

ผลของการเจือเหล็กที่มีต่อความต้านทานของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่สังเคราะห์โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง DOPING EFFECT OF Fe ON RESISTIVITY OF Y156 SUPERCONDUCTOR SYNTHESIZED BY SOLID STATE REACTION

วรายุทธ บุญโยประการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2561



ผลของการเจือเหล็กที่มีต่อความต้านทานของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่สังเคราะห์โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2561 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

DOPING EFFECT OF Fe ON RESISTIVITY OF Y156 SUPERCONDUCTOR SYNTHESIZED BY SOLID STATE REACTION



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements for MASTER OF EDUCATION (Physics) Faculty of Science Srinakharinwirot University 2018

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์ เรื่อง ผลของการเจือเหล็กที่มีต่อความต้านทานของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่สังเคราะห์โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ของ

วรายุทธ บุญโยประการ

้ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ประธาน
จารย์ ดร.โชคชัย พุทธรักษา)
กรรมการ
งารย์ ดร.สิริ สิรินิลกุล)

.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทร หิรัญ)

.....กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม)

ชื่อเรื่อง	ผลของการเจือเหล็กที่มีต่อความต้านทานของตัวนำยวดยิ่ง Y156
	ที่สังเคราะห์โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง
ผู้วิจัย	วรายุทธ บุญโยประการ
ปริญญา	การศึกษามหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริ สิรินิลกุล

้งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเจือเหล็กที่มีต่อความต้านทานของตัวนำยวดยิ่ง Y156 (YBa₅[Cu_{1-x}Fe_x]₆O_{24-v} โดยที่ x = 0, 0.001, 0.003, 0.005 และ 0.010) ที่สังเคราะห์โดยวิธีปฏิกิริยา สถานะของของแข็ง สารตั้งต้นที่ใช้คือ อิตเตรียมออกไซด์ (Y2O3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO3) คอป เปอร์ออกไซด์ (CuO) และไอรอน (III) ออกไซด์ (Fe2O3) การสังเคราะห์โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของ ของแข็งประกอบไปด้วย กระบวนการเผาผง กระบวนการเผาขึ้นรูปโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 ้องศาเซลเซียส และกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส หาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ของตัวอย่างตัวนำยวดยิ่งทั้งหมดด้วยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว (Four-point Probe Method) เพื่อวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งที่ สังเคราะห์ได้ประกอบไปด้วย การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (SEM) การศึกษาองค์ประกอบธาตุด้วยเครื่องเอกซ์เรย์สเปกโตสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) และโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) จากการวิจัยพบว่าการเจือ เหล็กทำให้ตัวนำยวดยิ่งมีอุณหภูมิวิกฤตลดลง โดยตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.001Fe มีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset สูงสุดเท่ากับ 94.5 เคลวิน มีโครงสร้างแบบออโทรอมบิก มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ (a, b, c) เท่ากับ (3.84, 3.89, 23.35) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 94.8 เคลวิน มีโครงสร้างแบบออโทรอมบิก มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ (a, b, c) เท่ากับ (3.82, 3.89, 22.91) พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งมีรูพรุนเพิ่มขึ้นและพบความไม่กระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ขนาดเกรนของตัวนำยวดยิ่งมีค่าประมาณ 3 ถึง 6 ไมโครเมตร

้คำสำคัญ : ตัวนำยวดยิ่งเจือเหล็ก, ตัวนำยวดยิ่ง Y156, วิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง

Title	DOPING EFFECT OF Fe ON RESISTIVITY OF Y156
	SUPERCONDUCTOR
	SYNTHESIZED BY SOLID STATE REACTION
Author	WARAYUT BUNYOPRAKAN
Degree	MASTER OF EDUCATION
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Assistant Professor Siri Sirininlakul , Ph.D.

This research studied the Fe doping effect on the resistivity of Y156 superconductor (YBa₅[Cu_{1-x}Fe_x]₆O_{24-y} where x = 0, 0.001, 0.003, 0.005 and 0.010) that was synthesized by solid state reaction. In the prepared process, Y₂O₃, BaCO₃, CuO, and Fe₂O₃ were used as substrates and pulverized in mortar. The temperature was set at 900 K in the calcination and sintering states, then to the lower temperature to 550 K for an annealing temperature. All samples were tested and measured for resistivity by a four-point probe method to identify the critical temperature. In addition, scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) and X-ray diffraction (XRD) used to analyze some of the physical properties. The experimental results showed the effect of Fe on superconductors had a lower critical temperature as a result of increasing amounts of Fe_2O_3 . The highest T_c onset, was found to be at 94.5 K on Y156 + 0.001Fe. It had an orthorhombic structure with the value of unit cells at (a, b, c) = (3.84, 3.89, 23.35). This sample was similar to Y156 with a T_c onset at 94.8 K and its structure was also orthorhombic with the unit cells valued at (a, b, c) = (3.82, 3.89, 22.91). Moreover, the samples of doped Fe were increasingly porous and the non-dispersion of elements were discovered in the structure. The grain size was between 3 to 6 micrometres.

Keyword : Fe-doped Superconductor, Y156 Superconductor, Solid-state reaction

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริ สิรินิลกุล และ รองศาสตราจาร์ ดร. พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา พร้อมทั้งคอยให้คำแนะนำและความรู้ ตลอดการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธรักษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินพรัหม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมถึงให้ คำแนะนำและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในการแก้ไขที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณธัญนพ นิลกำจร และบุคลากรภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่คอยให้ความ ช่วยเหลือและคอยอำนวยความสะดวกระหว่างการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทางการศึกษาเสมอมา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	۹
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ງ
กิตติกรรมประกาศ	นิ
สารบัญ	ช
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	5
ความสำคัญของการวิจัย	5
ขอบเขตของการวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
1. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O	6
1.1 กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination)	7
1.2 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)	7
1.3 การอบอ่อน (Annealing)	7
2. การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง	8
2.1 การแคลซิเนชัน Y123	
2.2 การซินเตอร์ริงและการอบอ่อน Y123	
3. การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง	
3.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว	11
3.1.1 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง	

3.1.2 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว	17
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน.	22
3.4 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	23
3.4.1 หลักการทำงานของวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	23
3.4.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ	24
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O	26
4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วยเหล็ก	
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	31
1. การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃	
1.1 การคำนวณสารตั้งต้นของตัวนำยวดยิ่ง Y123	
1.2 การคำนวณสารตั้งต้นของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃	
1.3 กระบวนการสังเคราะห์สารตัวอย่างด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	
1.3.1 กระบวนการแคลซิเนชัน	
1.3.2 กระบวนการซินเตอร์ริงและการอบอ่อน	
2. การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวอย่าง	
2.1 ขั้นตอนการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัดแบบ 4 ขั้วแบบเรียง	
2.2 ขั้นตอนการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว	
บทที่ 4 ผลการวิจัย	40
1. อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง	40
1.1 ผลการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง	40
1.2 ผลการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว	43
2. ลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง	50

3. องค์ประกอบธาตุของตัวนำยวดยิ่ง	. 59
4. โครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่ง	. 63
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	.71
สรุปผลการวิจัย	.71
อภิปรายผลการวิจัย	. 73
ข้อเสนอแนะ	.75
บรรณานุกรม	.76
ประวัติผู้เขียน	. 97



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทที่ออนเนสค้นพบ	1
ภาพประกอบ 2 (ก) วงแหวนตัวนำยวดยิ่งเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T>T _c), (ข) วงแหวน ตัวนำยวดยิ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T <t<sub>c)</t<sub>	2
ภาพประกอบ 3 ลำดับเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านตัวนำยวดยิ่ง	3
ภาพประกอบ 4 แบบจำลองสนามแม่เหล็กในขณะที่ห่อหุ้มตัวนำยวดยิ่ง	4
ภาพประกอบ 5 การเตรียมเซรามิก	6
ภาพประกอบ 6 (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่พบในตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่ (ข) อุณหภูมิ วิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่	8
ภาพประกอบ 7 ลักษณะโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกป์ของตัวนำยวดยิ่ง Y123	9
ภาพประกอบ 8 กระบวนการแคลซิเนชันในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y1231	10
ภาพประกอบ 9 กระบวนการซินเตอร์ริงและการอบอ่อนในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 1	11
ภาพประกอบ 10 การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วเชิงเส้น	12
ภาพประกอบ 11 แบบจำลองการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว	13
ภาพประกอบ 12 ค่าปรับ $F_{_2}$ ในชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมและแผ่นสี่เหลี่ยม	15
ภาพประกอบ 13 ค่าปรับ $F_{\scriptscriptstyle 3}$ เมื่อวางเข็มวัดเทียบกับขอบของชิ้นงาน ที่มีสมบัติเป็นตัวนำและไม่เป็	ใน
ตัวนำในลักษณะต่าง ๆ1	16
ภาพประกอบ 14 ลักษณะการจัดเรียงขั้ววัดแบบแวนเดอร์พาว1	17
ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าปรับตามสมมาตรของตัวอย่าง	19
ภาพประกอบ 16 ผิวตัวนำยวดยิ่งที่ถูกส่องด้วย SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า	20
ภาพประกอบ 17 ส่วนประกอบและการทำงานของ SEM2	21
ภาพประกอบ 18 รูปแบบการทำงานของเครื่อง EDX2	22
ภาพประกอบ 19 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก	23

