CuO_2 และ พันธะของ Cu-O และระหว่างระนาบของ CuO_2 มีอะตอมของยิทเทรียมและแบเรียมอยู่สลับกันจะทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า การนำไฟฟ้าของสารกลุ่มนี้จะเกิดขึ้นได้ในระนาบของ CuO_2 โดยมีอะตอมของคอปเปอร์เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่ง อีกทั้งการเกิดสภาพนำยวดยิ่งจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิทำให้โครงสร้างของสารเกิดการบิดเบี้ยวได้ การเพิ่มจำนวนระนาบของ CuO_2 จึงเป็นสมมติฐานที่สำคัญในการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้



ภาพประกอบ 13 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y123

ที่มา: Buckel. (1991). *Superconductivity fundamental and applications*. p. 295.

จากสมมติฐานนี้นักวิทยาศาสตร์จึงมีความพยายามในการเพิ่มค่าของ c ในโครงสร้างของสารให้มีค่ามากกว่า Y123 ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนระนาบของ CuO_2 ในโครงสร้างของสารไปในตัวด้วยการค้นพบตัวนำยวดยิ่ง Y124 ซึ่งเกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างของ Y123 มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_{8-x}$ ใน 1 หน่วยเซลล์ ประกอบไปด้วยจำนวนอะตอมของยิทเทรียม 1 อะตอม มีพันธะ Cu-O 2 พันธะ อะตอมของแบเรียม 2 อะตอมและระนาบของ CuO_2 2 ระนาบ แต่จำนวนอะตอมของยิทเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียม มีค่าไม่เท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ พบว่าลักษณะโครงสร้างของ Y124 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$) เป็นแบบออร์โธโรมบิก มีค่าของแกน a และ b มีค่าใกล้เคียงกับ Y123 แต่ค่า c ยาวกว่า มีค่าเท่ากับ 27.2 อังสตรอม และมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 80 เคลวิน ดังภาพประกอบ 14 จะเห็นว่าค่า c ของ Y124 จะมีค่ามากกว่าค่า c ของ Y123 แต่มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นต่ำกว่า Y123

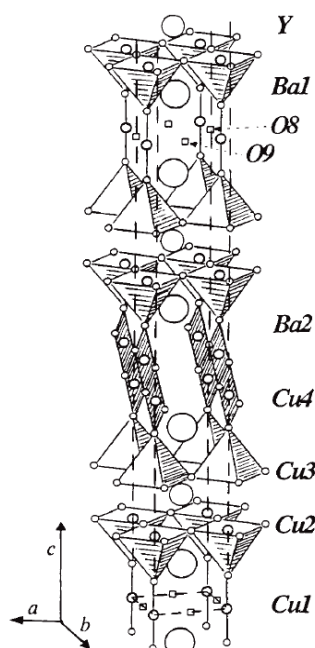


ภาพประกอบ 14 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y124

ที่มา: Marsh; et al. (1988). *Nature*. p. 141.

ตัวนำยวดยิ่งของกลุ่ม YBaCuO อีกชนิดหนึ่ง คือ Y247 มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-x}$ ใน 1 หน่วยเซลล์ ประกอบไปด้วยจำนวนอะตอมของยิทเทรียม 2 อะตอม พันธะของ Cu-O 4 พันธะ อะตอมของแบเรียม 4 อะตอม และมีระนาบของ CuO_2 4 ระนาบ โดย Y247 มีจำนวนอะตอมของยิทเทรียม รวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมมีค่าไม่เท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ รูปแบบ

โครงสร้างของ Y247($\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-x}$) เป็นแบบออโทรมบิก มีค่าของ a และ b มีค่าใกล้เคียงกับ Y123 และ Y124 แต่ค่า c ยาวกว่า Y123 และ Y124 ซึ่ง Y247 มีค่า c เท่ากับ 50.3 อังสตรอม มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 40 เคลวิน ดังภาพประกอบ 15 พบว่าค่า c ของ Y247 จะมีค่ามากกว่าค่า c ของ Y123 และ Y124 แต่อุณหภูมิวิกฤตมีค่าต่ำกว่า Y123 และ Y124



ภาพประกอบ 15 โครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่ง Y247

ที่มา: Bordet; et al. (1988). *Nature*. p. 596.

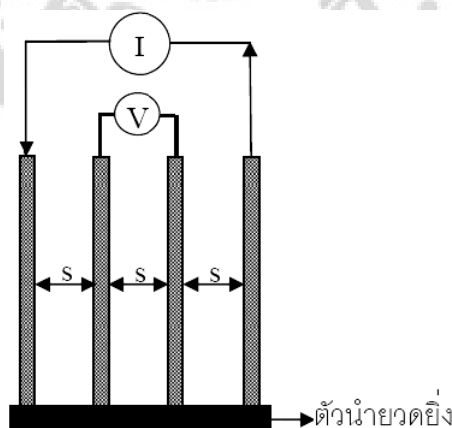
ตัวนำยวดยิ่งที่มีการค้นพบใหม่ คือ Y358 มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ พบว่า 1 หน่วยเซลล์ ประกอบไปด้วยจำนวนอะตอมของยิทเทเรียม 3 อะตอม พันธะของ Cu-O 3 พันธะ อะตอมของแบเรียม 5 อะตอมและระนาบของ CuO_2 5 ระนาบ อีกทั้งจำนวนอะตอมของยิทเทเรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ มีรูปแบบโครงสร้างเป็นแบบออโทรมบิกมีค่าของ a และ b ใกล้เคียงกับ Y123 แต่ c ยาวกว่า Y123 เกือบ 3 เท่า มีค่าของ c เท่ากับ 31.013 อังสตรอม และมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 102 เคลวิน

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบโครงสร้างของสารทั้ง 4 ชนิดพบว่าค่าของ a และ b มีค่าใกล้เคียงกันในสารทุกสูตร จะมีค่าที่แตกต่างกันมาก คือ ค่าของ c โดย Y123 มีค่าของ c ที่น้อยที่สุดเท่ากับ 11.6862 อังสตรอม มีจำนวนอะตอมของยิทเทเรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์และอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 93 เคลวิน ส่วน Y124

และ Y247 มีค่าของ c มากกว่า Y123 แต่จำนวนอะตอมของยิทเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมมีค่าไม่เท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ สารทั้งสองกลุ่มมีค่าของอุณหภูมิวิกฤตมีค่าน้อยกว่า Y123 ส่วนตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y358 มีค่าของ c มากกว่า Y123 และ Y124 แต่น้อยกว่า Y247 แต่มีจำนวนอะตอมของแบเรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ และมีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 102 เคลวิน ซึ่งสูงกว่า Y123 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ข้อสรุปว่าจำนวนอะตอมของยิทเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมมีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ ซึ่งเป็นแนวความคิดที่สำคัญที่สามารถนำมาใช้เตรียมสารสูตรใหม่ที่น่ามีโอกาสทำให้อุณหภูมิวิกฤตที่สูงขึ้นได้ จึงได้นำแนวความคิดนี้มาใช้ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการทดลองซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดอีกครั้งในบทที่ 3

9. การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

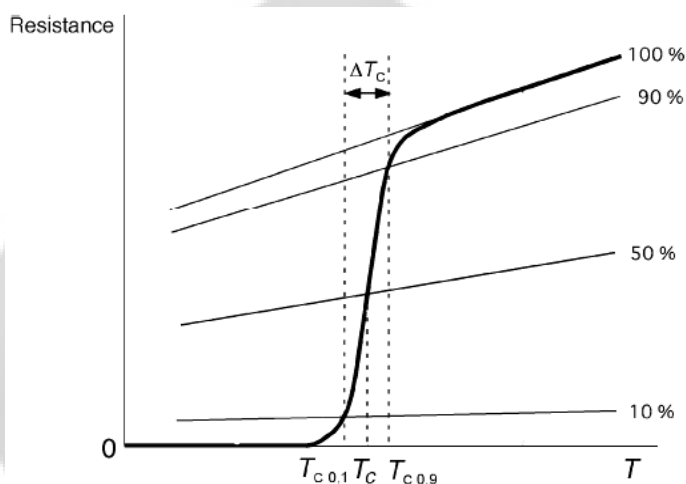
การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว เป็นการวัดความต้านทานเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งโดยมีแผนภาพของอุปกรณ์การวัดดังภาพประกอบ 16 โดยสองขั้วด้านนอกจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและอีกสองขั้วด้านในเป็นขั้วที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด กระบวนการทำขั้วการวัดทั้งสองขั้วจะถูกประสานกับตัวนำยวดยิ่งด้วยกาวเงิน พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่อุณหภูมิห้องของขั้วทั้ง 4 ขั้วก่อนทำการวัดจะมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม มีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 5 มิลลิเมตร การวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิดเค วางที่ผิวหน้าของสารเพื่อทำการวัดอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 16 แสดงอุปกรณ์การวัดแบบ 4 ขั้ว

ที่มา: Smits. (1958). *The Bell System Technical Journal*. p. 714.

การอ่านค่าอุณหภูมิวิกฤตสามารถอ่านได้จากกราฟระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ โดย มูราเซและคณะ (Murase; et al. 2001: 1197) ได้แบ่งผลของการวัดอุณหภูมิวิกฤตออกเป็นช่วงๆ อยู่ 4 ช่วงในแกนนอน ดังนี้ ช่วงกราฟตรงสภาพปกตินี้ให้มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ถัดจากช่วงสภาพปกติมา 10 เปอร์เซ็นต์ ตัวนำวยวดยิ่งจะมีสภาพของตัวนำปกติอยู่ 90 เปอร์เซ็นต์ ถัดลงมาจนกระทั่งถึงกลางของกราฟ ตัวนำวยวดยิ่งจะมีสภาพของตัวนำปกติ 50 เปอร์เซ็นต์ และก่อนจะถึงสภาพนำวยวดยิ่งอยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยการแบ่งกราฟของการวัดอุณหภูมิวิกฤตออกเป็นเปอร์เซ็นต์สามารถดูได้จากโปรแกรมที่ใช้พล็อตกราฟ ดังภาพประกอบ 17 ซึ่งได้ทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำวยวดยิ่งซึ่งได้จากการทำการวัดแบบ 4 ขั้ว



ภาพประกอบ 17 แสดงการหาอุณหภูมิวิกฤตของมูราเซและคณะ

ที่มา: Murase; et al. (2001). *Physica C*. p. 1197.

จากนั้นลากเส้นตรงทุกช่วง 100 เปอร์เซ็นต์, 90 เปอร์เซ็นต์, 50 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ และลากเส้นแกนตั้งที่ค่า 90 เปอร์เซ็นต์, 50 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ตัดเส้นแกนนอน และสามารถหาความแตกต่างของอุณหภูมิวิกฤต (ΔT_c) ของกราฟระหว่างช่วง 10 เปอร์เซ็นต์ และ 90 เปอร์เซ็นต์ ได้ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำวยวดยิ่งด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว โดยใช้กาเงินเป็นตัวประสานระหว่างขั้ว เพราะกาเงินมีลักษณะเป็นของเหลวความต้านทานต่ำและสามารถยึดเกาะระหว่างตัวนำวยวดยิ่งกับขั้วโลหะการวัดได้ดี จากการทำขั้วของการวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วที่วัดได้จากโหม้มมิเตอร์ที่อุณหภูมิห้องของตัวนำวยวดยิ่งจะมีค่าไม่เกิน 10 โหม้มที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5 เซนติเมตร ถ้าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่านี้แสดงว่าการทำขั้วไม่สมบูรณ์ซึ่ง

จะเป็นปัญหาที่สำคัญของการวัด ในขณะที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้ คือ อาจจะทำให้หัวการวัดไม่ครบวงจรซึ่งไม่สามารถทำการวัดได้ เนื่องจากอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบการวัดนี้จะเกิดการหดตัวเมื่อใส่ไนโตรเจนเหลวลงไปในระบบการวัดเพื่อใช้เป็นสารหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 77 เคลวิน การอ่านค่าอุณหภูมิวิกฤตโดยใช้หลักการของมูราเซแต่จะพิจารณาจุดที่ 100 เฟอร์เซนต์ 50 เฟอร์เซนต์ และ 0 เฟอร์เซนต์เป็นหลักและใช้จุดที่ 90 เฟอร์เซนต์ และ 10 เฟอร์เซนต์ มาประกอบการพิจารณา

10. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์มี 2 แบบ แบบแรกเรียกว่าสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง(continuous spectrum) ซึ่งสเปกตรัมแบบนี้เกิดขึ้นจากการเร่งอิเล็กตรอนที่มีความต่างศักย์ที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอนนั้นมีค่าไม่มาก แบบที่สองเป็นรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะ(characteristic spectrum) เป็นรังสีเอกซ์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยโดยหลอดรังสีเอกซ์มีสภาพเป็นสุญญากาศซึ่งมีทั้งสแตนเป็นไส้หลอดและเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน โดยจะให้กระแสประมาณ 3 แอมแปร์(A)มาเลี้ยงไส้หลอดเพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากนั้นเร่งอิเล็กตรอนโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงประมาณ 30 กิโลโวลต์(KV) เพื่อให้เข้าชนเป้าทองแดง (Cu) โดยอิเล็กตรอนสามารถเข้าไปชนอิเล็กตรอนวงในของอะตอมของทองแดง การชนนี้จะทำให้อิเล็กตรอนวงในอะตอมหลุด จึงทำให้อิเล็กตรอนชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานโดยเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนชั้นในทำให้ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่จะให้ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม และเป็นรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะเกิดขึ้น กระบวนการในการเกิดรังสีเอกซ์ ต้องมีอิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้าตลอดเวลาดังนั้นการใช้งานหลอดเอ็กซ์ จึงเกิดความร้อน 99 เฟอร์เซนต์ และมีเพียง 1 เฟอร์เซนต์ เท่านั้นที่จะเปลี่ยนเป็นรังสีเอกซ์ ดังนั้นตัวหลอดจึงต้องมีการระบายความร้อนหรือควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปมักใช้น้ำเย็น

เมื่อรังสีเอกซ์ถูกปลดปล่อยจากหลอดรังสีเอกซ์แล้ว พบว่ารังสีเอกซ์แบบเฉพาะที่ออกมามีหลายค่า แต่ถ้าพิจารณาจากกฎของแบรกก์ พบว่าความยาวคลื่นที่ใช้มีค่าเดียวดังนั้นถ้าใช้รังสีที่ออกมาทั้งหมดจะทำให้กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ซับซ้อนมาก ซึ่งยากแก่การวิเคราะห์ ซึ่งจากการสังเกตรังสีเอกซ์ชนิดต่างๆ จากหลอดรังสีเอกซ์ พบว่า รังสีเอกซ์ที่มีค่าความเข้มมากๆ ได้แก่ K_α และ K_β ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดรังสีใดรังสีหนึ่งออก โดยสังเกตว่าความเข้มของรังสีเอกซ์แบบ K_α มีค่ามากกว่าความเข้ม K_β ดังนั้นจึงกำจัดรังสีเอกซ์แบบ K_β ออกแล้วเลือกรังสีเอกซ์ K_α มาใช้งาน โดยใช้วิธีการดูดกลืนโดยใช้หน้าต่างนิเกิล(Ni) ความหนา 0.017 มิลลิเมตร เฟอร์เซนต์ การดูดกลืน 98.4% สำหรับการวัดรูปแบบของการเลี้ยวเบนใช้ สมการตามกฎของแบรกก์ (Anthony; et.al. 1999: 125) ตามสมการ