ภาพประกอบ 20 (a) โครงสร้างของสารประกอบ LaOFeAs และ (b) ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRI)
ของตัวนำยวดยิ่งที่ใช้เหล็กเป็นสารประกอบที่เตรียมโดยคณะของโฮโซโนะ	26
ภาพประกอบ 21 สภาพต้านทานไฟฟ้านอร์มอลไลซ์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่	27
ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้านอร์มอลไลซ์ของ Y134	28
ภาพประกอบ 23 กระแสวิกฤตเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับตัวนำยวดยิ่งโดยทดสอบ	31
ภาพประกอบ 24 แผนภาพขั้นตอนดำเนินการวิจัย	31
ภาพประกอบ 26 กระบวนการแคลซิเนชันในการสังเคราะห์สารตัวอย่าง (ก) สำหรับสารตัวอย่าง Y123 และ (ข) สำหรับสารตัวอย่าง Y156 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃	34
ภาพประกอบ 27 กระบวนการซินเตอร์ริงและอบอ่อนในการสังเคราะห์สารตัวอย่าง (ก) สำหรับสา ตัวอย่าง Y123 และ (ข) สำหรับสารตัวอย่าง Y156 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃	ร 36
ภาพประกอบ 28 รูปแบบการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่าง	37
ภาพประกอบ 29 ลักษณะการจัดเรียงขั้ววัดแบบแวนเดอร์พาว	38
ภาพประกอบ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงของตัวนำยวดยิ่ง Y123	40
ภาพประกอบ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงของตัวนำยวดยิ่ง Y156	41
ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ Normalized กับอุณหภูมิด้วย วิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงของตัวนำยวดยิ่ง Y123 เปรียบเทียบกับ Y15	6
	41
ภาพประกอบ 33 ตัวอย่างการลัดวงจรขณะเก็บข้อมูลของตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃	42
ภาพประกอบ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123	43
ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃ เท่ากับ	
0.001	44

ภาพประกอบ 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃ เท่ากับ
0.003
ภาพประกอบ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃ เท่ากับ 0.010
ภาพประกอบ 39 สภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ Normalized กับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃
ภาพประกอบ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156
ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe ₂ O3 เท่ากับ 0.001 47
ภาพประกอบ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃ เท่ากับ 0.003 47
ภาพประกอบ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃ เท่ากับ 0.005 48
ภาพประกอบ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ Normalized กับอุณหภูมิ ด้วย วิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fea Caliniză u 0.000 0.001 0.003 0.005 และ 0.010
า 0203 เท่าเข 0.000 0.001 0.009 0.009 เมษา 0.010 ภาพประกอบ 45 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า
ภาพประกอบ 46 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.001 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า

ภาพประกอบ 47 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.003 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า 52
ภาพประกอบ 48 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.005 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า
ภาพประกอบ 49 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.01 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า
ภาพประกอบ 50 ภาพถ่าย ลักษณะพื้นผิว ของ Y156 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า
ภาพประกอบ 51 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y156 + 0.001 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า
ภาพประกอบ 52 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y156 + 0.003 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า 57
ภาพประกอบ 53 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y156 + 0.005 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า
ภาพประกอบ 54 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe ₂ O ₃ 64
ภาพประกอบ 55 สเปกตรมการเลยวเบนของรงสเอกซของตวนายวดยง Y156 ทเจอดวย Fe ₂ O ₃ 65 ภาพประกอบ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตและปริมาณของเหล็กในตัวนำยวดยิ่ง 68
ภาพประกอบ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเซลล์แกน c และ ปริมาณของเหล็กในตัวนำ ยวดยิ่ง Y123
ภาพประกอบ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเซลล์แกน c และ ปริมาณของเหล็กในตัวนำ ยวดยิ่ง Y156
ภาพประกอบ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเซลล์ c/a และ ปริมาณของเหล็กในตัวนำยวด ยิ่ง Y123
ภาพประกอบ 60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเซลล์ c/a และ ปริมาณของเหล็กในตัวนำยวด ยิ่ง Y156

บทที่ 1 บทนำ

ภูมิหลัง

ตัวนำยวดยิ่งเป็นวัสดุที่ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญในด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เนื่องจากสมบัติที่มีความโดดเด่นหลาย ๆ ประการที่สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแม่เหล็ก นับตั้งแต่ยุคแรก ๆ ของการค้นพบตัวนำยวดยิ่งในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 จนถึงปัจจุบัน ได้มีการค้นพบ ตัวนำยวดยิ่งในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ตัวนำยวดยิ่งแบบโลหะ ตัวนำยวดยิ่งแบบโลหะผสมเซรามิก ซึ่ง ทางด้านฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจทำการวิจัยและศึกษาเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับสภาพนำยวดยิ่งให้ มากขึ้นเพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวนำยวดยิ่งให้ดียิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 1 ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทที่ออนเนสค้นพบ

ที่มา: Vanderah. (1990). Chemistry of Superconductor Materials. p. 5

ความเป็นมาของการค้นพบตัวนำยวดยิ่งเริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ. 1911 คาร์เมอร์ลิงน์ ออนเนส (Kamerling Onnes) นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ประสบความสำเร็จในการทำฮีเลียมเหลวขึ้น ซึ่ง ต่อมาเขาได้ทำการวัดความความต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์ โดยนำปรอทไปใส่ไว้ในภาชนะรูป วงแหวนแล้วแซ่ในฮีเลียมเหลวเมื่ออุณหภูมิของสารลดลง เขาพบว่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของ ปรอทมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิประมาณ 4.2 เคลวิน เรียกอุณหภูมิที่ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ลดลงอย่างทันทีทันใดจนมีค่ากับศูนย์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature, T_c) เป็นอุณหภูมิ ขณะที่ปรอทเหลวเปลี่ยนสถานะจากปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่ง (Vanderah. 1990: 1-5)

ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มที่ออนเนสค้นพบในยุคแรก ๆ นั้นจัดเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำเนื่องจาก ค่าอุณหภูมิวิกฤตจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 เคลวิน ต่อมาไมส์เนอร์ (Meissner. 1933) และโอเซนฟิลด์ (Ochsenfeld) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้ค้นพบว่าตัวนำยวดยิ่งถ้าอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป ตัวนำยวดยิ่งจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านได้ จึงได้เรียกว่า ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ซึ่งทำให้ทราบว่าตัวนำยวดยิ่ง เมื่อเปลี่ยนจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่งจะมีสมบัติแม่เหล็กไดอาที่สมบูรณ์ (Perfect diamagnetism) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 (ก) วงแหวนตัวนำยวดยิ่งเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T>T_c), (ข) วงแหวน ตัวนำยวดยิ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T<T_c)

ที่มา: ฐิติพงศ์ เครือหงส์. (2556). *หนึ่งศตวรรษของตัวนำยวดยิ่ง*. หน้า 529.

จากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งดังที่กล่าวมานั้นส่งผลทำให้นักวิทยาศาสตร์เกิดการนำเสนอ ทฤษฎีและแบบจำลองต่าง ๆ ที่จะอธิบายปรากฏการณ์และกลไกที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งขึ้น ซึ่ง ทฤษฎีหลัก ๆ ที่สำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการอธิบายกลไกของตัวนำยวดยิ่งได้แก่ ทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory) ทฤษฎีกินซ์เบิร์กแลนดาว (Ginburg-Landau Theory) และทฤษฎีลอนดอน (London Theory) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษากลไกที่เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่งในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีใดที่

้สามารถอธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากการอธิบายยังมีความขัดแย้งกันอยู่ ้นั่นคือ ทฤษฎีบีซีเอสมีแนวคิดจากการพิจารณาระดับจุลภาคซึ่งสามารถอธิบายตัวนำยวดยิ่งแบบ ดั้งเดิมที่มีอณหภมวิกถตต่ำได้ แต่ไม่สอดคล้องเมื่อใช้อธิบายผลที่เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่งที่มีอณหภมิสง ้ส่วนทฤษฎีกินซ์-เบิร์กแลนดาวนั้นมีแนวคิดในการอธิบายระดับมหภาคซึ่งจะอธิบายกลไกที่เกิดกับ ้ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงได้ แต่จะอธิบายได้สอดคล้องกับผลการทดลองในช่วงที่ใกล้อุณหภูมิวิกฤต เท่านั้น ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างออกไปจากอุณหภูมิวิกฤตทฤษฎีกินซ์เบิร์กแลนดาวก็จะให้ผลที่ไม่ สอดคล้องกับการทดลอง (ฐิติพงศ์ เครือหงส์, 2556, p. 536) ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงพยายามศึกษา และพัฒนาประสิทธิภาพของตัวนำยวดยิ่งให้มีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้น จนในที่สุดในปี ค.ศ. 1986 ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductors) ถูกค้นพบครั้งแรกโดยเบทนอร์ซ (Bednorz) และมูลเลอร์ (Muller) ที่ห้องปฏิบัติการ IBM เมืองซูริก พวกเขาสามารถเตรียมตัวนำยวด ยิ่ง Ba-La-Cu-O ที่มีอุณหภูมิวิกฤต 35 เคลวินโดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งได้ซึ่งเป็น สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอร์โรฟสไกป์ (Bednorz & Müller, 1986) การค้นพบนี้เป็นผลงาน ที่ทำให้พวกเขาทั้งคู่ได้รับรางวัลโนเบลในปีต่อมาซึ่งเป็นปีเดียวกับคณะวิจัยของชู (Wu et al., 1987) ้ได้ทำการวิจัยโดยใช้สารประกอบของอิตเตรียมที่มีขนาดของอะตอมเล็กมาแทนที่การใช้ธาตุแลน ทานัม ซึ่งสามารถสร้างเป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 92 เคลวินโดยมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของ ในโตรเจนเหลวเป็นครั้งแรก การทดลองด้านตัวนำยวดยิ่งจึงแพร่หลายไปทั่วโลก



ภาพประกอบ 3 ลำดับเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านตัวนำยวดยิ่ง

พัฒนาการด้านการทดลองหลังจากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงนั้นมีความโดดเด่น อย่างมากเมื่อเทียบกับงานทางด้านทฤษฎี การนำผลจากการทดลองมาประยุกต์ใช้งานจริงจะมีความ เกี่ยวข้องกับสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่งเป็นส่วนใหญ่ โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ รถไฟฟ้า Maglev เป็นรถไฟฟ้าที่มีความเร็วสูงถึง 581 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อาศัยแรงยกตัวลอย เหนือรางจากการผลักกันของสนามแม่เหล็กทำให้รางกับตัวรถไม่เกิดแรงเสียดทาน หลักการนี้ได้ แนวคิดและถูกพัฒนามาจากปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (ฐิติพงศ์ เครือหงส์ et al., 2552, p. 94)



ภาพประกอบ 4 แบบจำลองสนามแม่เหล็กในขณะที่ห่อหุ้มตัวนำยวดยิ่ง

ที่มา: Kittel. (1996). Introduction to Solid State Physics 6th: p. 321.

การสร้างภาพด้วยการสั่นพ้องแม่เหล็ก (MRI: Magnetic Resonance Imaging) เป็น อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ได้นำตัวนำยวดยิ่งมาประยุกต์ใช้ทำเป็นขดลวด (Wire) ที่สามารถให้ความเข้ม สนามแม่เหล็กได้ถึง 2 เทสลา (Iwasa, Bascuan, Seungyong Hahn, Tomita, & Weijun Yao, 2010) นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีอื่น ๆ อีกเช่น สายไฟที่เตรียมได้จากตัวนำยวดยิ่งบนเงิน สายไฟฟ้า ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงเพื่ออุตสาหกรรม มอเตอร์ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงที่มีกำลังถึง 1000 แรงม้า เป็นต้น (พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ, 2559, p. 83)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการศึกษาและทำความเข้าใจสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวด ยิ่ง Y-Ba-Cu-O ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงให้พัฒนามีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นจะสามารถ ประยุกต์ใช้เพื่อนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ในชีวิตประจำวันรวมถึงยังเป็นการพัฒนาทั้ง ในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีให้มีความมั่นคงก้าวหน้ายิ่งขึ้นอีกด้วย โดยในปัจจุบันตัวนำยวดยิ่ง ประเภท Y-Ba-Cu-O ได้ถูกวิจัยเพื่อคิดค้นสูตรในการเตรียมเพื่อให้ได้ตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่ที่ได้จากการเตรียมด้วยปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง คือ Y5-6-11 Y7-9-16 Y5-8-13 Y7-11-18 Y156 Y3-8-11 และ Y13-20-33 (พงษ์แก้ว อุดมสมุทร หิรัญ, 2559, p. 59) ตัวยวดยิ่งกลุ่มนี้เป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจและมองเห็น ถึงความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของตัวนำกลุ่มนี้เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตต่อไป

ความมุ่งหมายของการวิจัย

 เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ด้วยวิธีปฏิกิริยา สถานะของของแข็ง

- 2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิวิกฤตโดยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว ได้แก่
 - 2.1 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง
 - 2.2 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว
- 3. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ได้แก่
 - 3.1 ลักษณะพื้นผิว ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - 3.2 องค์ประกอบธาตุ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์สเปกโตสโกปีแบบกระจายพลังงาน
 - 3.3 โครงสร้างของผลึก ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ค วามสำคัญของการวิจ**ั**ย

ทำให้เข้าใจกระบวนการเตรียม และสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ และการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวนำยวดยิ่งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงประยุกต์กับงานด้าน ต่าง ๆ ได้

ขอบเขตของการวิจัย

- 1. สามารถเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้
- 2. ทราบอุณหภูมิวิกฤต ด้วยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว ได้แก่
 - 2.1 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง
 - 2.2 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว
- 3. ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ได้แก่
 - 3.1 ลักษณะพื้นผิว ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - 3.2 องค์ประกอบธาตุ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์สเปกโตสโกปีแบบกระจายพลังงาน
 - 3.3 โครงสร้างของผลึก ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อ ต่อไปนี้

- 1. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O
- การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง
- 3. การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง
- 4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O

ตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O คือตัวนำยวดยิ่งที่มีสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม 3 ชนิด ด้วยกันคือ อิตเตรียมออกไซด์ (Y₂O₃) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ใน ตัวนำยวดยิ่งประเภทนี้ชนิดที่เป็นที่รู้จักกันดีคือตัวนำยวดยิ่งชนิด Y123 ถูกค้นพบในปี 1987 โดย นักวิทยาศาสตร์ชื่อชูและคณะ (Wu et al., 1987) ตัวนำยวดยิ่งชนิดที่ถูกค้นพบนี้จัดได้ว่าเป็นตัวนำ ยวดยิ่งอุณหภูมิสูงโดยมีอุณหภูมิวิกฤตที่ 92 เคลวิน ซึ่งตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O มีคุณสมบัติ เป็นสารเซรามิกดังนั้นการเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภทนี้จะใช้วิธีการเตรียมลักษณะเดียวกับสารเซรา มิกทั่วไปแต่ในบางขั้นตอนอาจแตกต่างไปบ้างเพื่อให้เกิดสมบัติความเป็นตัวนำยวดยิ่งเกิดขึ้น



ภาพประกอบ 5 การเตรียมเซรามิก

ที่มา: พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ. (2559). ตัวนำยวดยิ่งพื้นฐาน. หน้า 142.

สารเซรามิกโดยทั่วไปจะมีกระบวนการในการเตรียมคือ การเลือกสารตั้งต้นที่สอดคล้องกับ วัตถุประสงค์หรือความต้องการในการนำไปใช้ การทำให้สารนั้นเกิดโครงสร้างตามที่ต้องการ และการ ทำให้สารนั้นมีโครงสร้างความแข็งแรงและแกร่งขึ้น จากหลักการดังกล่าวเมื่อนำประยุกต์ในการ เตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O จะมีกระบวนการให้ความร้อน 3 กระบวนการที่สำคัญได้แก่ (พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ, 2559, pp. 141-148)

1.1 กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination)

เป็นขั้นตอนการให้ความร้อนในบรรยากาศปกติเพื่อทำให้สารตั้งต้นที่เตรียมเกิดการ เปลี่ยนเฟสมีการยึดเกาะกันของโครงสร้างและเป็นการไล่องค์ประกอบของสารที่ไม่ต้องการออกไป เช่น การทำให้น้ำระเหยออกไป การทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกจากโครงสร้าง ในการเตรียม ตัวนำยิ่งยวดประเภท Y-Ba-Cu-O ความร้อนที่เหมาะสมในกระบวนการนี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 800 ถึง 1100 องศาเซลเซียส

1.2 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

เป็นขั้นตอนการเผาขึ้นรูป โดยนำสารที่ผ่านกระบวนการแคลซิเนชันมาบดอัดเพื่อขึ้นรูป ตามแบบพิมพ์ที่เราต้องการ หลังจากที่สารผ่านกระบวนการซินเตอร์ริง โครงสารของสารจะมีความ แข็งแรงมากขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O อยู่ ระหว่าง 800 ถึง 1100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในกระบวนการประมาณ 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป

1.3 การอบอ่อน (Annealing)

เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเตรียมสารให้เกิดสมบัติความเป็นตัวนำยวดยิ่งโดยใน กระบวนการซินเตอร์ริงจะมีการดูดและคายออกซิเจนเกิดขึ้นกับโครงสร้างสารโดยอุณหภูมิที่เหมาะสม ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่งสำหรับกระบวนการนี้อยู่ระหว่าง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาพบว่าตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O นอกเหนือจากตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่ ชูเป็นผู้ค้นพบแล้วยังมีตัวนำยวดยิ่งประเภทนี้ในสูตรอื่น ๆ ที่ถูกศึกษาและพัฒนาคุณภาพให้ดียิ่งขึ้น





ภาพประกอบ 6 (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่พบในตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่ (ข) อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่

ที่มา: Udomsamuthirun, P.; et al. (2010). The New Superconductors of YBaCuO Materials. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.