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.2)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเต็มของการแทรกสอดแบบเสริมกัน

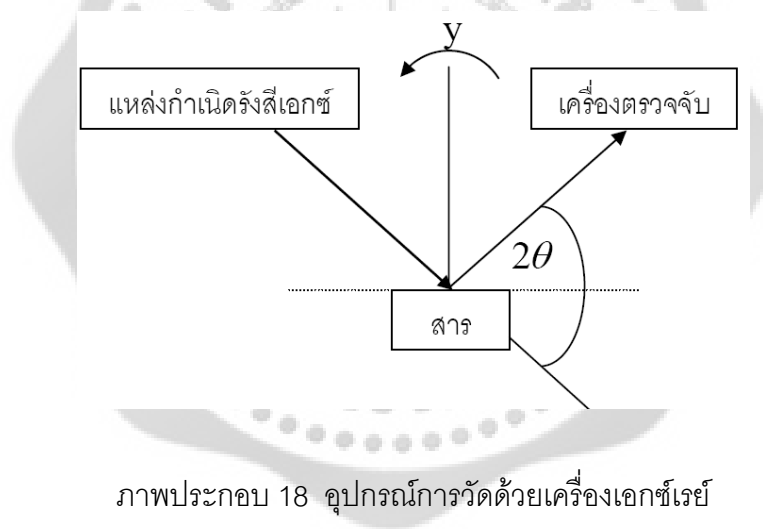
λ คือ ความยาวคลื่นในหน่วยอังสตรอมสำหรับทองแดงเท่ากับ
1.5406 อังสตรอม

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึกมีหน่วยเป็นอังสตรอม

θ คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับระนาบของผลึก

K_α และ K_β คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงาน L และ M ไปยังระดับชั้นพลังงาน K ตามลำดับ

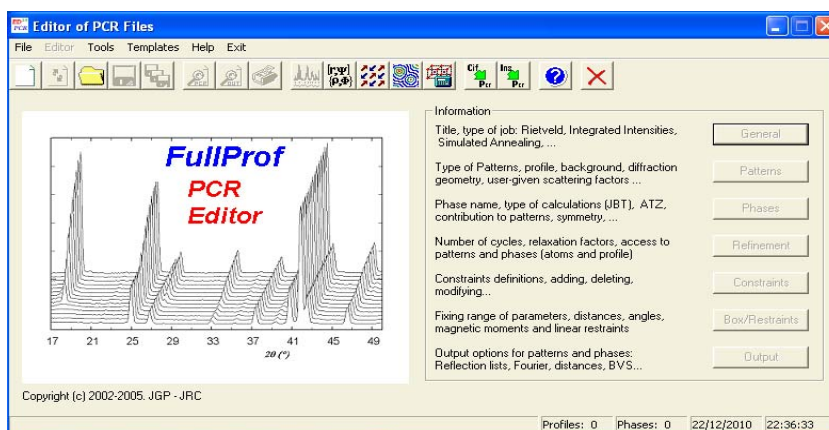
การเตรียมสารโดยนำสารที่มีลักษณะเป็นผงมาอัดในแม่พิมพ์ให้แน่น จากนั้นนำแผ่นที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ ซึ่งในการวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์จะต้องวัดจากแนวรังสีเดิมตลอดเวลา ดังนั้นมุมระหว่างรังสีเลี้ยวเบนและรังสีทะลุผ่านสารจึงมีค่าคงตัวเท่ากับ 2θ ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 อุปกรณ์การวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์

ที่มา: Okumus. (2004). Preparation Condition and Characterization on YBaCuObased Superconductor. p. 47.

จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลของสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์เพื่อใช้ในการหาค่าคงตัวของหน่วยเซลล์และกลุ่มปริภูมิของสารด้วยโปรแกรมฟูลพروفซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ [http://www.ill.eu.fullprof](http://www.ill.eu/fullprof). โดยโปรแกรมฟูลพروفมีลักษณะของโปรแกรมดังภาพประกอบ 19



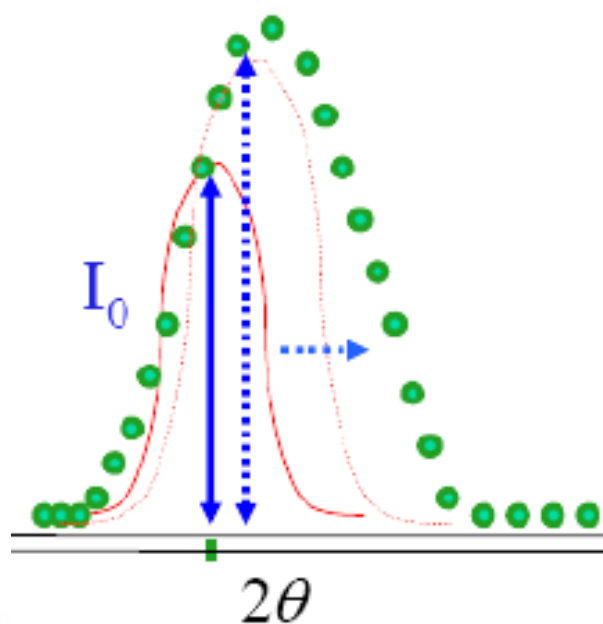
ภาพประกอบ 19 โปรแกรมฟูลพรอฟ

ที่มา: from <http://www.ill.eu/fullprof>. (online)

กระบวนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ(Rodriguez. 2000: 1) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จากการทดลอง กับแบบจำลองโครงสร้างที่ถูกกำหนดขึ้น ทำให้สามารถเข้าใจโครงสร้างของสารและสามารถหาค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ ตำแหน่งอะตอม โดยในการจำลองรูปแบบของโครงสร้างจะต้องมีการใส่ค่าของตัวแปรเริ่มต้น ดังนี้

1. การปรับค่าเป็นศูนย์(Zero shift)
2. สัญญาณพื้นหลัง(Background)
3. พารามิเตอร์หน่วยเซลล์(Unit cell parameter)
4. ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความเข้มของรังสีเอกซ์สูงสุด(FWHM parameter)
5. ลักษณะของกราฟแบบเกาส์เซียนกับลอเรนเซียน(Pseudo-Voigt factor)
6. ความอสมมาตรของโครงสร้าง(asymmetry)

หลักการทำงานของโปรแกรม เป็นการวิเคราะห์ปริมาณสองปริมาณโดยจะต้องทำให้เส้นกราฟ(สีแดง)ที่เกิดจากการคำนวณไปซ้อนทับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง(วงกลม) ให้มากที่สุด ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 หลักการทำงานของโปรแกรมฟูลพรอฟ

ที่มา: from <http://www.ill.eu/Fullprof>. (online)

และมีพารามิเตอร์ในคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองดังนี้

1. ข้อมูลแสดงลักษณะเฉพาะ (Profile factor) (Rodriguez. 2000: 43)

$$R_p = \frac{\sum_i |y_{oi} - y_{ci}|}{\sum_i y_{oi}} \quad (2.3)$$

2. แฟกเตอร์ของข้อมูลโดยน้ำหนัก (Weighted profile factor) (Rodriguez. 2000: 44)

$$R_{wp} = 100 \left[\frac{\sum_i w_i |y_{oi} - y_{ci}|^2}{\sum_i w_i y_{oi}^2} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

3. แฟกเตอร์ค่าคาดหวัง (Expected factor) (Rodriguez. 2000: 45)

$$R_{exp} = 100 \left[\frac{n - p}{\sum_i w_i y_{oi}} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

4. ค่าความถูกต้อง(Goodness) (Rodriguez. 2000: 45)

$$\chi^2 = \left[\frac{R_{wp}}{R_{exp}} \right]^2 \quad (2.6)$$

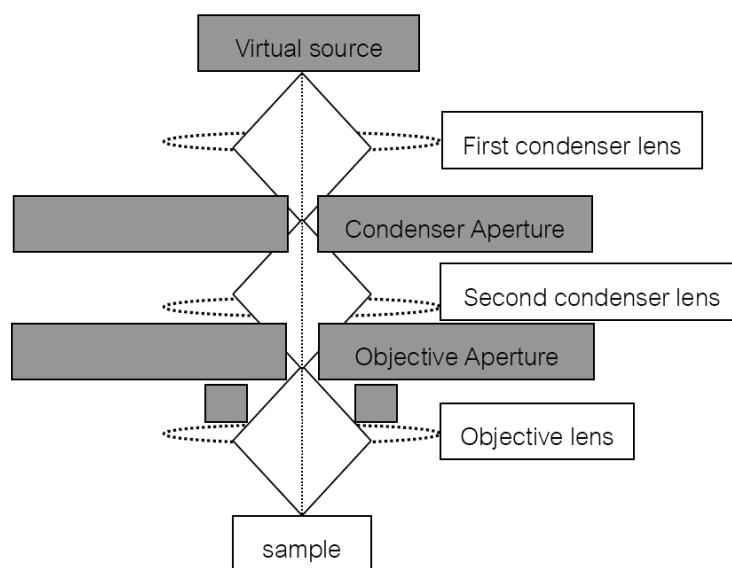
เมื่อ

- R_p คือ ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการกำลังสองน้อยสุด(least –square)
 R_{wp} คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของความสูงพีคที่อยู่เหนือสัญญาณพื้นหลัง
 R_{exp} คือ ค่าประมาณที่ดีที่สุดสำหรับชุดข้อมูล
 n คือ จำนวนของข้อมูลทั้งหมด
 p คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ปรับแต่ง
 χ^2 คือ ค่าความถูกต้อง
 y_{oi} คือ รูปแบบของกราฟจากการทดลอง
 y_{ci} คือ รูปแบบของกราฟจากการจำลองโครงสร้างขึ้นมาจากการทดลอง
 w_i คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง

โดยการเปรียบเทียบของกระบวนการทั้งหมดที่ได้จะดูจากค่า R โดยค่า R เหล่านี้ควรจะมีค่าน้อยกว่า 15 % จึงเป็นค่าที่ดี ส่วนคุณภาพของกระบวนการจำลองโครงสร้างดูได้จาก χ^2 ซึ่งควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.5 จึงจะดี แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า 1 นั้นหมายความว่ามีความเป็นไปได้บางอย่างผิดพลาดไป (Young. 2002: 21)

11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวัดเอกซ์เรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาพื้นผิวของสารตัวอย่าง กล้องจุลทรรศน์นี้ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญคือ ปืนอิเล็กตรอนทำจากทังสเตน จากนั้นจะมีเลนส์คอนเดนเซอร์และเลนส์ใกล้วัตถุ ที่ทำให้ลำอิเล็กตรอนมีความคมและบางส่วนประกอบที่สำคัญคือขดลวดสแกน (Scanning Coil) ซึ่งทำหน้าที่ส่องกราดลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานดังภาพประกอบ 21 ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่จะถูกปลดปล่อยจากชิ้นงานกระบวนการสร้างภาพของกล้องได้มาจากการตรวจจับอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งได้จากการทำอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิต่อชิ้นงาน



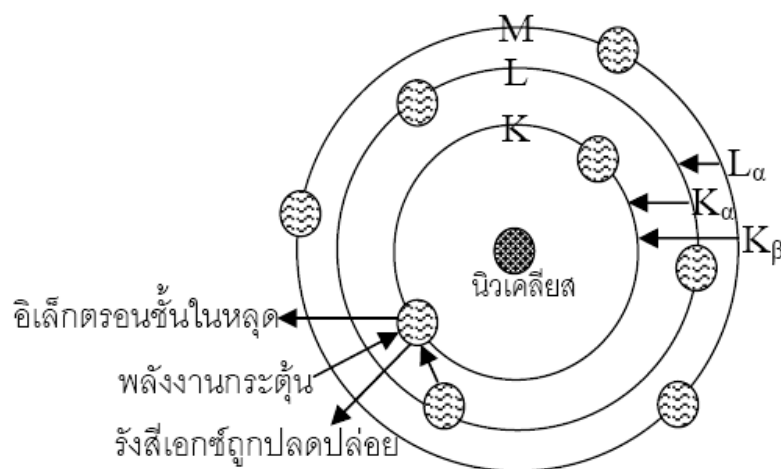
ภาพประกอบ 21 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: Okumus. (2004). Preparation condition and characterization on YBaCuO based superconductor. p. 50.

การวัดเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-rayspectroscopy: EDX) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารโดยการยิงรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ(primary x-ray beam)ที่ได้จากหลอดเอกซเรย์ตรงไปที่สารที่ต้องการศึกษา รังสีเอกซ์ปฐมภูมินี้จะทะลุเข้าไปชนอิเล็กตรอนวงในในชั้น K หลุดออกทำให้อิเล็กตรอนวงนอกชั้น L และชั้น M ซึ่งมีระดับพลังงานที่สูงกว่าเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนวงในที่หลุดออกไปและอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงนี้เองจะปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (secondary x-ray) การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น L ไปยังชั้น K การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น M ไปยังชั้น K และการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น M ไปยังชั้น L ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ดังภาพประกอบ 22 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน

เมื่อ K_{α} และ K_{β} คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงาน L และ M ไปยังระดับชั้นพลังงาน K ตามลำดับ

L_{α} คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงาน M ไปยังระดับชั้นพลังงาน L

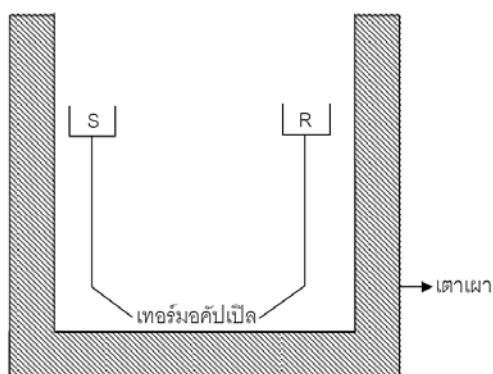


ภาพประกอบ 22 หลักการทำงานของการวัดเอกซเรย์สเปกโตรโกปีแบบกระจายพลังงาน

ที่มา: from <http://www.wikipedia.org.EDS-sheme>. (online)

12. การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์

การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าของอุณหภูมิที่ทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นสารประกอบอื่นเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิเพอร์ริเทคติก หลักการในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะใช้เทอร์มอคัปเปิลวัดอุณหภูมิของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงโดยเทอร์มอคัปเปิลติดกับ สารตัวอย่างในที่นี้ คือ S และ สารอ้างอิง คือ R ดังภาพประกอบ 23 เป็นระบบของการวัดด้วยวิธีนี้สารทั้งสองถูกวางใกล้กันในห้องเผาเดียวกันเพื่อให้อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมือนกัน ในการทดลองสารตัวอย่างจะถูกใส่ในถ้วยอะลูมินาและสารอ้างอิงคือถ้วยอะลูมินาเปล่าๆ เนื่องจากถ้วยอะลูมินามีจุดหลอมเหลวสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง



ภาพประกอบ 23 แสดงหลักการทำงานของเครื่องการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์

ที่มา: from <http://www.globalspec.com>.(online)