จากภาพประกอบ 6 อุดมสมุทรหิรัญและคณะ (Udomsamuthirun et al., 2010) ได้ นำเสนอตัวนำยวดยิ่งสูตรใหม่ที่ค้นพบขึ้นจากการเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งคือ Y5-6-11 Y7-9-16 Y358 Y5-8-13 Y7-11-18 Y156 Y3-8-11 และ Y13-20-23 ซึ่งตัวเลขในลำดับที่ 1 2 และ 3 คืออัตราส่วนของอิตเตรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ พบว่าตัวนำยวดยิ่งสูตรดังกล่าวเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงและมีโครงสร้างผลึกคล้ายคลึง กับตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y358

2. การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง

ตัวนำยวดยิ่ง Y123 หรือ YBa₂Cu₃O_{7-x} เป็นตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงจึงถูกจัดอยู่ใน กลุ่มตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง โครงสร้างของสารประกอบในกลุ่มนี้จะมีลักษณะของคอปเปอร์ออกไซด์ วางเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ระหว่างชั้นจะมีอะตอมของโลหะอื่นคั่นอยู่ซึ่งจะทำหน้าเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้น การไหลของไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์ ลักษณะของโครงสร้างแบบนี้เรียกว่า เพอร์รอฟสไกป์ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ลักษณะโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกป์ของตัวนำยวดยิ่ง Y123

ที่มา: Ajay Kumar Saxena. (2009). High-Temperature Superconductors. p. 42.

การคำนวณอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 นั้นสามารถทราบ ได้จากการคำนวณหาปริมารสารที่ใช้จากปฏิกิริยาเคมีเป็นไปตาสมการทางเคมีดังนี้

 $0.5Y_2O_3 + 2BaCO_3 + 3CuO \rightarrow YBa_2Cu_3O_{6.5} + 2CO_2$

จากสมการทางเคมี ในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 เมื่อคำนวณโดยอาศัยหลักการใน เรื่องปริมาณสารสัมพันธ์จะได้อัตราส่วนมวลของสารตั้งต้นที่เป็นไปตามปฏิกิริยาทางเคมีคือ

อิตเทรียมออกไซด์ (Y₂O₃) : 0.5 × 225.88 = 112.94 กรัม
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) : 2 × 197.388 = 394.676 กรัม
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) : 3 × 79.5454 = 238.64 กรัม

ทั้งนี้การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ในการปฏิบัติจริง อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารที่ใช้จะขึ้นอยู่ กับจุดมุ่งหมายของการศึกษา (พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ, 2559, pp. 149-150) สมพร ศรีอาภานนท์ (2555, pp. 109-111) ได้วิจัยเพื่อศึกษาการเตรียมและสมบัติพื้นฐาน ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งซึ่งมีกระบวนการดังนี้

2.1 การแคลซิเนชัน Y123

กระบวนการนี้จะทำการเผาผงสารตั้งต้นเพื่อเกิดการยึดเกาะกันของโครงสร้างโดยใช้ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส และตั้งค่าอุณภูมิสูงสุดของเตาเผาไว้ที่ 950 องศาเซลเซียสโดย ให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นในอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นจะใช้เวลา 24 ชั่วโมง ในการเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสและลดอุณหภูมิลงจนเหลือ 100 องศาเซลเซียสในอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีดังแสดงในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 กระบวนการแคลซิเนชันในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123

2.2 การซินเตอร์ริงและการอบอ่อน Y123

นำสารที่ผ่นกระบวนการแคลซิเนชันหรือการเผาผงมาอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ หลังจากนั้น นำให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งโดยที่การให้ความร้อนในกระบวนการนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ การซิน เตอร์ริง โดยจะเริ่มเผาสารที่อัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสแล้วเพิ่มอุณภูมิในอัตรา 20 องศา เซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ให้คงไว้ที่อุณหภูมินี้ 24 ชั่วโมงจากนั้นจึงค่อยลด อุณหภูมิลงมาด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 500 องศาเซลเซียส การลดอุณหภูมิลงมานี้ จะเรียกว่า การอบอ่อน โดยจะใช้เวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง จากนั้นจะลดอุณหภูมิลงอีกครั้งด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 100 องศาเซลเซียสตามภาพประกอบ 9 เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ เตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123



ภาพประกอบ 9 กระบวนการซินเตอร์ริงและการอบอ่อนในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123

ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่ได้จากการสังเคราะห์มีขนาดของเกรนที่มีขนาดเล็ก มีสัดส่วนของ ธาตุไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำไปวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีเข็มวัดแบบ 4 ขั้ว พบว่ามีค่าอุณหภูมิวิกฤตเฉลี่ย เท่ากับ 90 เคลวิน และจากการศึกษาโครงสร้างของสารด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นำผลการ ทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟเพื่อหารูปแบบโครงสร้าง กลุ่มปริภูมิ ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ และตำแหน่งอะตอมพบว่ามีรูปแบบโครงสร้างแบบออโทรอมบิก (Orthorhombic)

3. การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง

ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งและสมบัติหลาย ๆ ประการ โดยเฉพาะ เมื่อมีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหมิสูงนั้นล้วนมีความน่าสนใจและยังคงมีการศึกษาเพื่อพัฒนา ประสิทธิภาพและสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นตัวนำยวดยิ่งอยู่เสมอ ๆ โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ ทำการศึกษาศึกษาสมบัติบางประการที่เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์ได้ซึ่งประกอบไปด้วย วิธีการต่าง ๆ ดังนี้

3.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว

มิคโคไลและและคณะ (Miccoli, Edler, Pfnür, & Tegenkamp, 2015, p. 1) ได้ กล่าวถึงความสำคัญของความต้านทานไฟฟ้าและวิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าไว้ในการวิจัยว่า ความ ต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างมากของวัสดุเมื่อต้องการนำวัสดุเหล่านั้นมาใช้งานทาง อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งวัสดุจะถูกจัดประเภทเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำหรือฉนวนนั้นมีความต้านทานไฟฟ้า ของวัสดุในช่วง 10⁻⁸ ถึง 10¹⁶ Ωcm ซึ่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจัดประเภทได้ ดังนั้นวิธีการวัดค่า ความต้านทานให้ออกมาได้ค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงกับค่าจริงของวัสดุจำเป็นต้องใช้เทคนิคหรือวิธีการที่มี ความแม่นยำร่วมด้วย เจริญชัย เหลืองอ่อน (2554, p. 74) ได้นำเสนอวิธีการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็ม วัด 4 ขั้ว (Four-point Probe) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการวัดค่าความต้านไฟฟ้าที่สามารถตัด ผลกระทบจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุขณะวัดได้คือ ความต้านทานของ สายไฟที่ใช้วัดและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างจุด ทำให้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีนี้ สามารถคำนวณค่ามาได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ลดาวดี มะรุมดี and วิมลวรรณ โพธิ์น่วม (2557, pp. 12-14) ได้วิจัยเพื่อศึกษาการ สร้างระบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งกล่าวว่า วิธีการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วเป็นวิธีที่ ได้รับความนิยมในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นวิธีที่สามารถทำการวัดได้ง่ายและสามารถวัดความ ต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุได้ทุกประเภทไม่ว่าจะมีขนาดหรือรูปร่างอย่างไร



ภาพประกอบ 10 การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วเชิงเส้น

ที่มา: ลดาวดี มะรุมดี; และวิมลวรรณ โพธิ์น่วม. (2557). *การออกแบบและสร้างระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ เพื่อใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้า...* หน้า 12. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์.

การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว เป็นวิธีที่มีความแม่นยำในการวัดมากซึ่ง เป็นวิธีมาตรฐานที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เพื่อวัดความทานไฟฟ้าในวัสดุหลาย ๆ ประเภท แต่ วิธีการวัดในลักษณะนี้ควรพิจารณาถึงข้อจำกัดที่อาจเกิดขึ้นขณะวัดคือ

 เข็มวัดที่ใช้ทำเป็นขั้วทั้ง 4 ควรมีลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสาร หรือวัสดุตัวอย่างเท่ากัน เข็มวัดต้องเป็นโลหะมีความต้านทานทางไฟฟ้าน้อย สารหรือวัสดุตัวอย่างตรงบริเวณที่ขั้วทั้ง 4 สัมผัสอยู่พื้นผิวจะต้องมีความ สม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณ ไม่เกิดรูกลวงด้านในซึ่งจะคิดว่าการกระจายของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะครึ่ง ทรงกลม (Hemisphere) เป็นไปตามหลักไฟฟ้าสถิต

3.1.1 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง

การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อพิจารณาในกรณีที่วัสดุที่ต้องการ ทราบค่าความต้านทานไฟฟ้ามีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมพื้นที่หน้าตัด A และขนาดความยาวเท่ากับ l สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.1}$$

โดย

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม

ρ คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของวัสดุแต่ละประเภทมีหน่วย
 เป็นโอห์ม-เซนติเมตร

จากสมการที่ (2.1) เมื่อเขียนอยู่ในรูปของค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุจะได้ คือ

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

(2.2)

ภาพประกอบ 11 แบบจำลองการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว

ที่มา: เจริญชัย เหลืองอ่อน. (2554). *การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด*. หน้า 75.

การวัดความต้านทานลักษณะนี้ที่ปลายสองด้านของแท่งวัสดุต้องมีรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contact) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลตั้งฉากกับพื้นหน้าตัดของวัสดุตลอดเวลาซึ่งใน กรณีนี้เมื่อวัสดุเป็นแท่งสี่เหลี่ยมการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกจึงทำได้ยาก ดังนั้นการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เข็มวัดมาทดแทนการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม จากภาพประกอบ 11 แสดงการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้ว A ไปยังขั้ว D ซึ่งทำให้เกิดความดันตกคร่อม จากนั้นทำการวัดกระแสและความดันไฟฟ้าที่ขั้ว B และ C เมื่อพิจารณาโดยให้พื้นผิวของวัสดุเป็นแบบ Semi-infinite Boundaryจะสามารถคำนวณค่าสภาพ ต้านทานไฟฟ้าได้ตามสมการ

$$\rho = 2\pi s \frac{v}{l} \tag{2.3}$$

จากสมการที่ (2.3) เมื่อพิจารณาในการปฏิบัติจริง จำเป็นต้องมีการปรับค่าโดยใช้ Correction Factor เนื่องจากวัสดุหรือสารตัวอย่างที่นำมาวัดอาจไม่เป็นไปตามเงื่อนไขลักษณะแบบ ขอบเขตไม่จำกัด ดังนั้นจะปรับแก้ไขสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho = 2\pi sF \frac{V}{I} \tag{2.4}$$

โดยที่ F คือ Correction Factor ซึ่งแสดงได้ตามสมการ

....

$$F = F_1 F_3 \left[\frac{\ln(2)F_2}{\pi} \right]$$
(2.5)

- โดย F₁ เป็นค่าปรับสำรับความหนาของชิ้นงาน
 - F_2 เป็นค่าปรับขนาดตามแนวระนาบ
 - $F_{\rm 3}$ เป็นค่าปรับตามแนวการวางหัวโพรบเทียบกับขอบของชิ้นงาน

ค่า *F* นี้จะถูกปรับไปตามลักษณะของการวางตำแหน่งโพรบและรูปร่างของวัสดุที่ต้องการ วัดโดยที่กำหนดค่า *F*₁ สามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น

1) ค่าปรับ F_1 กรณีที่ผิวใต้ชิ้นงานไม่นำไฟฟ้า (Non-conducting surface)

$$F_{1} = F_{11} = \frac{t/s}{2\ln[\sinh(t/s)/\sinh(t/2s)]}$$
(2.6)

2) ค่าปรับ F_1 กรณีที่ผิวใต้ชิ้นงาน<u>นำไฟฟ้า</u> (Conducting surface)

$$F_1 = F_{12} = \frac{t/s}{2\ln\left[\cosh\left(t/s\right)/\cosh\left(t/2s\right)\right]}$$
(2.7)

เมื่อ t คือความหนาของชิ้นงาน

การกำหนดค่าปรับ F₂ แบ่งการพิจาณาเป็น 2 กรณีตามภาพประกอบ 12 คือ กรณีที่วัสดุที่ นำมาวัดมีรูปร่างเป็นวงกลมและรูปร่างสี่เหลี่ยม ในกรณีที่วัสดุมีรูปร่างเป็นวงกลมจะพิจารณาขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ d เทียบกับระยะห่างระหว่างเข็มวัด s ถ้าอัตราส่วนที่เทียบมีค่ามากกว่า 20 ขึ้นไป ค่าปรับ F₂ จำกัดที่ค่าประมาณสูงสุดคือ 4.532



ภาพประกอบ 12 ค่าปรับ F₂ ในชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมและแผ่นสี่เหลี่ยม

ที่มา: เจริญชัย เหลืองอ่อน. (2554). *การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด*. หน้า 76. (อ้างอิง จาก S.M. Sze. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*.) ในกรณีที่วัสดุที่นำมาวัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีความยาว a ละความกว้าง d การเทียบ อัตราส่วนจะเทียบระหว่างความกว้างของวัสดุกับระยะห่างระหว่างเข็มวัด (d/s) ถ้าหากอัตราส่วนที่ เทียบมีค่ามาก ๆ ค่าปรับ F_2 จะถูกประมาณให้มีค่าสูงสุดเช่นเดียวกับกรณีวัสดุเมีรูปร่างเป็นวงกลม ซึ่งจากภาพประกอบ 12 ค่าปรับ F_2 ของวัสดุรูปร่างสี่เหลี่ยมจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ อัตราส่วน a/dเท่ากับ 1 และ a/d มากกว่าหรือเท่ากับ 3

ส่วนการกำหนดค่าปรับ F_3 นั้นจะพิจารณาจากการเทียบอัตราส่วนของระยะจากขอบของ วัสดุที่นำมาวัดกับระยะห่างระหว่างเข็มวัด โดยแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ

1) ขอบเขตของชิ้นงานที่ไม่นำไฟฟ้า (Non-conducting Boundary)

2) ขอบเขตของชิ้นงานที่นำไฟฟ้า (Conducting Boundary)



ภาพประกอบ 13 ค่าปรับ F₃ เมื่อวางเข็มวัดเทียบกับขอบของชิ้นงาน ที่มีสมบัติเป็นตัวนำและไม่เป็นตัวนำในลักษณะต่าง ๆ

ที่มา: เจริญชัย เหลืองอ่อน. (2554). *การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด*. หน้า 77. (อ้างอิง จาก นุจรินทร์ รามัญกุล. (2546). *การปลูกผลึกซิลิกอนหลายชั้นโดยวิธีอีพิแทคซี่...*) ซึ่งในแต่ละกรณีจะแบ่งพิจารณาแยกย่อยตามลักษณะการวางแนวของเข็มวัดเทียบกับแนว ขอบของชิ้นงานดังที่แสดงในภาพประกอบ 13 โดยที่ F_{31} และ F_{33} เป็นค่าปรับเมื่อแนวของเข็มวัด ตั้งฉากกับขอบของชิ้นงาน ส่วน F_{32} และ F_{34} เป็นค่าปรับเมื่อวางแนวเข็มวัดขนานกับขอบของ ชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าปรับ F_3 ตามกราฟในภาพประกอบ 13 จะพบว่า ถ้าอัตราส่วน d/s มีค่ามากกว่า 3 ขึ้นไป ค่าปรับ F_3 จะถูกประมาณให้จำกัดอยู่ที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 1

3.1.2 การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว

การวัดความต้านทานด้วยวิธีนี้เหมาะกับวัสดุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดเล็ก และความหนาของตัวอย่างสม่ำเสมอ ตำแหน่งการวางเข็มวัดหรือขั้วของวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นรูป สี่เหลี่ยมตามขนาดของตัวอย่างซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าความต้านทานที่ถูกต้องของตัวอย่างได้จาก การวัดโดยรอบตัวอย่างดังแสดงตามภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 ลักษณะการจัดเรียงขั้ววัดแบบแวนเดอร์พาว

ที่มา: Keithly Instruments, Inc. (2011). Four-Probe Resistivity and Hall Voltage Measurements with the Model 4200-SCS. p. 3.

การคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการวัดด้วยวิธีนี้จะ สามารถหาได้จากการคำนวณค่าสภาพต้านทาน ho_A และ ho_B ที่เกิดจากลักษณะของการวางเข็มวัด และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไปกับตัวอย่าง

$$\rho_{avg} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \tag{2.8}$$

ซึ่งค่าสภาพต้านทาน $ho_{\scriptscriptstyle A}$ และ $ho_{\scriptscriptstyle B}$ จะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A t_s \frac{(V_1 - V_2 + V_3 - V_4)}{4I}$$
(2.9)

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B t_s \frac{(V_5 - V_6 + V_7 - V_8)}{4I}$$
(2.10)

โดย $ho_{\scriptscriptstyle A}$ และ $ho_{\scriptscriptstyle B}$ คือสภาพต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร

t คือความหนาของตัวอย่างมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

 V_1 ถึง V_8 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้หน่วยเป็นโอห์ม

I คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวอย่างมีหน่วยเป็นแอมแปร์

ส่วนค่า $f_{\scriptscriptstyle A}$ และ $f_{\scriptscriptstyle B}$ คือค่าปรับที่ขึ้นอยู่กับสมมาตรของตัวอย่าง โดยการหา ค่าปรับ f จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ Qเป็นไปตามฟังก์ชัน

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \left(\frac{f}{0.693}\right) \cosh^{-1}\left[\frac{e^{0.693/f}}{2}\right]$$
(2.11)

เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ซึ่งจะแสดงได้ให้เห็นว่าค่าปรับ f มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเป็น สมมาตรสมบูรณ์



ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าปรับตามสมมาตรของตัวอย่าง

ที่มา: Keithly Instruments, Inc. (2011). Four-Probe Resistivity and Hall Voltage Measurements with the Model 4200-SCS. p. 3.