ในปี ค.ศ.1995 กลุ่มวิจัยของ ฮองและคณะ(Hong; et al. 1995. 209) ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของตัวนำยวดยิ่ง Y123 โดยให้ความร้อนพบว่าสารจะเกิดการสลายตัวเป็นสารประกอบอื่นได้แก่ Y_2BaCuO_5 , $BaCuO_2$ และ CuO ที่อุณหภูมิ 1,010 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้จะเกิดสารประกอบที่ได้มีสถานะที่ต่างกันโดย Y_2BaCuO_5 มีสถานะเป็นของแข็ง และ $BaCuO_2$ กับ CuO มีสถานะเป็นของเหลว ตามลำดับ ดังสมการ



สารประกอบทั้งสามชนิดจะมีสภาพปกติและเป็นสารที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นเพราะสารเหล่านี้จะลดความเป็นสภาพนำยวดยิ่ง ดังนั้นการทราบถึงอุณหภูมินี้จึงเป็นสิ่งที่สำคัญเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารซึ่งมีผลจากอุณหภูมิ

บทที่ 3

กระบวนการทดลอง

บทนี้ประกอบด้วยแนวทางการทดลอง กระบวนการเตรียมสารกลุ่ม YBaCuO กระบวนการวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตและการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสารด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การวิเคราะห์สภาพพื้นผิว วิเคราะห์ธาตุ และการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ ซึ่งจะได้นำเสนอต่อหัวข้อต่อไป

1. แนวทางการทดลอง

การค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO ซึ่งประกอบด้วย สารในกลุ่ม Y123 Y124 Y247 และ Y358 สารที่น่าสนใจ คือ สารกลุ่ม Y123 มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 93 เคลวิน (Wu; & et al. 1987: 908) และสารกลุ่ม Y358 มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 102 เคลวิน (Aliabadi; et al. 2009: 2012) โดยสารทั้งสองกลุ่มมีตัวเลขที่แสดงสูตรของสารแต่ละสูตรอยู่สามตัว โดยตัวเลขตัวแรกหมายถึงจำนวนอะตอมของยิทเทรียม ตัวเลขตัวที่สองหมายถึงจำนวนอะตอมของแบเรียม และตัวเลขตัวที่สามหมายถึงจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ จากการสังเกตพบว่าสูตรของสารทั้งสองกลุ่มนี้มีผลรวมระหว่างตัวเลขตัวแรกกับตัวเลขตัวที่สองเท่ากับตัวเลขตัวที่สามนั้นหมายความว่าจำนวนอะตอมของยิทเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ จึงได้นำแนวทางนี้มาใช้ในการเตรียมสารและนำสารมาวัดสมบัติต่างๆ ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

2. การเตรียมสารกลุ่ม YBaCuO

การเตรียมสารใหม่กลุ่ม YBaCuO ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มีสารตั้งต้นคือ ยิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) มีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ตามสัดส่วนของยิทเทรียม แบเรียม และคอปเปอร์ที่แตกต่างกันซึ่งประกอบไปด้วย 5 สูตรดังนี้ 1:5:6 3:8:11 5:8:13 7:11:18 และ 13:20:33 เนื่องจากสารแต่ละสูตรเป็นสารที่ถูกค้นพบใหม่นั้น ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของสารจึงจำเป็นต้องใช้รูปแบบโครงสร้างของ Y123 (Buckel. 1991.295) มาเป็นพื้นฐานในการจำลองรูปแบบโครงสร้างของสารสูตรอื่นๆ ซึ่งจากรูปแบบโครงสร้างของ Y123 ในหนึ่งหน่วยเซลล์ ประกอบด้วยอะตอมของยิทเทรียมหนึ่งอะตอมและมีอะตอมแบเรียมสองอะตอม โดยมีอะตอมของยิทเทรียมอยู่ตรงกลางระหว่างอะตอมของแบเรียม ซึ่งจากแบบจำลองนี้จึงไม่พบการว่างของอะตอมของยิทเทรียมในโครงสร้างของ Y123 แต่เมื่อนำรูปแบบนี้มาใช้เป็นรูปแบบจำลองโครงสร้างของสารสูตรอื่นๆ พบว่าเกิดการว่างของอะตอมของยิทเทรียมเกิดขึ้น

จึงสามารถคำนวณหาอัตราส่วนและคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของการว่างของอะตอมยิทเตรียมต่อจำนวนอะตอมแบเรียมของรูปแบบจำลองของโครงสร้างของสารทุกสูตรได้ ดังตาราง 1

ตาราง 1 อัตราส่วนและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมของยิทเตรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียม

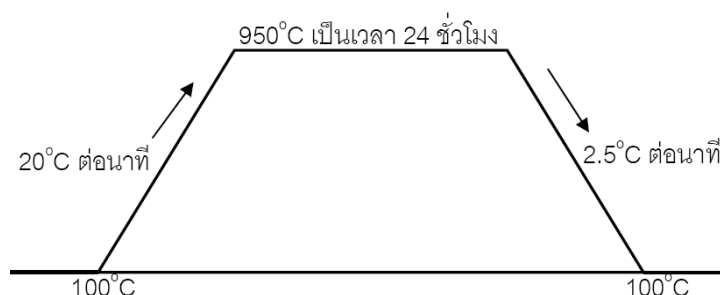
สาร	อะตอมของยิทเตรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียม	เปอร์เซ็นต์ของอะตอมของยิทเตรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียม
Y123	0	0
Y156	3:5	60
Y358	1:5	20
Y3-8-11	4:8	50
Y5-8-13	2:8	25
Y7-11-18	3:11	27
Y13-20-33	6:20	30

ที่มา: Udomsamuthirun; et al. (2010). *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. p.1379.

การว่างของอะตอมของยิทเตรียมจากแบบจำลองนี้น่าที่จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอะตอมเพิ่มมากขึ้นในโครงสร้างของสารมีผลทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า จึงน่าจะมีโอกาสพบสารที่มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า Y123 จากนั้นใช้สมการของปฏิกิริยาทางเคมี คำนวณปริมาณสารตั้งต้นต่างๆ และเมื่อได้ปริมาณของสารที่ต้องการแล้วจะทำการสังเคราะห์สารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งซึ่งมีกระบวนการเผา 2 แบบ ดังนี้

2.1 กระบวนการเผาแบบผง

การเตรียมสารกลุ่มนี้ใช้กระบวนการเผาแบบผงสองครั้ง โดยเริ่มต้นกระบวนการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 950 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสอีกครั้ง ดังภาพประกอบ 24



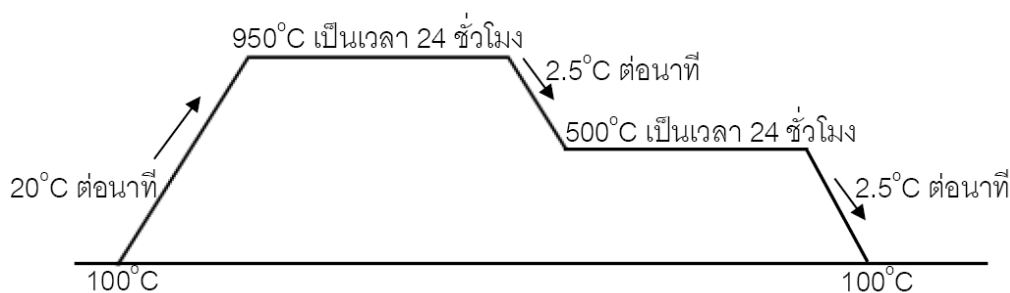
ภาพประกอบ 24 กระบวนการเผาแบบผิง

จากนั้นนำสารที่ผ่านกระบวนการเผาครั้งที่ 1 มาบดให้ละเอียดในครกอะลูมินาจึงนำสารที่เป็นผงไปร่อนผ่านตะแกรงเพื่อเป็นการคัดเลือกขนาดของอนุภาคของสาร แล้วนำสารไปที่มีลักษณะเป็นผงไปสู่การเผาแบบผิงเป็นครั้งที่ 2 ซึ่งมีกระบวนการเผาเหมือนกับครั้งที่ 1

2.2 กระบวนการเผาแบบขึ้นรูป

นำสารที่ได้จากกระบวนการเผาแบบผิงครั้งที่ 2 ไปบดให้ละเอียดแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเพื่อเป็นการคัดเลือกขนาดของอนุภาคของสารอีกครั้ง ก่อนที่จะนำผงไปที่ได้อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรงอัด 2,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว(psi)เป็นเวลา 5 นาที สารทุกสูตรที่ได้จากกระบวนการอัดจะมีลักษณะเป็นก้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร และมีมวล 20 กรัม แล้วนำสารนี้วางบนแผ่นอะลูมินา จากนั้นเริ่มกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปโดยเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 950 องศาเซลเซียส คงที่อุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส คงที่อุณหภูมินี้ไว้ 24 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแผนภาพประกอบ

25



ภาพประกอบ 25 กระบวนการเผาแบบขึ้นรูป

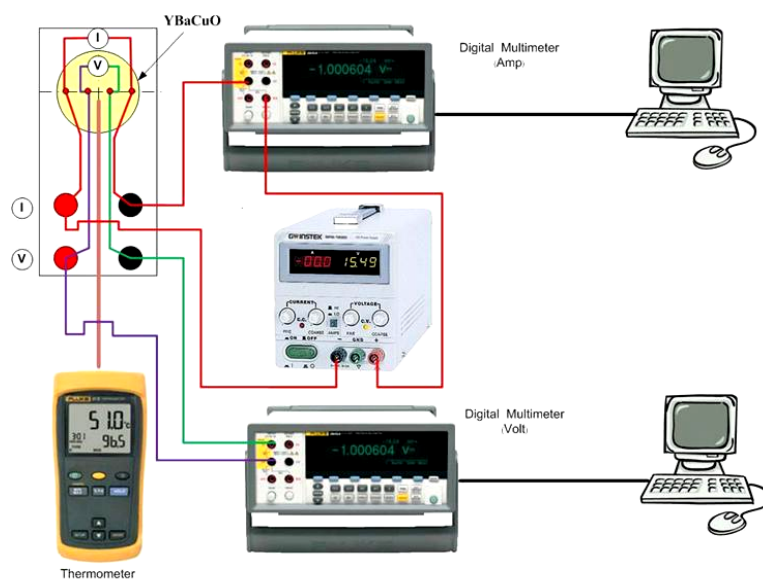
เนื่องจากสารที่เตรียมได้เป็นสารชนิดใหม่ จึงต้องนำสารที่ผ่านกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปแล้วมาทดสอบด้วยปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ คือ ถ้านั้นสารมีสภาพนำยวดยิ่งจะสามารถแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างชัดเจน นำสารดังกล่าวไปวัดความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการวัดดังนี้

3. การวัดความต้านทานไฟฟ้าของสาร

การวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารใช้วิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว โดยขั้วการวัดทำจากนีโอตอะลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร ขั้วทั้ง 4 จะถูกประสานกับสารด้วยกาวเงินเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น สามารถตรวจสอบการนำไฟฟ้าของสารได้โดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วการวัดโดยแบ่งเป็น สองขั้วด้านนอกเป็นขั้วที่ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าและสองขั้วด้านในเป็นขั้วสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะทำการวัดการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วที่อุณหภูมิห้องควรมีค่าไม่เกิน 10 โอห์มซึ่งถือว่าการทำขั้วการวัดที่ดี จากนั้นนำสายเทอร์มอคัปเปิลชนิดเค วางอยู่บนผิวหน้าของสารด้านที่ทำขั้วเพื่อทำการวัดค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เนื่องจากสารกลุ่มนี้จะเกิดสภาพนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำจึงต้องใช้ไนโตรเจนเหลวมาหล่อเย็นเพื่อใช้ลดอุณหภูมิของสาร เมื่ออุณหภูมิของสารมีค่าเท่ากับ 77 เคลวิน เริ่มให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดคงตัว 3 ค่า คือ 200 มิลลิแอมแปร์ 250 มิลลิแอมแปร์ และ 300 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ จนกระทั่งอุณหภูมิของสารถึง 120 เคลวิน การติดตั้งอุปกรณ์การวัดดังภาพประกอบ 26

3.1 อุปกรณ์สำหรับวัดความต้านทานไฟฟ้า

1. สายโคเอ็กเซียลเบอร์ TSLE156277
2. กาวเงิน
3. เทอร์มอคัปเปิลชนิดเค
4. เทอร์มอมิเตอร์ยี่ห้อฟลัก (Fluke) รุ่น 51 II
5. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง รุ่น HY3005
6. แหล่งให้ความร้อน
7. มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Fluke รุ่น 8845A
8. คอมพิวเตอร์



ภาพประกอบ 26 กระบวนการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสาร

นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทาน(ρ) โดยใช้สมการ (3.1) (Friedberg. 2002: 1)

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า V คือความต่างศักย์ไฟฟ้า I คือค่าของกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงตัว และ s คือระยะห่างระหว่างขั้ว นำค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิมาเขียนกราฟจะสามารถหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตของสารได้ จากนั้นนำสารไปวัดสมบัติทางฟิสิกส์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เอกซ์เรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน และการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยตามลำดับ เครื่องมือแต่ละชนิดมีกระบวนการทดลองดังต่อไปนี้

4. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสาร

หลังจากได้ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแล้ว นำสารไปวัดสมบัติอื่นๆ ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีรายละเอียดของกระบวนการวัดของเครื่องมือต่างๆ ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(X-ray diffraction:XRD) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารโดยใช้เครื่องมือรุ่น D8 Discovery diffractometer เริ่มวัดจากมุม 10 องศา ถึง 90 องศา ด้วยอัตรา 0.02 องศาต่อวินาที จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพروفเพื่อหาค่าของหน่วยเซลล์ เฟสส่วนผสม กลุ่มปริภูมิและตำแหน่งอะตอมของสาร

4.2 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวและวิเคราะห์ธาตุ

นำสารมาศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM)และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องมือเอกซ์เรย์สเปกโตรสโกปีแบบการกระจายพลังงาน(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:EDX)โดยทั้งสองกระบวนการนี้ใช้เครื่องมือรุ่น JEOL-5400LV ในขณะที่ทำการถ่ายภาพพื้นผิวแล้วสามารถทำการวิเคราะห์ธาตุพร้อมกันไปด้วย

4.3 การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์

การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์(Differential Thermal Analysis: DTA)เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาจุดของการเปลี่ยนสถานะของสารหรืออุณหภูมิเพอร์ริเทคติกโดยใช้เครื่องมือรุ่น Netzsch 409 เริ่มทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที่จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 950 องศาเซลเซียส แล้วเปลี่ยนอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น 2 องศาเซลเซียสต่อนาที่จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยในบทนี้ได้จากการดำเนินการตามกระบวนการในบทที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งจะนำเสนอผลของการวัดคุณลักษณะต่างๆ ของสารที่มีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. การศึกษาเบื้องต้น

เมื่อนำผงที่ได้จากกระบวนการเผาแบบผงไปทำการอัดจะได้สารที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร และมีมวล 20 กรัม โดยสารผ่านกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปแล้วจะมีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่งสามารถสรุปลักษณะของสารแต่ละสูตรได้ ดังตาราง 2