โดยในการวัดความต้านทานของตัวอย่างการคำนวณหาค่าปรับ f_A และ f_B จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ Q_A และ Q_B เป็นไปตามสมการ

$$Q_A = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_3 - V_4)} \tag{2.12}$$

$$Q_B = \frac{(V_5 - V_6)}{(V_7 - V_8)} \tag{2.13}$$

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเครื่องที่ใช้เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของของตัวอย่างทางกายภาพ ซึ่งถูกใช้เพื่อศึกษาใน หลากหลายด้าน เช่น งานทางวิศวกรรมศาสตร์ งานด้านฟิสิกส์เชิงวัสดุ งานอุตสาหกรรมเคมี หรือ งานวิจัยเชิงชีวภาพ เนื่องจากทำให้การศึกษานั้นมีคุณภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นเพราะการ ตรวจสอบพื้นผิวด้วย SEM มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทั่ว ๆ ไป (บวรกิตติ์ พันธ์ เสถียร, 2557) โดยทั่วไปแล้ว SEM จะมีกำลังขยายอยู่ที่ 3000 ถึง100,000 เท่า สามารถส่องดู รายละเอียดได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตรโดยการเตรียมตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องมี ขนาดบางและภาพที่ได้ออกมาโครงสร้างจะเป็นลักษณะแบบ 2 มิติ



ภาพประกอบ 16 ผิวตัวนำยวดยิ่งที่ถูกส่องด้วย SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า

ที่มา: ฐิติพงศ์ เครือหงส์; และคณะ. (2550). การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของ ตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O: หน้า 25.

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทำงานจะเริ่มจากส่วนบนสุดซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนเรียกว่า ปืน อิเล็กตรอน (electron gun) โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านลำสุญญากาศลงมาด้วยความต่างศักย์เร่ง ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุด ดัง ภาพประกอบ 17 เลนส์ชุดแรกเรียกว่าคอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) เป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบ อิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง เลนส์อีกชุดคือเลนส์วัตถุ (Objective Lens) เป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้ไปตก บนผิวของตัวอย่างซึ่งมี สแกนคอยล์ (Scan Coil) กวาดลำอิเล็กตรอนไปตกบริเวณอุปกรณ์จับ สัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เพื่อนำไปประมวลผลแสดงเป็นภาพต่อไป (ดนัย กิจชัยนุกูล, 2547)



ภาพประกอบ 17 ส่วนประกอบและการทำงานของ SEM

ที่มา: ดนัย กิจชัยนุกูล. (2547). เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. (ออนไลน์).

ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

 อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูล ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างและเป็นสัญญาณที่นำมาใช้ในการสร้างมากที่สุด ภาพที่ได้จะถูกเรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI)

 อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) สัญญาณนี้จะให้ ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนพื้นผิวตัวอย่างและยังแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของ พื้นผิวตัวอย่างด้วย

สัญญาณที่เกิดขึ้นบริเวณ detector ยังมีอีกหลายชนิดเช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า X-ray โอเจอิเล็กตรอน (Auger Electron) สัญญาณแต่ละชนิดที่กล่าวมาก็จะให้ข้อมูลของสารที่นำมา วิเคราะห์แตกต่างกันไปอีกด้วย
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่าง โดยทั่วไป นิยมติดตั้งบนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

เรย์มอน (Raymond, 1951) ได้พบว่า ค่าประมาณความเข้มข้นพีคของรังสีเอกซ์ ลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานตัวอย่างจะเป็นอัตราส่วนแบบคร่าว ๆ มวลอะตอม เมื่อวัด อัตราส่วนของความเข้มพีคระหว่างชิ้นงานกับสารมาตรฐาน จะได้อัตราส่วนโดยมวลของธาตุที่เกิดขึ้น ในตัวอย่าง

นิวเบอร์รี (Newbury, 1999, pp. 585-597) กล่าวว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ ติดตั้งตัววัด EDX จะทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์และโปรแกรมการวิเคราะห์ธาตุซึ่งจะสามารถ วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยที่โปรแกรมการวิเคราะห์ธาตุนั้นมีความก้าวหน้าซึ่ง สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยไม่มีการใช้สารมาตรฐานได้



ภาพประกอบ 18 รูปแบบการทำงานของเครื่อง EDX

ที่มา: Joseph Goldstein; et al. (1981). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Micro analysis.

หลักการทำงานของเครื่อง EDX นี้จะให้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-Ray Beam) ไป ยังบริเวณสารตัวอย่างซึ่งรังสีจะทะลุเข้าไปชนอิเล็กตรอนวงในชั้น K ให้หลุดออกมา ทำให้อิเล็กตรอน วงนอกชั้น L และ M ที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่าไปแทนที่ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะทำให้สารตัวอย่าง ปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-Ray Beam) ซึ่งมีสมบัติเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดที่ทำให้ สามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้

3.4 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การทดสอบนี้สามารถทำได้โดยที่เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ซึ่ง พรนิภา ขาวสมบูรณ์ (2558, p. 6) กล่าวว่า XRD เครื่องมือที่ใช้ วิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างโดยไม่ให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหาย เครื่องมือนี้อาศัยหลักการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ไปตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน โดยสามารถวิเคราะห์ โครงสร้างผลึก (Crystalline Structure) ของสารที่มีอยู่ในวัสดุตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบผง (Powder) และรูปแบบฟิล์มบาง (Thin Film)

เกียรติพงษ์ ได้การ (2555, p. ออนไลน์) กล่าวว่าผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาด ของ Unit Cell ไม่เท่ากันทำให้ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ออกมาไม่เหมือนกัน ทำให้สามารถ หารูปแบบความสัมพันธ์ของรังสีเอกซ์กับสารที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการของ Bragg's Law ในการ คำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง



ภาพประกอบ 19 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก

ที่มา: เกียรติพงษ์ ได้การ. (2555). X-ray diffractometer XRD. (ออนไลน์).

3.4.1 หลักการทำงานของวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

หลักการทำงานของเครื่อง XRD ประกอบด้วย หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่อยู่ภายใต้ สภาวะสุญญากาศ โดยที่รังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้เส้นลวดภายในร้อนขึ้น และเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง เคลื่อนที่ด้วยความเร็วจากขั้วแคโทดเข้าชนขั้วแอโนด อิเล็กตรอนที่เข้าชนจะทำใหอิเล็กตรอนวงในสุด K-shell หลุดซึ่งทำให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดไป L และ M-shell เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลง มาแทนที่ช่องว่างนั้น ส่งผลให้เกิดรังสีเอกซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่างและทำ การวิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ (Detector) (พรนิภา ขาวสมบูรณ์, 2558) ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการของแบรกก์ (Bragg's equation)

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{2.14}$$

เมื่อ *d* คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

- heta คือ มุมที่ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบ
- *n* คือ อันดับของการสะท้อน
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

3.4.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ

โปรแกรมฟูลพรอฟ (Fullprof) เป็นโปรแกรมสำหรับใช้เปรียบเทียบผลของการ วิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์กับแบบจำลองโครงสร้างที่กำหนดขึ้น ซึ่งมีความสำคัญในการหาหาค่าคงตัวของหน่วยเซลล์และตำแหน่งอะตอม หลักการทำงานของ โปรแกรมประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ปริมาณ 2 ปริมาณ โดยต้องทำให้เส้นกราฟที่เกิดขึ้นจากการ คำนวณซ้อนทับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีพารามิเตอร์ในการคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลอง ดังนี้ (Rodriguez-Carjaval, 2013, pp. 43-45)

1) ข้อมูลแสดงลักษณะเฉพาะ (Profile Factor)

$$R_{p} = \frac{\sum_{i} |y_{oi} - y_{ci}|}{\sum_{i} y_{oi}}$$
(2.15)

2) แฟกเตอร์ของข้อมูลโดยน้ำหนัก (Profile Factor)

$$\mathbf{R}_{wp} = 100 \left[\frac{\sum_{i} w_{i} |y_{oi} - y_{ci}|^{2}}{\sum_{i} w_{i} y_{oi}} \right]^{1/2}$$
(2.16)

3) แฟกเตอร์ค่าคาดหมาย (Expected Factor)

$$\mathbf{R}_{exp} = 100 \left[\frac{n-p}{\sum_{i} w_{i} y_{oi}} \right]^{1/2}$$
(2.17)

4) ค่าความถูกต้อง (Goodness)

$$\chi^{2} = \left[\frac{\mathbf{R}_{wp}}{\mathbf{R}_{exp}}\right]^{2}$$
(2.18)

เมื่อ R "

- ${f R}_p$ คือ ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการกำลังสองน้อยสุด (Least-square)
- R "" คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของความสูงพืคที่อยู่เหนือสัญญาณพื้นหลัง

R_{exp} คือ ค่าประมาณที่ดีที่สุดสำหรับชุดข้อมูล

n คือ จำนวนของข้อมูลทั้งหมด

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ปรับแต่ง

 χ^2 คือ ค่าความถูกต้อง

y_{oi} คือ รูปแบบของกราฟจากการทดลอง

- y_{ci} คือ รูปแบบของกราฟจากการจำลองโครงสร้างจากการทดลอง
- พ_i คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้เหล็กเป็นสารประกอบถูกค้นพบขึ้นในปี ค.ศ. 2006 โดย คณะวิจัยของโฮโซโนะ (Kamihara et al., 2006) จากเดิมที่เหล็กเป็นสารที่ไม่ได้รับความนิยมในการ นำมาเตรียมตัวนำยวดยิ่งเนื่องจากการสมบัติที่ง่ายต่อการเกิดออกไซด์ซึ่งส่งผลต่อสภาพการนำยวดยิ่ง แต่คณะวิจัยของโฮโซโนะได้ทำการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง LaOFeP และ La[O_{1-x}F_x]FeAs ได้สำเร็จ โดยมี อุณหภูมิวิกฤตประมาณ 4 เคลวินและ 26 เคลวินตามลำดับ (Kamihara, Watanabe, Hirano, & Hosono, 2008) ซึ่งในปี ค.ศ. 2008 พบว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้มีโครงสร้างต่างจากตัวนำยวดยิ่ง อุณหภูมิสูงกลุ่มอื่น หลังจากการค้นพบนี้ได้ถูกเผยแพร่ออกไปทำให้เกิดแนวคิดในการเตรียมตัวนำ ยวดยิ่งประเภทใหม่ โดยนำเหล็กและโลหะอื่น ๆ มาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อพัฒนาการเตรียมตัวนำยวด ยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ โดยนักวิจัยพบว่าการแทนที่ธาตุอื่น ๆ ในตัวนำยวดยิ่งนี้สามารถทำให้ อุณภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นได้ซึ่งเหล็กก็ถูกจัดเป็นหนึ่งในกลุ่มธาตุที่น่าจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวนำยวดยิ่ง นั้นดีขึ้นได้



ภาพประกอบ 20 (a) โครงสร้างของสารประกอบ LaOFeAs และ (b) ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ของตัวนำยวดยิ่งที่ใช้เหล็กเป็นสารประกอบที่เตรียมโดยคณะของโฮโซโนะ

ที่มา: Kamihara; et al. (2008). Iron-Based Layered Superconductor La[O_{1-x} F_x]FeAs with T_c = 26 K. J. AM. Chem. Soc: p. 130.