ตาราง 2 ลักษณะทางกายภาพของสารที่ผ่านกระบวนการเผาขึ้นรูป

สาร	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ความหนา (เซนติเมตร)	มวล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
Y123	2.910	0.493	19.200	5.840
Y156	2.930	0.491	18.920	5.712
Y358	2.950	0.492	19.700	5.855
Y3-8-11	2.920	0.490	19.620	5.976
Y5-8-13	2.970	0.489	19.350	5.710
Y7-11-18	2.940	0.497	19.150	5.674
Y13-20-33	2.890	0.498	19.870	6.080

จากการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์พบว่าสารทุกสูตร สามารถแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ได้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าสารที่ได้มีสภาพนำยวดยิ่งทั้งหมด ในหัวข้อต่อไปจะแสดงผลการทดลองจากการนำสารดังกล่าวไปวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤต

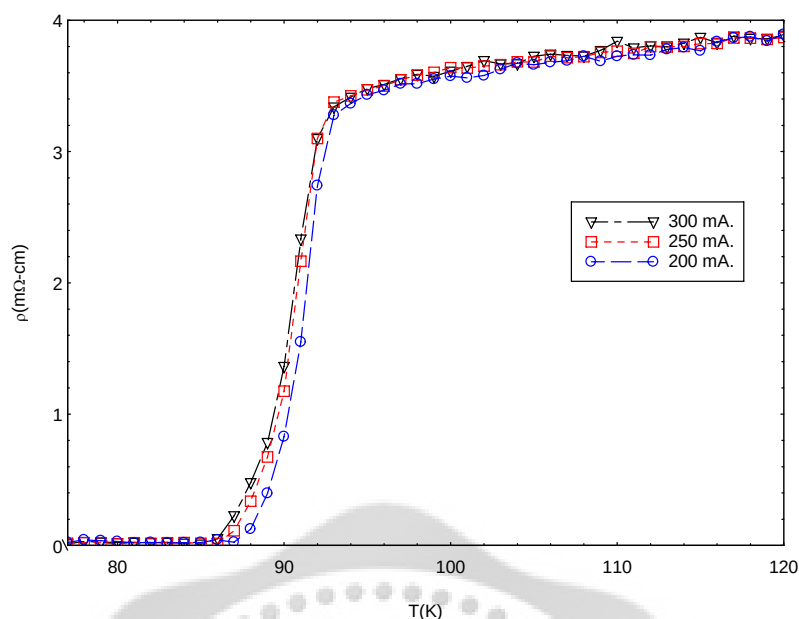
2. การวัดความต้านไฟฟ้าของสาร

ก่อนการวัดเพื่อหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตจะต้องทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว โดยใช้กาวยเงินเป็นตัวประสานระหว่างขั้วกับสาร ซึ่งสามารถสรุปค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารที่ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 5 มิลลิเมตรได้ ดังตาราง 3

ตาราง 3 ความต้านทานไฟฟ้าของสารที่อุณหภูมิห้อง

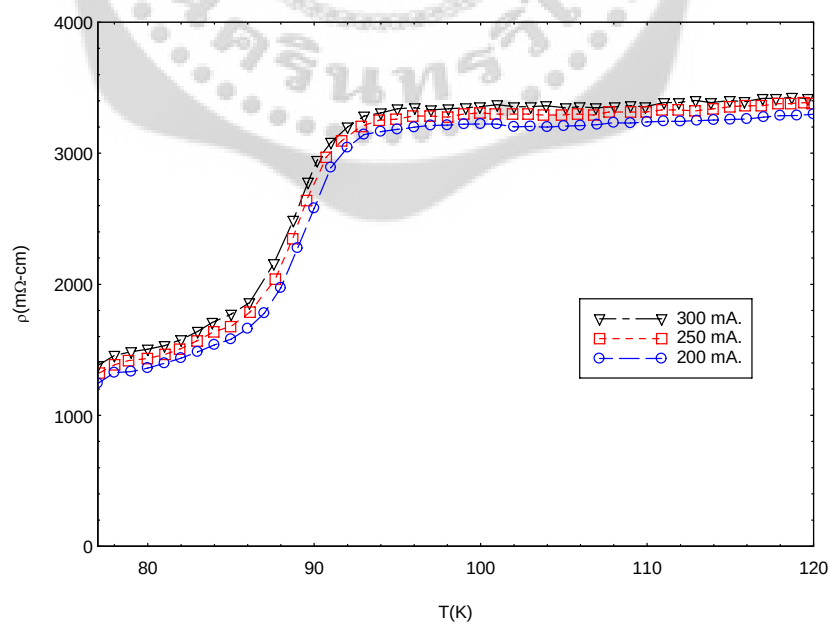
สาร	ความต้านทานไฟฟ้า(มิลลิโอห์ม)
Y123	1.4
Y156	512
Y358	1.9
Y3-8-11	2.1
Y5-8-13	2.3
Y7-11-18	1.8
Y13-20-33	2.2

จากนั้นผู้วิจัยลดอุณหภูมิของสารลงจนกระทั่งอุณหภูมิของสารเท่ากับ 77 เคลวิน แล้วใส่ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดคงตัว 3 ค่า คือ 200 มิลลิแอมแปร์ 250 มิลลิแอมแปร์ และ 300 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 120 เคลวิน จากนั้นนำค่าของกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาคำนวณเพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า นำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่คำนวณได้กับอุณหภูมิมาเขียนเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสอง ผลการทดลองของสารแต่ละสูตรมีดังนี้

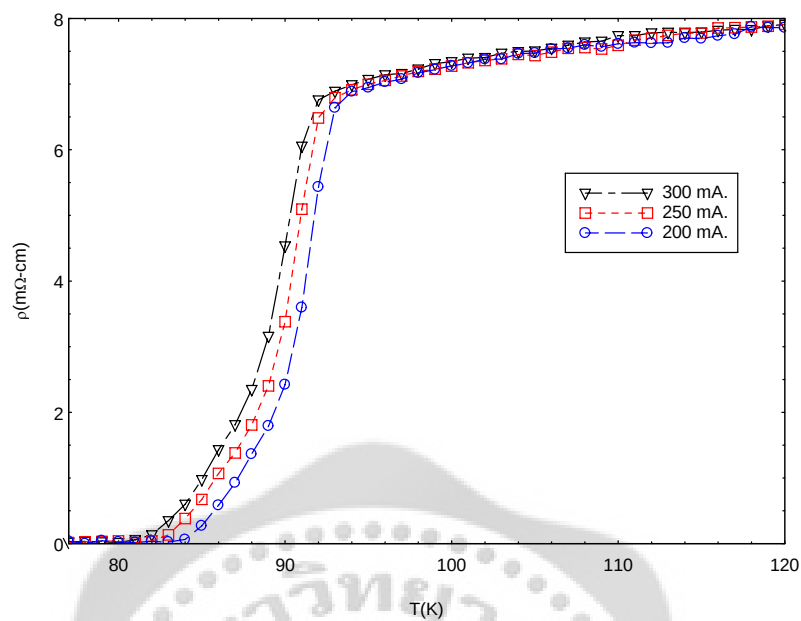


ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y123 กับอุณหภูมิ

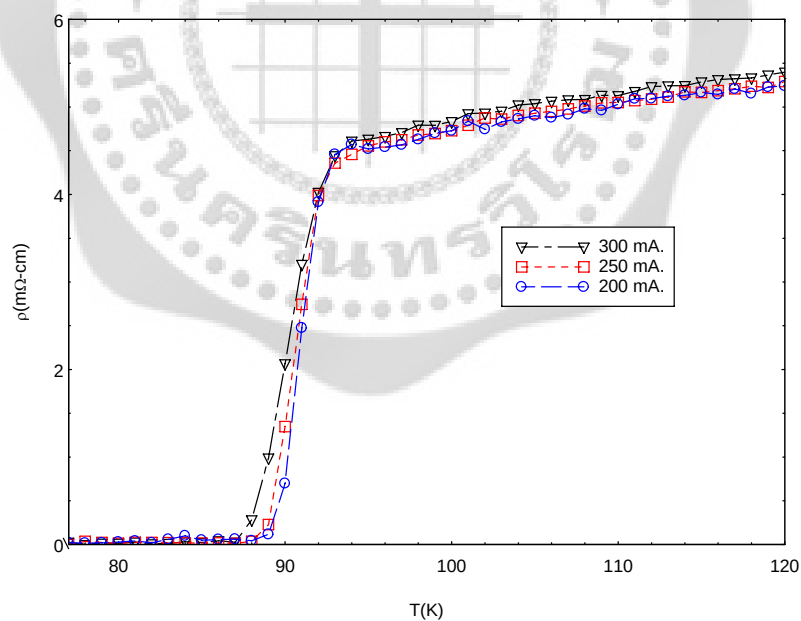
จากผลการทดลองจากตาราง 3 พบว่า Y156 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดขณะทำการวัดอุณหภูมิห้อง เมื่อนำมาทำการวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตจะทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำและใส่กระแสไฟฟ้าที่มีขนาดคงตัวเข้าไปซึ่งจะเป็นการเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าให้กับสารอีกเกือบเท่าตัว ดังภาพประกอบ 28 จากกราฟนี้จึงไม่สามารถหาอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ต่างๆ ได้



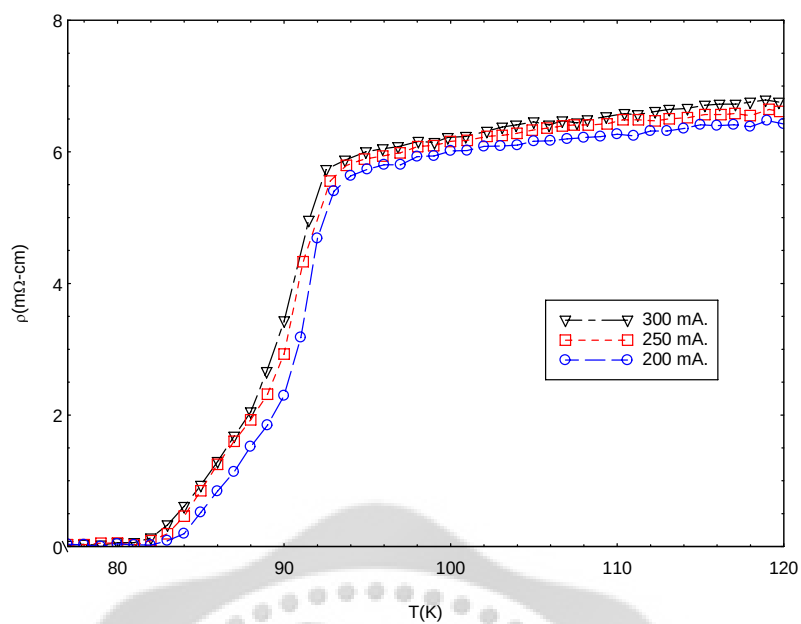
ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y156 กับอุณหภูมิ



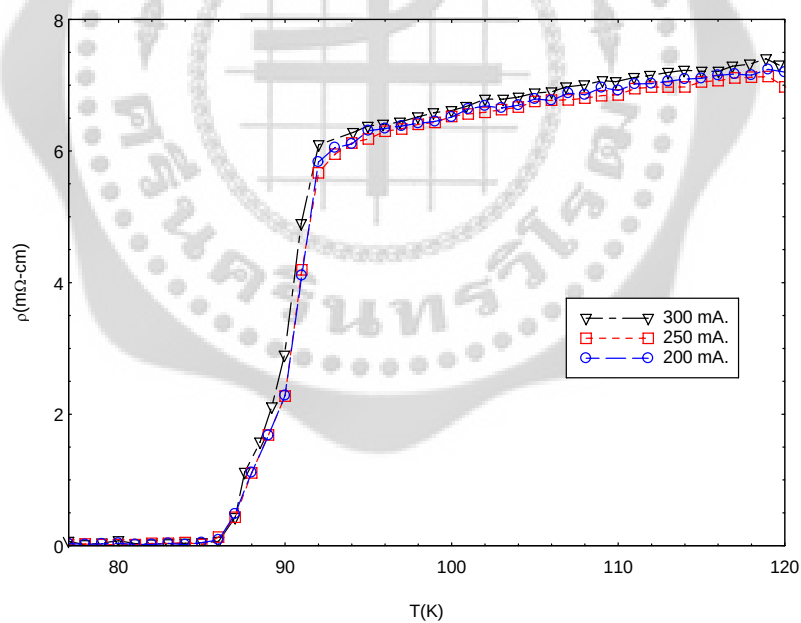
ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y358 กับอุณหภูมิ



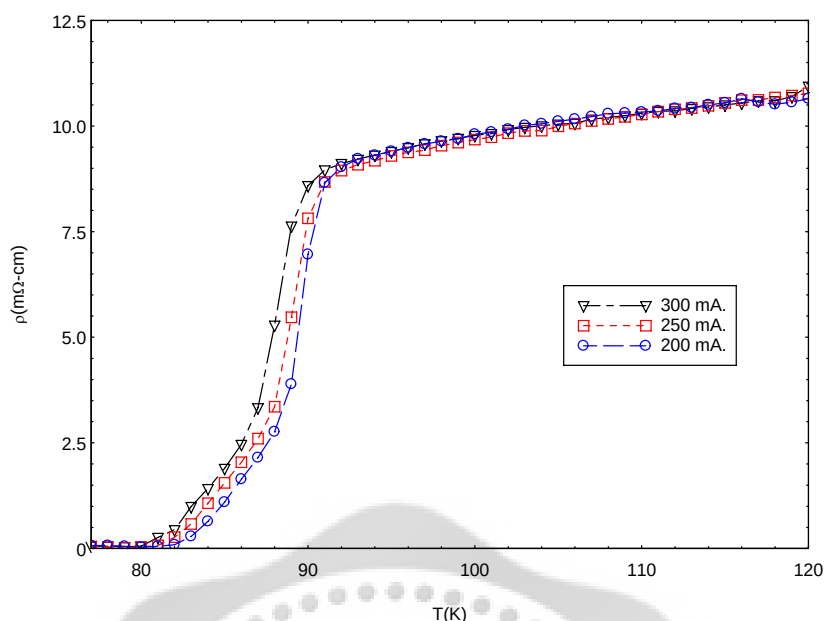
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y3-8-11 กับอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y5-8-13 กับอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y7-11-18 กับอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของ Y13-20-33 กับอุณหภูมิ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้ โดยแยกช่วงของกราฟ ออกเป็น 3 ค่า หลักๆ คือ อุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้น ($T_{c\text{onset}}$) เป็นค่าของอุณหภูมิที่สารเปลี่ยนสภาพจากสภาพปกติ 100 เปอร์เซ็นต์ เข้าสู่สภาพนำวดยิ่ง อุณหภูมิวิกฤตกลาง ($T_{c\text{middle}}$) เป็นค่าของอุณหภูมิที่อยู่ตรงกึ่งกลางของกราฟขณะที่สารมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 50 เปอร์เซ็นต์ และค่าของอุณหภูมิวิกฤตปลาย ($T_{c\text{offset}}$) เป็นค่าของอุณหภูมิสุดท้ายก่อนที่สารขณะที่มีสภาพนำวดยิ่ง 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสารทั้ง 6 สูตร มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตทั้ง 3 ค่าที่ต่างกัน โดยจะนำค่าของกระแสที่ 200 มิลลิแอมแปร์ มาพิจารณารายละเอียดของค่าอุณหภูมิวิกฤตต่างๆ ดังตาราง 4

ตาราง 4 ค่าของอุณหภูมิวิกฤตแต่ละช่วงของสาร

สาร	$T_{c\text{onset}}$ (เคลวิน)	$T_{c\text{middle}}$ (เคลวิน)	$T_{c\text{offset}}$ (เคลวิน)
Y123	93	91.2	87
Y358	94	91.2	84
Y3-8-11	94	91	89
Y5-8-13	94	90.8	83
Y7-11-18	93	90.8	86
Y13-20-33	92	89.4	82

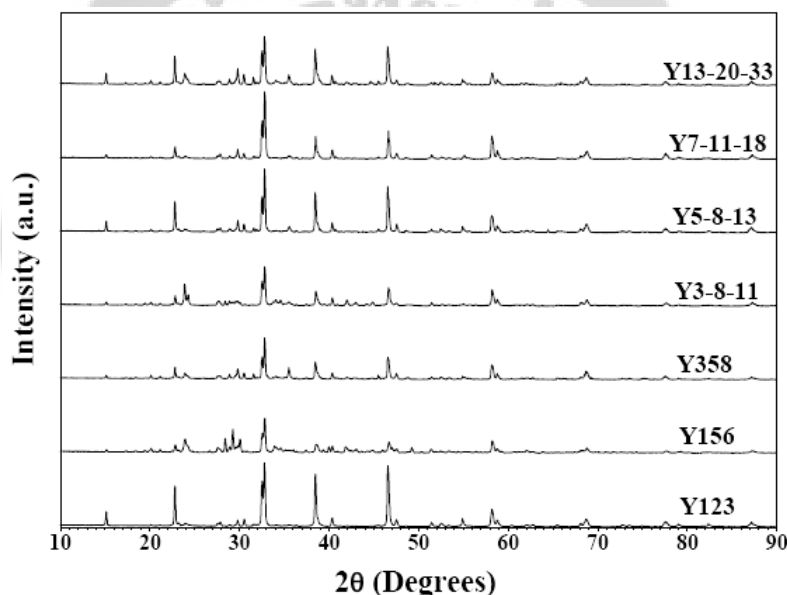
ที่มา: Udomsamuthirun; et al. (2010). *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*.

3. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสาร

หลังจากทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแล้วนำสารไปวัดสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลการทดลองของเครื่องมือวัดแบบต่างๆ มีดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารโดยใช้เครื่องมือรุ่น D8 Discovery diffractometer กระบวนการทดลองจะเริ่มวัดจากมุม 10 องศา ถึงมุม 90 องศา ด้วยอัตรา 0.02 องศาต่อวินาที ผลการทดลองจะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารทั้ง 7 สูตร ดังภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสาร

ที่มา: Sujinnapram;et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอพ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถบ่งชี้รูปแบบของโครงสร้าง เฟสที่เป็นส่วนผสม กลุ่มปริภูมิและหน่วยเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบของสารได้ โดยพบว่าสารทั้ง 7 สูตร มีรูปแบบของโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก มีสารสองชนิด

องค์ประกอบ คือ สารนำยวดยิ่งและสารปกติ โดยสารนำยวดยิ่งมีกลุ่มปริภูมิแบบ Pmmm ส่วนสารปกติมีหลายกลุ่มปริภูมิสามารถจำแนกกลุ่มปริภูมิของสภาพของสารทั้งหมดได้ดังตาราง 5

ตาราง 5 จำนวนเปอร์เซ็นต์และกลุ่มปริภูมิของสารนำยวดยิ่งและสารปกติ

สาร	สารนำยวดยิ่ง Pmmm	สารปกติ			
		Y ₂ BaCuO ₅ (Y211)		BaCuO ₂ Im-3m	Ba ₂ Cu ₃ O ₆ Pccm
		Pbnm	Pnma		
Y123	94	6	-	-	-
Y156	17	-	-	19	64
Y358	22	-	-	20	59
Y3-8-11	21	-	-	2	77
Y5-8-13	28	-	12	12	48
Y7-11-18	66	-	34	-	-
Y13-20-33	74	26	-	-	-

ที่มา: Sujinnapram;et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่งพบว่า ค่า a และ b มีค่าใกล้เคียงกับค่า a และ b ของ Y123 แต่ค่าของ c มีค่าไม่เท่ากับ Y123 และตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทางสูงสุด คือ Y5-8-13 ดังตาราง 6

ตาราง 6 ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารนำเวดิงและตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทาง

สาร	ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์			ตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทาง $\frac{100(b-a)}{0.5(b+a)}$
	a (Å)	b (Å)	c (Å)	
Y123	3.8219	3.8844	11.6862	1.62
Y156	3.8217	3.8886	23.3562	1.74
Y358	3.8191	3.8867	31.1662	1.75
Y3-8-11	3.8143	3.8847	42.6992	1.83
Y5-8-13	3.8190	3.8978	50.4607	2.04
Y7-11-18	3.8237	3.8800	69.8702	1.46
Y13-20-33	3.8154	3.8776	128.1163	1.62

ที่มา: Sujinnapram;et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

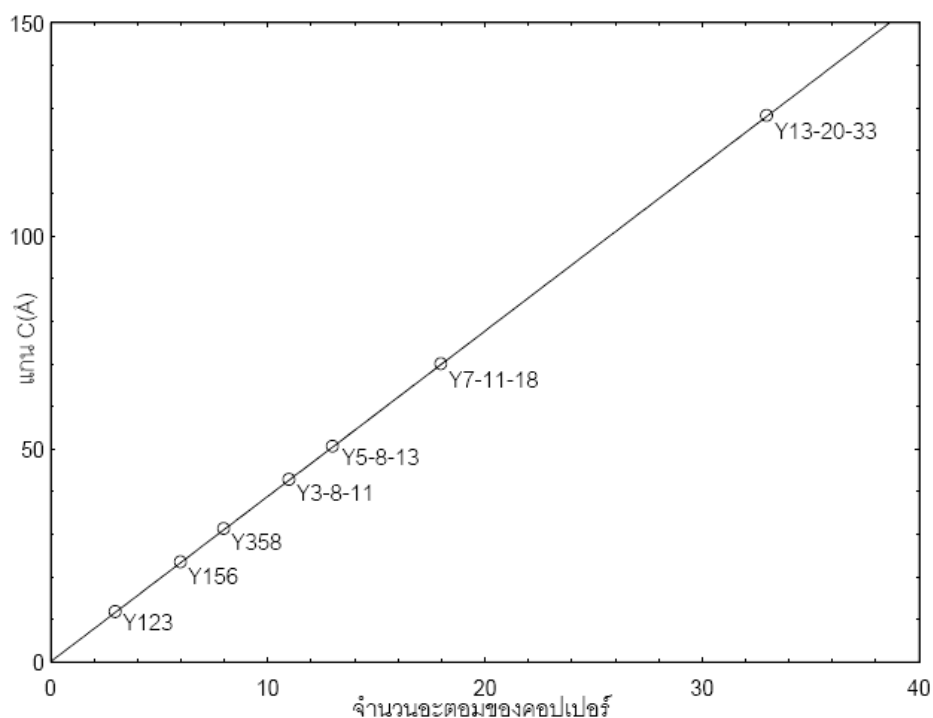
จากตาราง 5 พบว่าสารแต่ละสูตรมีจำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารปกติต่างกัน มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ Y211 มีสองกลุ่มปริภูมิ โดยปริภูมิแรกเป็นแบบ Pbnm เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในสารสูตร Y123 และ Y13-20-33 และแบบที่สอง Pnma เป็นองค์ประกอบอยู่ในสารสูตร Y5-8-13 และ Y7-11-18 ทั้งสองกลุ่มปริภูมินี้มีรูปแบบโครงสร้างแบบอโทรมบิก และมีความคงตัวของหน่วยเซลล์ที่ต่างกัน สารปกติชนิดที่สอง คือ BaCuO_2 เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารสูตร Y156 Y358 Y3-8-11 และ Y5-8-13 มีกลุ่มปริภูมิเป็นแบบ Im-3m มีรูปแบบโครงสร้างแบบคิวบิก และสารปกติชนิดสุดท้ายคือ $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในสูตร Y156 Y358 Y3-8-11 และ Y5-8-13 มีกลุ่มปริภูมิแบบ Pccm มีรูปแบบโครงสร้างแบบอโทรมบิก ซึ่งมีรายละเอียดของค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารปกติแต่ละชนิดในตาราง 7

ตาราง 7 หน่วยเซลล์และกลุ่มปริภูมิของสารปกติ 3 ชนิด

สาร	หน่วยเซลล์ของสารปกติและกลุ่มปริภูมิ								
	Y211(Y ₂ BaCuO ₅) Pbnm, Pnma			BaCuO ₂ Im-3m			Ba ₂ Cu ₃ O ₆ Pccm		
	<i>a</i> (Å)	<i>b</i> (Å)	<i>c</i> (Å)	<i>a</i> (Å)	<i>b</i> (Å)	<i>c</i> (Å)	<i>a</i> (Å)	<i>b</i> (Å)	<i>c</i> (Å)
Y123	7.1403	12.1921	5.6523	-	-	-	-	-	-
Y156	-	-	-	18.3095	18.3095	18.3095	13.0412	20.6141	11.4276
Y358	-	-	-	18.2932	18.2932	18.2932	13.0449	20.6584	11.4326
Y3-8-11	-	-	-	18.3470	18.3470	18.3470	13.0269	20.5786	11.4145
Y5-8-13	12.1866	5.6662	7.1276	18.3646	18.3646	18.3646	13.0509	20.6664	11.4343
Y7-11-18	12.1576	5.6496	7.1230	-	-	-	-	-	-
Y13-20-33	12.1649	5.6434	7.1274	-	-	-	-	-	-

ที่มา: Sujinnapram;et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

ผลการทดลองจากตาราง 6 พบว่าเมื่อจำนวนอะตอมของคอปเปอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ความยาวของ *c* มีค่าเพิ่มแบบเป็นเชิงเส้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้นกับความยาวของ *c* ได้ดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมของคอปเปอร์และความยาวของ c ของสาร

ที่มา: Sujinnapram; et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

การวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งอะตอมของสารจะต้องนำค่าคงตัวของหน่วยเซลล์และตำแหน่งอะตอมของ Y123 มาเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าดังกล่าวของสารสูตรอื่นๆ ผลจากการวิเคราะห์พบว่า สารแต่ละสูตรมีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์และตำแหน่งอะตอมมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น สามารถแสดงรายละเอียดของค่าดังกล่าวนี้ได้ดังตาราง 8

ตาราง 8 ตำแหน่งอะตอมของสาร

สาร	ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์			ปริมาตร	ตำแหน่งอะตอม				
	a (Å)	b (Å)	c (Å)		Z(Ba)	ZCu(2)	ZO(1)	ZO(2)	ZO(3)
Y123	3.8233	3.8844	11.6946	173.6830	0.1844	0.3583	0.1796	0.3920	0.3815
Y156	3.8233	3.8858	11.6774	173.4940	0.1823	0.3573	0.1629	0.3814	0.3764
Y358	3.8209	3.8858	11.6959	173.6580	0.1772	0.3591	0.1476	0.3710	0.3550
Y3-8-11	3.8204	3.8846	11.6762	173.2880	0.1769	0.3581	0.1518	0.3605	0.3537
Y5-8-13	3.8195	3.8849	11.6927	173.5030	0.1862	0.3596	0.1718	0.4058	0.3673
Y7-11-18	3.8217	3.8881	11.6864	173.6540	0.1831	0.3504	0.1690	0.3991	0.3743
Y13-20-33	3.8195	3.8838	11.6853	173.3470	0.1455	0.3221	0.1738	0.4454	0.4090

ที่มา: Sujinnapram;et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

โปรแกรมฟูลพรอพเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองกราฟระหว่างรูปแบบของกราฟให้มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากการทดลองให้มากที่สุด ในการพิจารณาความเหมาะสมของกราฟที่จำลองขึ้น สามารถพิจารณาได้จากค่า R โดยค่า R เหล่านี้จะต้องถูกปรับให้มีค่าเหมาะสมซึ่งจะต้องพิจารณาจากโครงสร้างของสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยและต้องพึงตระหนักว่าค่าเหล่านี้จะไม่ใช้ค่าที่วัดได้จากการทดลองโดยตรง แต่เป็นค่าที่พิจารณาจากรูปแบบของโครงสร้างของสารโดยผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ และค่าที่มีความสำคัญอีกค่าหนึ่งคือค่า χ^2 เป็นค่าที่เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า R_{wp} และ R_p หลักเกณฑ์ในการพิจารณาค่า χ^2 คือ ถ้ามีค่าน้อยจะเป็นค่าที่ดีและเป็นที่ยอมรับ ในกรณีที่ค่านี้มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง อาจแสดงให้เห็นว่าการพิจารณารูปแบบโครงสร้างของสารเกิดความผิดพลาด (Young. 2002: 22) การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอพของสารแต่ละสูตรสามารถแสดงค่า R_p , R_{wp} และ χ^2 ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับการจำลองกราฟของสารกลุ่มนี้ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆดังตาราง 9

ตาราง 9 ค่า R_p , R_{wp} และ χ^2 ของสาร

สาร	ค่า R_p , R_{wp} และ χ^2		
	R_p (%)	R_{wp} (%)	χ^2
Y123	8.55	12.4	2.61
Y156	5.98	8.19	1.14
Y358	7.79	10.6	1.71
Y3-8-11	7.60	11.0	1.87
Y5-8-13	8.47	12.7	2.76
Y7-11-18	9.99	12.3	2.16
Y13-20-33	7.87	11.6	2.59

ที่มา: Sujinnapram;et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

ตำแหน่งอะตอมของสาร

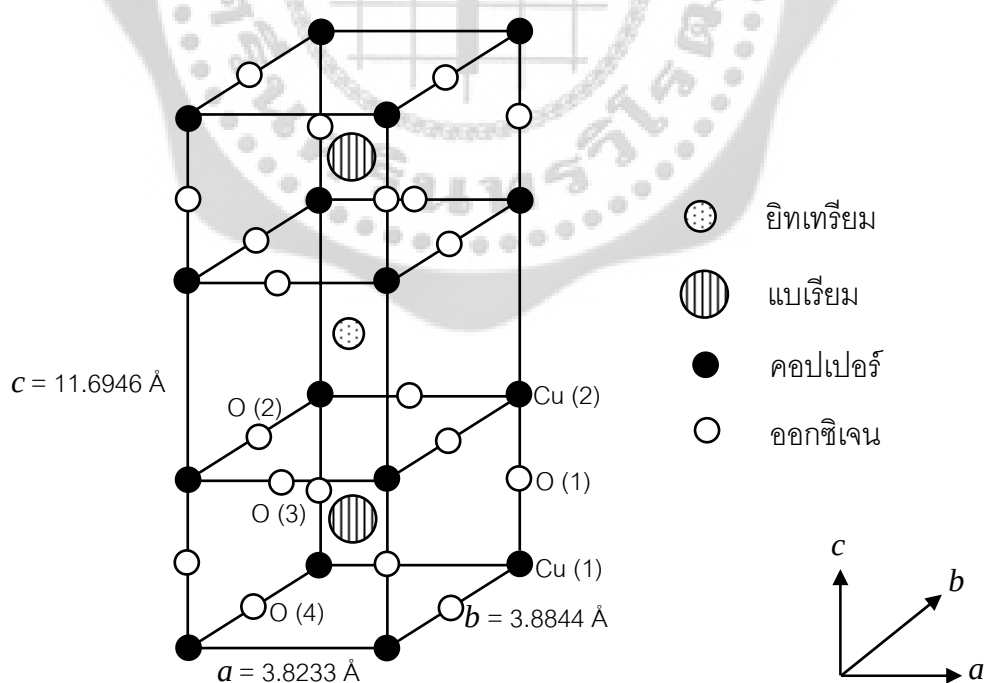
จากตาราง 8 แสดงค่าคงตัวของหน่วยเซลล์และค่าของตำแหน่งอะตอมของสาร ซึ่งสามารถนำค่าดังกล่าวมาสร้างเป็นรูปแบบจำลองของหน่วยเซลล์ให้เป็นภาพสามมิติได้ โดยสารแต่ละสูตรมีตำแหน่งอะตอมของธาตุที่มีตำแหน่งคงที่ดังนี้ Y อยู่ที่ตำแหน่ง $(1/2, 1/2, 1/2)$ Cu(1) อยู่ที่ตำแหน่ง $(0, 0, 0)$ O(4) อยู่ที่ตำแหน่ง $(0, 1/2, 0)$ และมีอะตอมในตำแหน่ง c ที่มีตำแหน่งของอะตอมของธาตุต่างๆ ที่เปลี่ยนไปมีรายละเอียดดังตาราง 10