จากประเด็นดังกล่าวที่สามารถนำเหล็กมาใช้ในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งได้ประกอบกับมี งานวิจัยที่มีการค้นพบการเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O กลุ่มใหม่ที่จัดอยู่ในกลุ่มของตัวนำ ยวดยิ่งอุณหภูมิสูง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O และตัวนำ ยวดยิ่งที่ถูกเจือด้วยอะตอมของเหล็กเพื่อนำมาอ้างอิงประกอบกับการทำวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O

อุดมสมุทรหิรัญและคณะ (Udomsamuthirun et al., 2010) ได้ศึกษาการ เปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O ที่มีการค้นพบแล้วซึ่งประกอบไป ด้วย Y123 Y124 Y247 และ Y358 พบว่าสมบัติและโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง Y358 นั้นสอดคล้อง กับตัวนำยวดยิ่ง Y123 โดยค่าหน่วยเซลล์แกน *c* ของ Y358 มีความยาวกว่าของ Y123 ประมาณ 3 เท่า และมีใน 1 หน่วยเซลล์ของ Y358 มีระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์อยู่ 5 ระนาบ และพันธะของ Cu-O อยู่ 3 พันธะ



ภาพประกอบ 21 สภาพต้านทานไฟฟ้านอร์มอลไลซ์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่

ที่มา: Udomsamuthirun; et al. (2010). *The New Superconductors of YBaCuO Materials*. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.

จากงานวิจัยนี้พบว่าผลรวมจำนวนอะตอมของ Y และ Ba เท่ากับจำนวนอะตอมของ Cu ทำให้มีความ เป็นไปได้ของสมมติฐานว่า การเพิ่มจำนวนระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิวิกฤต โดยจากเหตุผลดังกล่าวอุดมสมุทรหิรัญและคณะ จึงได้นำข้อมูลที่ค้นพบจากการศึกษา มาตั้งสมมติฐานในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O กลุ่มใหม่คือจำนวนพันธะของ Cu-O มีความสัมพันธ์กับอะตอมของอิตเตรียม จำนวนระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์มีความสัมพันธ์ กับจำนวนอะตอมของแบเรียมและจำนวนอะตอมของอิตเตรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมจะ มีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ ซึ่งตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่นี้เมื่อนำมาวัดค่าสภาพความ ต้านทานไฟฟ้าและวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิวิกฤตตามภาพประกอบ 21 พบว่ามีค่าใกล้เคียง กับตัวนำยวดยิ่ง Y123

ฐิติพงศ์ เครือหงส์ (2554, pp. 38-58) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่ง ประเภท Y-Ba-Cu-O กลุ่มใหม่ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งประกอบไปด้วย Y156 Y3-8-11 Y5-8-13 Y7-11-18 และ Y13-20-33 โดยที่ตัวเลขในสูตรแสดงถึงจำนวนอะตอมของอิต เตรียม แบเรียม และคอปเปอร์ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าตัวนำยวดยิ่งสูตร Y156 มีความ ต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด และ Y358 Y3-8-11 และ Y5-8-13 นั้นมีค่าอุณภูมิวิกฤตประมาณ 94 เคลวิน สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จากการวิจัยมีลักษณะโครงสร้างแบบออโทรอมบิก ค่าคงตัวใน หน่วยเซลล์ a และ b มีค่าใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 ส่วนค่าคงตัวในหน่วยเซลล์ c จะมีค่า เพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมของคอปเปอร์ในสารตัวอย่าง

ปิยะมาศ ไชยนอก (2557, pp. 80-85) ได้สังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O ที่เจือด้วยฟลูออรีน ประกอบด้วย YBa₂Cu₃O_y YBa₃Cu₄O_y YBa₂Cu₃O_{y-x}F_x และ YBa₃Cu₄O_{y-x}F_x โดยเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งพบว่า การเจือฟลูออรีนเข้าไปในสารตั้งต้นไม่มีผลต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิวิกฤตของ YBa₂Cu₃O_{y-x}F_x แต่มีผลต่ออุณหภูมิวิกฤตของ YBa₃Cu₄O_{y-x}F_x ซึ่ง ปริมาณของฟลูออรีนที่เจือมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มสูงขึ้นแต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ ไม่ได้ถูกเจือด้วยฟลูออรีนจะมีอุณภูมิวิกฤตน้อยกว่าและการเจือด้วยฟลูออรีนปริมาณที่มากเกินไปจะ ทำให้ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้สูญเสียสภาพความเป็นตัวนำยวดยิ่ง



ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้านอร์มอลไลซ์ของ Y134

ที่มา: ปียมาศ ไชยนอก. (2557). *สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนายวดยิ่งอุณหภูมิสูง* YBa2Cu3OyxFx และ YBa3Cu4OyxFx.: หน้า 57.

เมทินและเทเป (Metin & Tepe, 2016, pp. 1083-1087) ได้สังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y358 ที่เจือด้วยเงิน สารตั้งต้นที่ใช้คือ อิตเทรียมออกไซด์ (Y₂O₃) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag₂O) โดยศึกษาโครงสร้างและผลกระทบที่เกิดขึ้น ของตัวอย่างตัวนำยวดยิ่ง Y₃Ba₅Cu_{8-x}Ag_xO₁₈₋6 ที่สังเคราะห์ได้ ประกอบไปด้วยตัวนำยวดยิ่งที่เจือ ด้วยเงิน เมื่อ x เท่ากับ 0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ซึ่งเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ผลการวิจัยพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y358 ที่เจือด้วย 0.1Ag มีอุณหภูมิวิกฤตเริ่มต้น (T_conset) สูงสุดเท่ากับ 97.4 เคลวิน แต่เมื่อมีการเจือปริมาณของเงินมากกว่า 0.3 จะทำให้อุณหภูมิ วิกฤตเริ่มต้นของตัวนำยวดยิ่งตัวอย่างลดลงเหลือ 95.6 เคลวิน และพบว่าการเจือเงินเข้าไปในปริมาณ มากเกินไป อนุภาคเงินจะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนของโครงสร้าง

ซาฮูและเบฮีรา (Sahoo & Behera, 2014, pp. 83-93) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลที่ เกิดขึ้นกับตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBa₂Cu₃O_{7-y} โดยทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างและสมบัติ ของตัวนำยวดยิ่งเมื่อเจือด้วยไทเทเนียมซึ่งมาจากการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ผสมในสารตั้ง ต้น พวกเขาได้ทำการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง YBa₂(Cu_{1-x}Ti_x)₃O_{7-y} เมื่อ x เท่ากับ 0.01 0.02 0.04 และ 0.05 ซึ่งตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์เตรียมขึ้นด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งโดยใช้อุณภูมิในการ เผาที่ 927 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขณะอบอ่อน 450 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นพบว่า สารตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นแบบออโทรอมบิกมีขนาดของเกรนเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณการ เจือของไทเทเนียม โดยตัวอย่างที่เจือไทเทเนียมด้วย x เท่ากับ 0.02 จะมีอุณภูมวิกฤตสูงสุด ซึ่งการ เพิ่มปริมาณไทเทเนียมที่เจือในตัวอย่างไม่ได้ปรับปรุงค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง

ซาลามาและคณะ (Salama, El-Hofy, Rammah, & Elkhatib, 2016) ได้ทำการศึกษา ผลของการเจือโลหะที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O ได้แก่ Cr₂O₃, Co₃O₄ และ Mn₃O₄ ตัวอย่างในการศึกษาเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง โดยในการศึกษาอาศัยเทคนิค XRD และ SEM เพื่อศึกษาโครงสร้างและศึกษาอุณหภูมิวิกฤตโดยใช้เทคนิคการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็ม วัด 4 ขั้วซึ่งพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งที่ศึกษามีค่าลดลงตามระดับการเจือโดยตัวนำยวดยิ่ง ที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดคือตัวอย่างที่เจือด้วย Mn₃O₄