ตาราง 10 ตำแหน่งอะตอมของธาตุต่างๆ ของสาร

ตำแหน่งอะตอมของธาตุต่างๆ ของสาร					
ตำแหน่ง	Ba	Cu(2)	O(1)	O(2)	O(3)
a (Å)	1/2	0	0	0	1/2
b (Å)	1/2	0	0	1/2	0
c (Å) ของ Y123	0.1845	0.3583	0.1796	0.3920	0.3815
c (Å) ของ Y156	0.1823	0.3573	0.1629	0.3814	0.3764
c (Å) ของ Y358	0.1772	0.3591	0.1476	0.3710	0.3550
c (Å) ของ Y3-8-11	0.1769	0.3581	0.1518	0.3605	0.3537
c (Å) ของ Y5-8-13	0.1862	0.3596	0.1718	0.4058	0.3673
c (Å) ของ Y7-11-18	0.1831	0.3504	0.1690	0.3991	0.3743
c (Å) ของ Y13-20-33	0.1455	0.3221	0.1738	0.4454	0.4090

ที่มา: Sujinnapram;et al. (2011). *Bulletin of Materials Science*. (accept)

จากตาราง 10 สามารถสร้างแบบจำลองโครงสร้างของสารเป็นภาพ 3 มิติ ดังภาพประกอบ 36

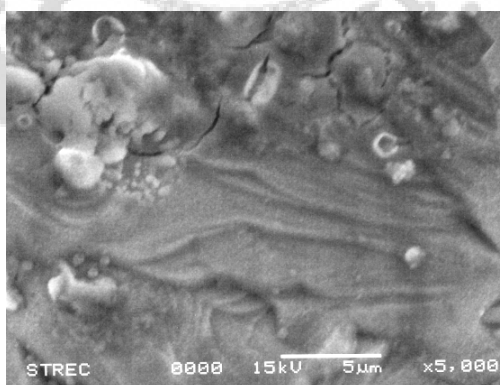


ภาพประกอบ 36 ตำแหน่งอะตอมของ Y123

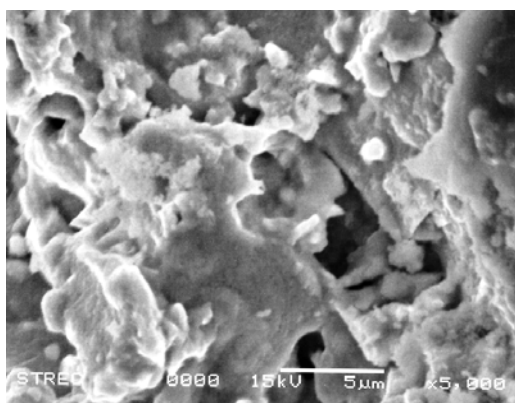
โดยสารในสูตรอื่นจะมีขนาดของค่า c ที่แตกต่างกันตามตาราง 10

3.2 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวและวิเคราะห์ธาตุ

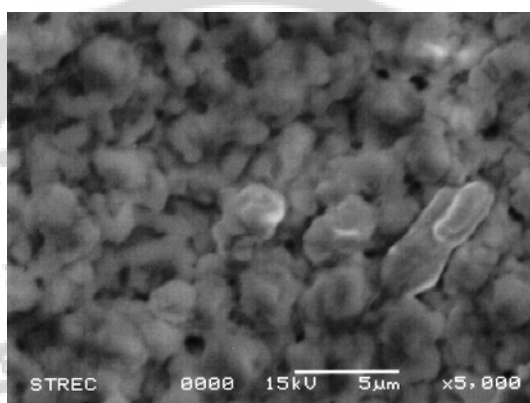
การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการทดลองเพื่อสำรวจลักษณะพื้นผิวของสาร ได้แก่ ความเป็นเนื้อเดียวกันของสาร ขนาดของอนุภาค และเกรน โดยเกรนคือ พื้นผิวที่เรียงต่อกัน มีการแบ่งขอบเขตระหว่างเกรนหนึ่งกับอีกเกรนหนึ่งอย่างชัดเจน สิ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดเกรน คือองค์ประกอบของสาร กล่าวคือถ้าสารมีองค์ประกอบของสารชนิดเดียวกันมากจะสามารถทำให้เกิดเกรนที่ใหญ่ขึ้น(Kim; & et al. 1997: 4701) และระดับของอุณหภูมิจะมีผลทำให้เกิดการหลอมรวมของเกรนแต่ละเกรนได้(Murakami. 1992: 21) การเกิดเกรนที่มีขนาดใหญ่ส่งผลที่ดีและเป็นสิ่งที่ต้องการ วิธีการวัดเพื่อหาขนาดของเกรนใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การทดลองด้วยวิธีนี้ใช้สารที่มีลักษณะเป็นก้อนมาติดด้วยเทปกาวยาคาร์บอนสองหน้าแล้วนำไปวางในที่จับสารตัวอย่างโดยไม่ต้องเคลือบด้วยทอง ใช้กำลังขยาย 5,000 เท่าเพื่อศึกษาพื้นผิว การศึกษาพื้นผิวด้วยกำลังขยายเท่านี้ มีการรายงานในปี ค.ศ. 2007 โดยกลุ่มของเฟ่งและคณะ (Feng; & et al. 2007: 54) พบว่าพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 โดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.4-0.8 ไมโครเมตร ด้วยการเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากการทดลองนี้พบว่าสารที่เตรียมได้ทุกสูตรสามารถเกิดเกรนที่มีขนาดเฉลี่ย 0.8 ไมโครเมตร การสำรวจสภาพพื้นผิวของสารแต่ละสูตรโดยส่วนใหญ่แล้วมีรอยแตกมีรูพรุนและไม่เป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควร ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการลดลงของอุณหภูมิยังไม่ดีพอ จึงทำให้เกิดเกรนที่มีขนาดเล็กดังภาพถ่ายผิวของสารดังนี้



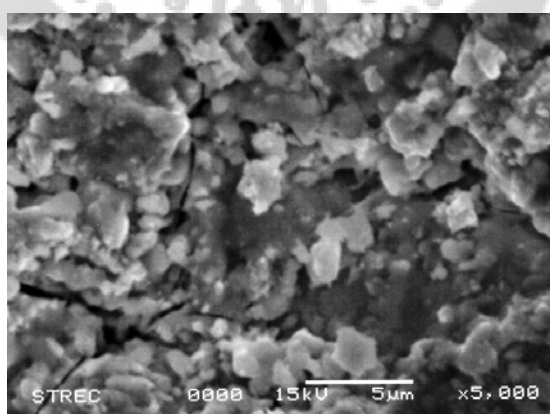
ภาพประกอบ 37 ภาพถ่ายผิวของ Y123



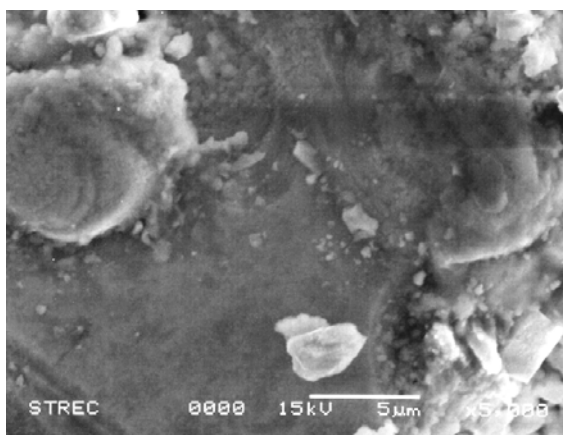
ภาพประกอบ 38 ภาพถ่ายผิวของ Y156



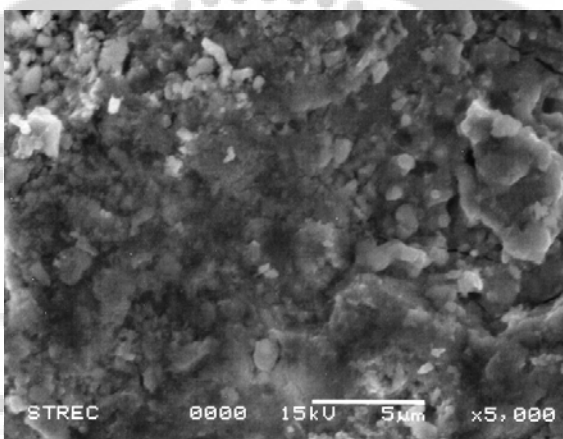
ภาพประกอบ 39 ภาพถ่ายผิวของ Y358



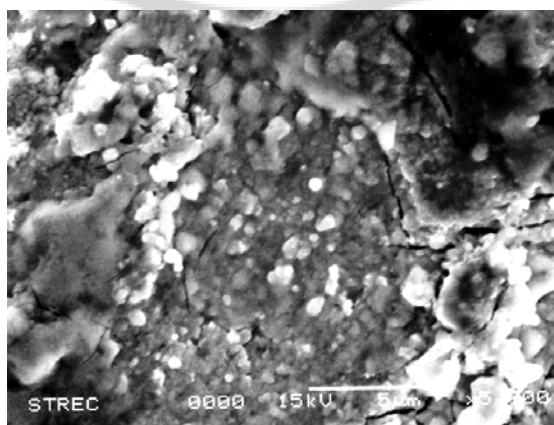
ภาพประกอบ 40 ภาพถ่ายผิวของ Y3-8-11



ภาพประกอบ 41 ภาพถ่ายผิวของ Y5-8-13



ภาพประกอบ 42 ภาพถ่ายผิวของ Y7-11-18



ภาพประกอบ 43 ภาพถ่ายผิวของ Y13-20-33

เมื่อทดลองด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมแล้วสามารถถ่ายภาพของสารแต่ละภาพ ในขณะเดียวกันสามารถทำการทดลองด้วยวิธีการวัดด้วยวิธีเอกซเรย์สเปกโตรโกปีแบบการกระจายพลังงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุผลการทดลองมีดังนี้

ผลการทดลองการวัดแบบเอกซเรย์สเปกโตรโกปีแบบการกระจายพลังงาน พบว่าสารแต่ละสูตรมีจำนวนอัตราส่วนของ ยิทเทรียม(Y) แบเรียม(Ba) คอปเปอร์(Cu) และ ออกซิเจน(O) ที่แตกต่างกัน โดยไม่พบสารเจือใดๆ สารแต่ละสูตรมีตัวเลขสามตัว ตัวเลขตัวแรกจะแสดงอัตราส่วนของธาตุ ยิทเทรียม ตัวเลขตัวที่สองแสดงอัตราส่วนของธาตุแบเรียม และตัวเลขตัวสุดท้ายแสดงอัตราส่วนของธาตุคอปเปอร์ ตามลำดับ จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะรายงานปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของธาตุทั้ง 4 ชนิด จากนั้นผู้วิจัยได้คำนวณโดยทำการปรับค่าให้อัตราส่วนของสารแต่ละสูตรตรงกับอัตราส่วนของเลขตัวแรกก่อน แล้วคำนวณอัตราส่วนของ แบเรียม คอปเปอร์และออกซิเจนถัดไป สามารถแสดงข้อมูลของอัตราส่วนของปริมาณธาตุต่างๆ ที่ได้จากการปรับค่า เพื่อต้องการที่จะเปรียบเทียบกับสูตรของสาร ดังตาราง 11 พบว่าอัตราส่วนของแบเรียม และคอปเปอร์ มีค่าไม่ตรงกับสูตรของสาร แสดงให้เห็นว่าสารที่เตรียมขึ้นมีการกระจายตัวของปริมาณธาตุต่างๆ ที่ไม่สม่ำเสมอ

ตาราง 11 อัตราส่วนของธาตุยิทเทรียม(Y) แบเรียม(Ba) คอปเปอร์(Cu) และออกซิเจน(O)ของสาร

สาร	ยิทเทรียม	แบเรียม	คอปเปอร์	ออกซิเจน
Y123	1	1.79	1.69	6.79
Y156	1	1.52	1.39	10.74
Y358	3	7.20	0.59	24.91
Y3-8-11	3	10.35	8.82	66.31
Y5-8-13	5	25.52	12.83	81.33
Y7-11-18	7	14.95	14.74	88.76
Y13-20-33	13	25.58	29.14	189.69

3.3 การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์

กระบวนการเตรียมสารเพื่อให้เกิดโครงสร้างของสารกลุ่มนี้ จะต้องใช้กระบวนการเผาที่มีช่วงของอุณหภูมิระหว่าง 880-980 องศาเซลเซียส (Subramanyam, 1989: 11) ถ้าอุณหภูมิของการเตรียมสารสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดในช่วงดังกล่าว จะทำให้สารนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นองค์ประกอบของสารประกอบอื่น จึงได้มีการทดลองเพื่อหาค่าของอุณหภูมินี้ หรือ อุณหภูมิ

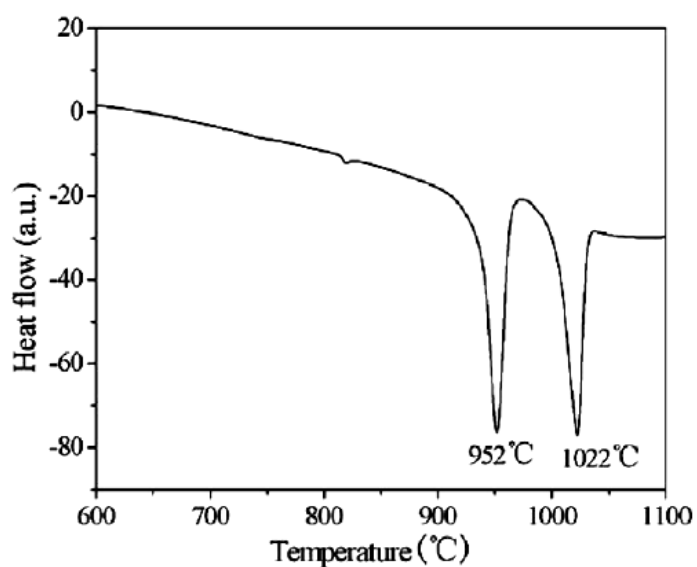
เพอร์ริเทคติก การทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมินี้โดยเฉพาะ Y123 ได้มีการรายงานโดย สุมราแมนยัม (Subramanyam. 1989:9) ในปีค.ศ.1989 ว่าค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสารกลุ่มนี้มีค่าเท่ากับ 1,020 องศาเซลเซียส และนอกจากนี้ยังมีสารที่อยู่ในประเภทเดียวกันกับ Y123 อีกประกอบด้วย Nd123 Sm123 Eu123 Gd123 และ Dy123 มีการรายงานไว้โดย เซาและคณะ (Zhao; et al. 1995: 402) ซึ่งมีรายละเอียดของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสารกลุ่มดังกล่าว ดังตาราง 12

ตาราง 12 ค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสารกลุ่มอื่นๆ

สาร	อุณหภูมิเพอร์ริเทคติก(องศาเซลเซียส)
Nd123	1,063
Sm123	1,058
Eu123	1,056
Gd123	1,031
Dy123	1,041

ที่มา: Zhao; et al. (1995). *Solid State Communication*. p. 402

การทดลองเพื่อหาค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกจะต้องให้ความร้อนกับสารที่ต้องการจะศึกษา โดยปฏิกิริยาทางความร้อนที่เกิดขึ้นกับสารเมื่อได้รับความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาคายพลังงาน(Exothermic reaction) และปฏิกิริยาดูดพลังงาน (Endothermic reaction) การศึกษาปฏิกิริยาทางความร้อนของ Y123 ได้มีการรายงานไว้โดย เฟ่งและคณะ(Feng; & et al. 2007: 53) โดยได้เตรียม Y123 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ใช้สารตั้งต้นคือ Y_2BaCuO_5 $BaCuO_2$ และ CuO พบว่าเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนสองครั้ง โดยปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนครั้งแรกจะเป็นการหลอมรวมกันของสารตั้งต้นมีผลทำให้เกิด Y123 ขึ้น เมื่อเพิ่มความร้อนกับระบบอีก Y123 จะเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนอีกครั้ง มีผลทำให้ Y123 เกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบอื่น ดังภาพประกอบ 44



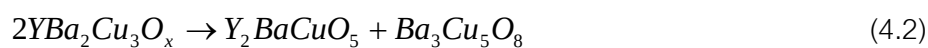
ภาพประกอบ 44 ปฏิริยาแบบดูดความร้อนของ Y123

ที่มา: Feng; & et al. (2007). *Physica C*. p. 53

จากปฏิริยาแบบดูดความร้อนที่เกิดขึ้นในครั้งแรกที่ ที่อุณหภูมิ 952 องศาเซลเซียส สามารถเขียนเป็นสมการ (4.1) ได้ ดังนี้

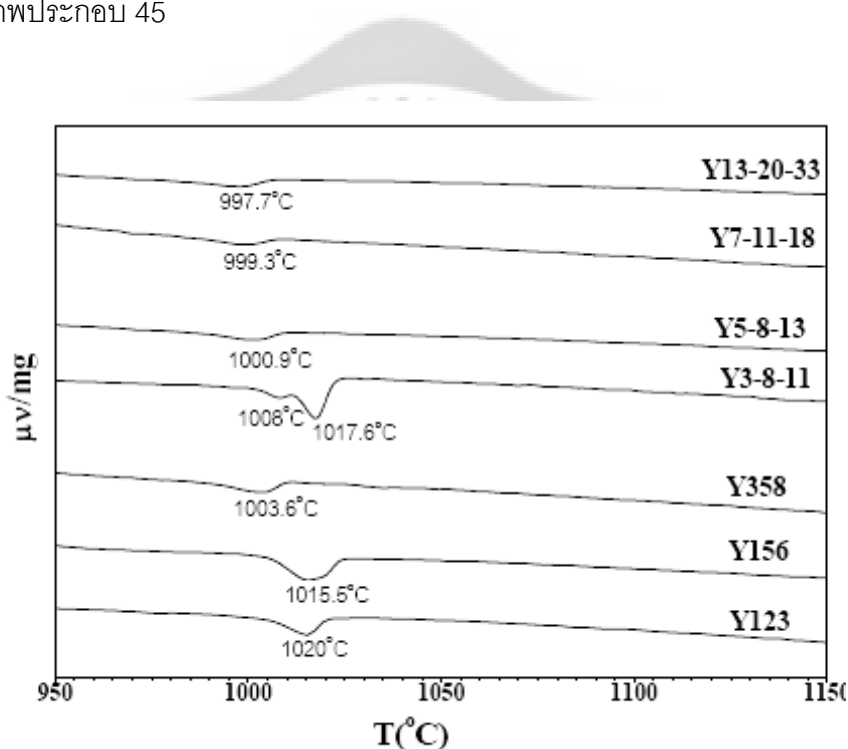


เมื่อให้ความร้อนของระบบเพิ่มขึ้นจะเกิดการสลายตัวของ Y123 ซึ่งเป็นปฏิริยาแบบดูดความร้อนในครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 1,022 องศาเซลเซียส สามารถเขียนสมการของการสลายตัวของ Y123 ได้ ตามสมการ (4.2)



อุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสาร

จากการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสารแต่ละสูตรจะพิจารณาช่วงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ถึง 1,150 องศาเซลเซียส พบว่าสารมีค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกที่ต่างกัน และเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนทั้งหมด โดยสารแต่ละสูตรจะเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนเพียงครั้งเดียว ยกเว้นสารสูตร Y3-8-11 จะเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนสองครั้ง ในครั้งแรกเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนที่ไม่ชัดเจนเกิดที่อุณหภูมิ 1,008 องศาเซลเซียส สามารถบ่งชี้ได้ว่าเป็นการสลายตัวของแบเรียมบางส่วนก่อน (Murakami, 1992: 22) และจะเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนที่ชัดเจนในครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 1,017.6 องศาเซลเซียส ผลการทดลองการหาค่าอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสารแต่ละสูตรมีดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 ปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนของสาร

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยในบทที่ 4 เป็นผลการทดลองจากการเตรียมสารกลุ่ม YBaCuO การวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อหาค่าของอุณหภูมิวิกฤต และการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ด้วยเครื่องมือแบบต่างๆ ผลการทดลองจากการวัดคุณลักษณะต่างๆ ของสารสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เตรียมสารกลุ่ม YBaCuO ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้น คือ ยิบเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีแนวทางในการเตรียมสาร คือ จำนวนอะตอมของยิบเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ จากแนวทางนี้จึงเตรียมสารเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ขึ้นมา 7 สูตร ประกอบด้วย Y123 Y156 Y358 Y3-8-11 Y5-8-13 Y7-11-18 และ Y13-20-33 โดยสารแต่ละสูตรมีปริมาณของสารตั้งต้นที่ต่างกัน จากนั้นนำสารตั้งต้นที่ผสมกันแล้วนำเข้าสู่กระบวนการเผาแบบผงกระบวนการเผาแบบขึ้นรูปและกระบวนการเผาแบบอบ ตามลำดับ สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนเมื่อนำมาวัดสมบัติทางกายภาพและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสารทุกสูตร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ Y123 จากนั้นนำไปวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว พบว่าสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้น ($T_{c,onset}$) สูงสุดเท่ากับ 94 เคลวิน ได้แก่ Y358 Y3-8-11 และ Y5-8-13 สารที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงสุด คือ Y156 และสารสูตรอื่นๆ มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นใกล้เคียงกับค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นของ Y123

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของสารใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แล้วใช้โปรแกรมฟูลพรอฟเพื่อทำการวิเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบ พบว่าสารทุกสูตรมีองค์ประกอบของสาร 2 ชนิด คือ สารนำยวดยิ่งและสารปกติ สารนำยวดยิ่งมีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ a และค่า b ใกล้เคียงกับค่า a และค่า b ของ Y123 แต่มีค่าของ c เพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ การเกิดสเปกตรัมหลักๆ ของสารทุกสูตรมีความคล้ายคลึงกับ Y123 นอกจากนี้ในการหาตำแหน่งอะตอมจะต้องใช้ตำแหน่งอะตอมของธาตุต่างๆ ของ Y123 มาเป็นค่าเริ่มต้น และพบว่าสารทุกสูตรมีตำแหน่งอะตอมใกล้เคียงกับ Y123 จะต่างกันเพียงเล็กน้อยในตำแหน่งของ c อีกทั้งค่า R_p , R_{wp} และ χ^2 จะต้องอาศัยข้อมูลของ Y123 มาเป็นข้อมูลในการคำนวณในขั้นแรก

จากการศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวัดแบบวิธีเอกซ์เรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน พบว่าสารทุกสูตรมีขนาดของเกรนประมาณ 0.8 ไมโครเมตร ซึ่งจะมีค่าเท่ากับขนาดของเกรนของ Y123 ของเฟ่งและคณะ(Feng; et al.2007:54) สำหรับการหาสัดส่วนของปริมาณธาตุของสารสูตรอื่นๆ พบว่าธาตุเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในสารแต่ละสูตร ถ้าปรับสัดส่วนให้อัตราส่วนของยิทเทรียมมีค่าเป็นหนึ่งส่วนทั้งหมด พบว่าสัดส่วนของธาตุของสารในกลุ่มนี้มีค่าใกล้เคียงกับ Y123

การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์พบว่าสารทั้งหมดมีปฏิกิริยาทางความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบเดียวกับ Y123 และค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของสารสูตรอื่นมีค่าที่อยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองหาอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกของ Y123 ซึ่งจากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสารแต่ละสูตรที่เตรียมขึ้นเป็นสารที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างของ Y123

2. อภิปรายผลการทดลอง

จากการเตรียมสารกลุ่ม YBaCuO ที่ประกอบด้วย Y123 Y156 Y358 Y3-8-11 Y5-8-13 Y7-11-18 และ Y13-20-33 ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองโครงสร้างของสารสูตรต่างๆ โดยใช้รูปแบบโครงสร้างของ Y123 ซึ่งจากรูปแบบจำลองนี้พบว่าเกิดการว่างของตำแหน่งอะตอมของยิทเทรียมขึ้นในสารทุกสูตร ยกเว้น Y123 ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความคาดหวังว่าสารสูตรใหม่นี้จะมีโอกาสทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า Y123 และจากการทดลองวัดค่าของอุณหภูมิวิกฤตของสารนี้ โดยใช้วิธีการวัดแบบ 4 ขั้ว พบว่าสารที่มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นเท่ากับ 94 เคลวิน ได้แก่ Y358 Y3-8-11 และ Y5-8-13 โดย Y3-8-11 จะมีผลต่างระหว่างค่าของอุณหภูมิวิกฤตปลาย($T_{c,offset}$) และค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้น($T_{c,onset}$)น้อยที่สุด สารที่มีความต้านไฟฟ้าสูงสุด คือ Y156 ซึ่งจะสอดคล้องกับสเปกตรัมของเอกซ์เรย์ พบว่ามีสเปกตรัมของสารปกติมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารสูตรอื่นๆ ส่วนค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารแต่ละสูตร มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นใกล้เคียงกับค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นของ Y123 โดย Y358 ที่เตรียมได้(Udomsamuthirun; et al.2010: 1380) มีค่าของอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้นของ Y358 ของกลุ่มอะไลบาดีและคณะ (Aliabadi; et al. 2009: 2012) จากการนำสารไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าการเกิดขึ้นของสเปกตรัมหลักๆ มีตำแหน่งเดียวกับ Y123 จึงทำให้คาดว่าสารสูตรใหม่นี้มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ใกล้เคียงกับ Y123 ทั้งหมด และให้ความสำคัญของการเกิดสเปกตรัมที่ 15 อนาคตน่าจะมีความสำคัญกับสารกลุ่มนี้จึงทำการวัดสเปกตรัมจากมุม 10 องศาจนกระทั่งถึงมุม 90 องศา เพื่อแสดงผลของการเกิดสเปกตรัมที่ 15 อนาคต แต่ผลการทดลองของกลุ่มอะไลบาดีและคณะ(Aliabadi; et al.

2009: 2012) ได้แสดงสเปกตรัมจากมุม 20 องศา จนกระทั่งถึงมุม 80 องศา ซึ่งจะละทิ้งสเปกตรัมที่ 15 องศา อีกทั้งสามารถคำนวณค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ a และ b ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Y123 แต่มีค่า c ที่ยาวกว่า Y123 เกือบ 3 เท่า จึงทำให้คณะผู้วิจัย(Sujinnaprum; et al. 2011: accept) ได้นำข้อมูลจากการทดลองนี้มาคำนวณใหม่อย่างละเอียดโดยใช้โปรแกรมฟูลพรอพเพื่อหา รูปแบบโครงสร้าง ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ เฟสส่วนผสม และกลุ่มปริภูมิ พบว่าสารทุกสูตรมีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์โธอมบิก ค่า a และ b มีค่าใกล้เคียงกับ Y123 แต่มีค่าของ c ไม่เท่ากับ Y123 และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ สามารถจำแนกสารที่เป็นองค์ประกอบได้ 2 ชนิด คือ สารนำยวดยิ่งและสารปกติ สารที่มีสารนำยวดยิ่งมากประกอบด้วย Y123 Y7-11-18 และ Y13-20-33 และสารที่มีสารนำยวดยิ่งน้อย ประกอบด้วย Y156 Y358 Y3-8-11 และ Y5-8-13 สารนำยวดยิ่งมีกลุ่มปริภูมิแบบ Pmmm และสารปกติมีความแตกต่างในรูปแบบโครงสร้างและกลุ่มปริภูมิ จากค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่งสามารถคำนวณตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทางได้พบว่าสารที่มีค่านี้สูงสุดคือ Y5-8-13 ซึ่งเป็นสารที่มีสารปกติที่เป็นองค์ประกอบมากที่สุดถึง 3 ชนิด คือ Y_2BaCuO_5 , $BaCuO_2$ และ Ba_2CuO_6 และมีกลุ่มปริภูมิและรูปแบบของโครงสร้างที่แตกต่างกันจึงสามารถสรุปได้ว่าสารที่มีค่าตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทางสูงจะมีองค์ประกอบของสารหลายชนิดที่มีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน ส่วนสารที่มีสารนำยวดยิ่งมากจะมีค่าตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทางน้อยกว่าสารนำยวดยิ่งต่ำ อย่างไรก็ตาม สารปกติจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า c ของสาร และยังพบอีกว่าตัวแปรที่ขึ้นกับทิศทางนี้สามารถแสดงให้เห็นว่าสารนั้นจะเกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งจากการสำรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวมีความพรุนและไม่เป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากความแตกต่างกันของสารเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เกิดการรวมกันเป็นเนื้อเดียวได้ยาก คอร์ตไคกาและคณะ (Kortyka; et al. 2010:217) ได้เสนอว่าการเกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของธาตุหายาก(rare earth)ว่าจะเกิดขึ้นเป็นปกติของสารกลุ่มนี้ และจะทำให้ธาตุต่างๆ จะเกิดการกระจายตัวและทำให้แต่ละบริเวณมีอัตราส่วนของธาตุไม่ตรงกับสูตรที่เตรียมขึ้น ส่วนการวัดค่าของอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกที่ต่างกับ Y123 คือ สารสูตร Y7-11-18 และ Y13-20-33 พบว่าสารทั้งสองสูตรนี้มีสัดส่วนของแบเรียมสูง จึงเกิดอุณหภูมิเพอร์ริเทคติกต่ำ เนื่องจากธาตุแบเรียมเป็นธาตุที่เกิดการสลายตัวก่อนเพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุยิทเทรียมและคอปเปอร์

3. ข้อเสนอแนะ

1. เมื่อนำสารแต่ละสูตรที่เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ การสำรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวัดแบบเอกซ์เรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน พบว่ามี สเปกตรัมของสารปกติปริมาณมาก ขนาดของเกรนที่มีขนาดเล็ก และการกระจายตัวของธาตุไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้น สิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อการเป็นสภาพนำยวดยิ่งของสาร ในการวิจัยในโอกาสต่อไป สามารถเปลี่ยนกระบวนการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนของสาร(co-precipitation method)โดยวิธีการนี้จะทำให้ได้สารที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง สเปกตรัมของสารจะลดลง ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น(Adrian;& et al.1996:27)และเพิ่มการทดลองในส่วนของการฉายรังสี ได้แก่ การใส่ก๊าซออกซิเจนเข้าไปขณะทำการเผา และ การเตรียมในท่อควอซท์ เพื่อให้สารเกิดผลึกเดี่ยว(single crystal) หรืออาจจะใช้การเผาแบบหลอม(melt process) ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 กระบวนการนี้เป็นวิธีการที่สามารถปรับปรุงคุณภาพของสารให้ดีขึ้น และอาจจะเป็นแนวทางที่จะสามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้สูงขึ้นได้

2. กระบวนการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ จะต้องใช้ค่าของความเข้มแสงของการเลี้ยวเบน (intensity) ที่มีค่าสูง เพื่อที่จะได้ค่าของหน่วยเซลล์ เฟสที่เป็นองค์ประกอบ และตำแหน่งของอะตอมถูกต้องและน่าเชื่อถือ การทดลองที่จะให้ค่าของความเข้มแสงของการเลี้ยวเบนสูงๆ และสามารถนำข้อมูลจากผลจากการทดลองมาด้วยโปรแกรมนี้ ได้แก่ วิธีการเลี้ยวเบนของนิวตรอน(neutron diffraction) และวิธีการเลี้ยวเบนซินโครตรอน(synchrotron)

3. ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้เกิดการเสื่อมสภาพได้เนื่องจากความชื้น ดังนั้นเมื่อทำอุณหภูมิวิกฤตเสร็จแล้ว หากสารมีความชื้นเกิดขึ้น ควรนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ในกรณีที่สารเกิดการเสื่อมสภาพแล้วสามารถนำไปเผาด้วยกระบวนการเดิมเพื่อปรับปรุงสภาพของสารได้



บรรณานุกรม

- Abakumov, A.M.; et al. (1998). Effect of Fluorination on the Structure and Superconducting Properties of $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{14-x}$ phase. *Physica C*. 301:155-164.
- Adrian, A.; et al. (1996). A Spectroscopic Comparison of YBaCuO Superconductors Synthesized by Solid-state and Co-precipitation Method. *Materials Letters*. 28: 27-32.
- Aliabadi, A.; Farshchi, A.; & Akhavan, M. (2009). A New Y-based HTSC with T_c above 100 K. *Physica C*. 469: 2012–2014.
- Anthony, R.; & West, D. (1999). *Basic Solid State Chemistry 2nd edition*. New York. John Wiley & Sons.
- Bardeen, J.; Cooper, N.; & Schrieffer, J.R. (1957). Theory of Superconductivity. *Physical Review*. 108(5): 1175-1204.
- Bednorz, J.G.; & Muller, K.A. (1986). Possible High T_c Superconductivity in the BaLaCuO System. *Zeitschrift fuer Physik B*. 64: 189-193.
- Bednorz, J.G.; & Muller, K.A. (1987). *Perovskite - Type Oxide - The New Approach to High- T_c Superconductivity*. Nobel lecture: 424-456.
- Buckel, W. (1911). *Superconductivity Fundamental and Application*. New York: VCH Publisher Inc.
- Corder, K. (2001). Oxygen Diffusion in the Superconductors of the YBaCuO family. *Material Science and Engineering*. 32: 41-43.
- Deaver, B.S.; & Fairbank, W.M. (1961). Experimental Evidence for Quantized flux in Superconducting Cylinders. *Phys. Rev. Lett.* 7: 43-46.
- Differential Thermal Analysis. (2010). Retrieved December 7, 2010. From <http://www.globalspec.com>.
- Dull, W. (2007). A Teachers Guide to Superconductivity for High School Student. Retrieved December 11, 2010. from <http://www.chabanoisedric.tripod.com>.
- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy. (2010). Retrieved December 7, 2010. From <http://www.wikipedia.org.EDX-sheme>.

- Fetter, A.L.; & Walecka, J.D. (1995). *Quantum Theory of Many Particle System*. Singapore. McGraw-Hill Book Co.
- Feng, J.; et al. (2007). The Study on Melting Behavior of Precursor Powders for Powder Melting Processed $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Superconductors. *Physica C*. 459: 52-55.
- Friedberg, P. (2002). EECS143 Microfabrication Technology. Four Probe Manual. 1-3. California University. Photocopied.
- Fukushima, T.; et al. (2008). Tri-axial Grain Orientation of $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_y$ Achieved by the Magneto-Science Method. *Applied Physics Express*. 111701: 1-3.
- Fullprof. Crystallographic Tool for Rietveld, Profile Matching and Integrated Intensity Refinement of X- ray and Neutron Data Retrieved October 26,2010, from <http://www.ill.eu>
- full prof.
- Ginzburg V.L.; & Landau L.D. (1950). *Sov.Phys.Jetp*. 20: 1064.
- Hegde, M.S.; et al. (1997). Phase Stability of Superconductive $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$. *Material Research Bulletin*. 32: 1147-1153.
- Hijar, C.A.; et al. (1995). Single-crystal Growth and Characterization of $\text{REBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ And $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$. *Physica C*. 252: 13-21.
- Hock, K.H.; et al. (1983). Evidence for Jahn-Teller Polaron Formation in Cuprate Superconductor. *Phys.Acta*. 56: 273.
- Hong, T.; et al. (1995). Microstructure And Properties of YBaCuO Superconductor Prepared By MTG Method. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 8:210.
- Kato, M.; et al. (1998). Microscopic study on $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-x}$ by use of TEM and NQR Techniques. *Solid state chemistry*. 139: 266-273.
- Kim, C.; et al. (1997). Three-dimensions shape of the Y_2BaCuO_5 Pattern in Melt-textureed Y-Ba-Cu-O Oxide. *Journal of Materials Science*. 32: 4701-4709.
- Kittel, C. (1991). *Introduction to Solid State Physics* 6th edition. New York. John Wiley & Sons.
- Korty, A.; et al. (2010). Irreversibility Line and Anisotropy of $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ with Varying Oxygen Content. *Physica C*. 470: 217-218.
- London, F.; & London, H. (1935). *Proc.Roy.Soc*. 149: 71.

- Marsh, P.; et al. (1988). Crystal Structure of 80 K Superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$. *Nature*. 334: 141-143.
- Maxwell, E; & Reynolds, C.A. (1950). Isotope Effect in the Superconductivity of Mercury. *Physical Review Letters*. 78: 477.
- Materials Chemistry group. (2006). Preparation Structure and Properties of a High Temperature Superconductor. Retrieved November 18, 2010, From [http: chem. com/ super.html](http://chem.com/super.html).
- Meissner, W.; & Ochsenfeld, R. (1933). *Naturwissenschaften*. 21: 787.
- Murakami, M. (1999). Melt Process High-Temperature Superconductors. World Scientific Publishing.
- Murase, S; et al. (2001). Critical Temperature Measurement Method of Composite Superconductors. *Physica C*. 357-360: 1197-1200.
- Okumus, S. (2004). *Preparation Condition and Characterization on YBaCuO based Superconductor*. M.Sc.(Physics): Graduate school of Natural and Applied Science of Dokuz Eylul University. Photocopied.
- Rodriguez, J. (2000). An Introduction to the program Fullprof. Laboratory Leon Brillouin.
- Sato, S.; et al. (2010). Critical Temperature and Orthorhombicity of $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-x}$. *Physica C*. 470: 17-18.
- Smits, F.M.(1958). The Bell System Technical Journal: 711-718.
- Storey, J.(2007). *Electronic Structure and Thermodynamic Properties of High Temperature Superconductors*.Dissertation,Ph.D.Graduate school The University of Wellington. Photocopied.
- Subramanyam, S.V.(1989).High Temperature Superconductors.New Delhi.Wiley Eastern Limited.
- Sujinapram, S.; [Udomsamuthirun, P.](#); Kruaehong, T.; Nilkamjon, T.; & Ratreng, S. (2011). The XRD Spectra of New YBaCuO Superconductors. *Bulletin of Materials Science*. (accept).
- Tavana, A.; & Akhavan, M. (2010). How T_c can go above 100 K in the YBCO family. *Euro Physics Journal. B*. 73: 79-83.

Terrell,A. (1991). *Chemistry Of Superconductor Materials*. New Jersey. Noyes Publications.

[Udomsamuthirun](#),P.; Kruaehong,T.; Nilkamjon,T.;& Ratreng,S.(2010).The New superconductors of YBaCuO Materials.*Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*.23:1377-1380.

Wu, K.; et al. (1987). Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Phys. Rev. Lett.* 58: 908–910.

Young,R.A. (2002). *The Rietveld Method*. Oxford University Press.

Zhao,Z.X. (1995). An Empirical Rule of Critical Temperature in Cuprate Superconductors. *Solid State Communication*. 6: 401-403.





ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นาย จูติพงศ์ เครือหงส์
วันเดือนปีเกิด	23 มิถุนายน 2522
สถานที่เกิด	อ.บ้านนาเดิม จ.สุราษฎร์ธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	287 หมู่ 2 ต.บ้านนา อ.บ้านนาเดิม จ.สุราษฎร์ธานี 84240
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2540	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนสุราษฎร์ธานี
พ.ศ.2545	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยรามคำแหง
พ.ศ.2549	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ.2554	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้มีผลงานที่ได้ยอมรับการตีพิมพ์และนำเสนอแบบบรรยายเพื่อใช้ประกอบและเป็นส่วนหนึ่งของการจบการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒมีผลงานวิจัยดังนี้

International Journal 2 เรื่องประกอบด้วย

1. [Pongkaew Udomsamuthirun.](#), [Thitipong Kruaehong.](#), Tunyanop [Nilkamjon.](#), Sermsuk [Ratreng.](#) "The New Superconductors of YBaCuO Materials" *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. (2010) .Vol 23: 1377-1380. (impact factor =0.830)

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 30%

2. Sujinnapram.S., Udomsmuthirun.P., [Kruaehong.T.](#), Nilkamjon.T., Ratreng.S. "The XRD Spectra of New YBaCuO Superconductors". *Bulletin of MaterialsScience*. (2011). (accepted). (impact factor =0.783)

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 15%

National Journal 3 เรื่องประกอบด้วย

1.Montar Eamsomboon., Natnaree Darunnet., Sarunrot Pojtham., Thitipong Kruaehong., Tunyanop Nilkamjon., Sermsuk Ratreng., Pongkaew Udomsamuthirun. “The Study on Physical Properties Of Nd123 Synthesized by Melt Processing” *Srinakharinwirot Science Journal.* .(2010).Vol.26, pp. 107-117.

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 15 %

2.Tunyanop Nilkamjon., Pongkaew Udomsamuthirun., Sermsuk Ratreng., Wiwat Khruawong., Thitipong Kruaehong., Natnaree Darunnet., Montar Eamsomboon., Sarunrot Pojtham. “Numerical Calculation and Construction Helmholtz Magnetic Filed Coils” *Srinakharinwirot Science Journal.* (2010).Vol.26, pp. 119-130.

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 7 %

3.Thitipong Kruaehong., Tunyanop Nilkamjon., Sermsuk Ratreng., Natthaphong Theamyim., Piyapong Tambamrung., Supawat Doungrod., Pongkaew Udomsamuthirun. “The Construction of Maglev Train Model” *Srinakharinwirot Science Journal.*(2009).Vol.25, pp.91-99.

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 16% และเป็นผู้นิพนธ์ประสานงาน

National Conference 1 เรื่อง ประกอบด้วย

T.Nilkumjon,T., Kruaehong.T., S.Ratreng., K.Komolkittikarn., J.Yimde., M.Sombatrach., P.Udomsamthirun. “Study on Non-superconducting Phase:Y211” และนำเสนอแบบบรรยายในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 10 มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ระหว่างวันที่ 11-12 กันยายน 2551.

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 16 % และเป็นผู้นิพนธ์ประสานงาน

International Conference 3 เรื่องประกอบด้วย

1. Thitipong Kruaehong., Pongkaew Udomsamuthirun., Supphadate Sujinnapram., Tunyanop Nilkamjon., Sermasuk Ratreng., Wiwat Khruawong. "Investigate the Characterization of Y7-11 -18 Superconductor". *Laos Journal of Science*.(2011).Vol.2. (full paper) และนำเสนอแบบบรรยายใน

(3rd STGMS & 2nd ICAS) ระหว่างวันที่ 24-25 มีนาคม 2011 มหาวิทยาลัยสุโขทัยวังสกลวงษ์ หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 50% และเป็นผู้นิพนธ์ประสานงาน

2. Tunyanop Nilkamjon., Thitipong Kruaehong., Pongkaew Udomsamuthirun., Supphadate Sujinnapram., Sermasuk Ratreng., Wiwat Khruawong., Likhit Khao-ngam., Siriporn Netkraechang., Sukanya Manpayuk. "The Characterization of the (Nd/Y)Ba₂Cu₃O_{7-x} Composite Superconductors" *Laos Journal of Science*.(2011).Vol.2. (full paper).และนำเสนอโปสเตอร์ใน(3rd STGMS& 2nd ICAS) ระหว่างวันที่ 24-25 มีนาคม 2011 มหาวิทยาลัยสุโขทัยวังสกลวงษ์ หลวงพระบาง สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 10%

3. Nilkamjon,T., Kruaehong,T., and Udomsamutthirun, P., "Investigate Melt process Y123 Superconductor "Sustainable Development to Save the Earth.(2009). 7-9 April 2009, Millennium Hilton, Bangkok, Thailand, pp. 250-253. (full paper).และนำเสนอโปสเตอร์ ระหว่างวันที่ 7-9 เมษายน 2009 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 30% และเป็นผู้นิพนธ์ประสานงาน

Poster Presentation 1 เรื่องประกอบด้วย

Thitipong Kruaehong., Pongkaew Udomsamuthirun., Supphadate Sujinnapram.,Tunyanop Nilkamjon., Sermasuk Ratreng."Investigate the Characterization of Y7-11 -18 Superconductor"

Commission on Higher Education Congress IV University Staff Development Consortium CHE-USDS Congress IV.The Zign Hotel, Pattaya Chonburi province,14-16 September 2011.

มีสัดส่วนของผลงานวิจัย 50% และเป็นผู้นิพนธ์ประสานงาน