4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วยเหล็ก

หลิวและคณะ (Liu et al., 2005) ได้ศึกษาตัวนำยวดยิ่ง Fe_xCu_{1-x}Ba₂YCu₂O_{7+y} ที่ สังเคราะห์ภายใต้ความดันสูง โดยใช้สารตั้งต้นเป็น Y₂O₃ BaCO₃ CuO และ Fe₂O₃ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% นำสารมาผสมกันและเตรียมด้วยวิธีสถานะของของแข็ง ซึ่งในกระบวนการแคลซิเนชันใช้ อุณหภูมิในช่วง 880 ถึง 930 °C โดยใช้เวลา 70 ชั่วโมง ในกระบวนการซินเตอร์ริงและอบอ่อนใช้ อุณหภูมิ 930 °C และลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องในอัตรา 30 °C/hr รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 40 ชั่วโมง โดยตัวอย่างที่สังเคราะห์ออกมาไม่เกิดสภาพนำยวดยิ่งจึงได้ทำการบดแล้วผสม KClO₄ จากนั้น ทำการเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1000 °C ภายใต้ความดัน 6 GPa เป็นเวลา 30 นาที ผลที่ได้คือ Fe_{0.5}Cu_{0.5}Ba₂YCu₂O_{7.41}มีสมบัติเป็นตัวนำยวดยิ่งโดยมีอุณหภูมิวิกฤตที่ 80 เคลวิน ทำให้มีข้อสรุปว่า การสังเคราะห์ภายใต้ความดันสูงจะช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างและอนุภาคของเหล็กใน โครงสร้างเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยปรับปรุงสภาพการนำยวดยิ่งของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ จี่และคณะ (Jie, Chen-Fong, Zhenxing, Naugle, & Haiyan, 2009) ได้ศึกษาสมบัติ ทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง YBa₂Cu₃O_{7-x}ที่เจือด้วยอนุภาคของ Fe₂O₃ ขนาดนาโนประกอบไปด้วย ตัวนำยวดยิ่งตัวอย่างที่ 1 ถูกเจือด้วย Fe₂O₃ เฉพาะบางส่วน ตัวอย่างที่ 2 ถูกเจือด้วย Fe₂O₃ อย่าง สม่ำเสมอ และตัวอย่างที่ 3 ไม่มีการเจือของอนุภาคใด ๆ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างกันคือ 5 เคลวิน 40 เคลวิน และ 65 เคลวิน พบว่า ตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มที่เจือด้วยอนุภาคของ Fe₂O₃ ตัวอย่างที่ 1 ให้ผลการทดสอบดีที่สุดที่อุณหภูมิ 40 และ 65 เคลวิน และ ตัวอย่างที่ 2 ที่มีการเจือ อนุภาคของ Fe₂O₃ อย่างสม่ำเสมอให้ผลการทดสอบ ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 5 เคลวิน ซึ่งจากทั้ง 2 กรณีจะ พบว่าตัวนำยวดยิ่งที่ถูกเจือด้วยอนุภาคของ Fe₂O₃ มีผลการทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กดีกว่าตัวอย่าง ที่ 3 ที่ไม่มีการเจือของอนุภาคใด ๆ





ภาพประกอบ 23 กระแสวิกฤตเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับตัวนำยวดยิ่งโดยทดสอบ ที่อุณหภูมิ (ก) 5 K (ข) 40 K และ (ค) 65 K

ที่มา: Wang, J.; et al. (2009). Microstructural and Pinning Properties of YBa $_2$ Cu $_3$ O $_{7-\alpha}$ Thin Films Doped with magnetic Nanoparticles.

ชางและคณะ (Zhang, Zhao, Wang, Pan, & Lei, 2014) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ผล ของการเตรียมตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O แบบฟิล์มโดยทำการในรูปแบบของสารละลายทาง เคมิโดยเคลือบลงบนสารประกอบของ LaAlO₃ และได้ทำการเจือจางไอรอนออกไซด์ ลงไปผสมกับ ตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มแล้วทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O ที่ เจือเหล็กลงไปมีค่าอุณหภูมิวิกฤตลดลงอย่างช้า ๆ ตามปริมาณของเหล็กที่เจือไปแต่อย่างไรก็ตาม ตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มที่เจือด้วยไอรอนออกไซด์ในอัตราส่วนที่น้อยกว่า 0.005 จะมีค่าความหนาแน่น กระแสวิกฤตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวนำยวดยิ่งแบบฟิล์มบริสุทธิ์ที่ไม่มีการเจือของสารอื่น กอนซัลเวสและคณะ (Gonsalves et al., 2017) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลของการ เจือเหล็กลงในตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์จาก Bi₃Ni ที่มีโครงสร้างขนาดไมโคร ในการวิจัยเขาได้ทำการ เจืออะตอมของเหล็กลงไปตามสูตร Bi₃Ni_{1-x}Fe_x โดยที่ x เท่ากับ 0 0.05 และ 0.10 ตัวนำยวดยิ่ง ตัวอย่างถูกเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งหลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติที่เกิดขึ้นซึ่ง พบว่า ตัวนำยวดยิ่งประเภท Bi₃Ni ที่เจือด้วยเหล็กทั้ง 3 สูตรมีโครงสร้างแบบออร์โทรอมบิกและไม่มี ผลต่ออุณหภูมิวิกฤตโดยตัวอย่างทั้งหมดมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 4 เคลวิน

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาตัวนำยวดยิ่งประเภท Y-Ba-Cu-O ซึ่งจัด อยู่ในกลุ่มตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงและมีการค้นพบสูตรในการเตรียมที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถ แสดงสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่งได้ โดยผู้วิจัยจะทำการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วยอนุภาค ของ Fe₂O₃ เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ต่อไป



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

- 1. การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃
- 2. การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวอย่าง



ภาพประกอบ 24 แผนภาพขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃

การสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ นั้น สารตัวอย่างทั้ง 2 แบบ จะถูกเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งโดยใช้สูตรในการสังเคราะห์ตามสมมติฐานในงานวิจัย ของอุดมสมุทรหิรัญ และคณะ (Udomsamuthirun et al., 2010)

1.1 การคำนวณสารตั้งต้นของตัวนำยวดยิ่ง Y123

สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ประกอบด้วย อิตเตรียมออกไซด์ (Y₂O₃) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) อัตราส่วนของสารที่แต่ละชนิดที่ ใช้สามารถคำนวณได้ตามปฏิกิริยาเคมีตามสมการ

 $0.5Y_2O_3 + 2BaCO_3 + 3CuO \rightarrow YBa_2Cu_3O_{6.5} + 2CO_2$

จากสมการของปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวสามารถแสดงการคำนวณเพื่อหาปริมาณของสาร ตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งได้ดังนี้

```
มวลโมเลกุลของ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = มวลอะตอม Y + มวลอะตอม O
= (2 × 88.906) + (3 × 15.999)
= 225.809 กรัม
```

```
มวลโมเลกุลของ BaCO3 = มวลอะตอม Ba + มวลอะตอม C + มวลอะตอม O
```

```
= 137.330 + 12.011 + (3 × 15.999)
```

```
= 197.388 กรัม
```

มวลโมเลกุลของ CuO = มวลอะตอม Cu + มวลอะตอม O

```
= 63.546 + 15.999
```

```
= 79.540 กรัม
```

เมื่อทราบมวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดตามสมการของปฏิกิริยาเคมีในข้างต้นจะ

สามารถคำนวณปริมาณสารที่จำเป็นในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 ได้ดังนี้

อิตเตรียมออกไซด์ (Y₂O₃) : 0.5 × 225.809 = 112.904 กรัม

แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) : 2 × 197.388 = 394.676 กรัม

คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) : 3 × 79.540 = 238.620 กรัม

ในการปฏิบัติจะคำนวณอัตราส่วนอย่างต่ำที่เหมาะสมอีกครั้งในการเตรียมสารตัวอย่างที่จะนำมา ศึกษาเนื่องจากสารตั้งต้นแต่ละชนิดเป็นสารบริสุทธิ์ที่มีต้นทุนค่อนข้างสูง

1.2 การคำนวณสารตั้งต้นของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃

สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ประกอบด้วย อิตเตรียมออกไซด์ (Y₂O₃) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และไอรอน (III) ออกไซด์ (Fe₂O₃) ซึ่งตัวอย่างที่สังเคราะห์ออกมาได้จะอยู่ในลักษณะของสารประกอบ YBa₅(Cu_{1-x}Fe_x)₆O₂₄₋₀ โดยในการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ จะใช้สูตรในการเตรียม เช่นเดียวกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 แต่อัตราส่วนของสารที่ใช้จะแตกต่างกัน

ตัวอย่างการเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃

$$0.5Y_2O_3 + 5BaCO_3 + 3CuO + 1.5Fe_2O_3 \longrightarrow YBa_5(Cu_{0.5}Fe_{0.5})_6O_5 + 5CO_2$$

จากสมการปฏิกิริยาเคมีของการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เท่ากับ 0.5 โดยมวล สามารถคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้เช่นเดียวกับ ตัวนำยวดยิ่ง Y123 ซึ่งเป็นดังต่อไปนี้

> มวลโมกุลของ Fe₂O₃ = มวลอะตอม Fe + มวลอะตอม O = (2 × 55.845) + (3 × 15.999) = 159.687 กรัม

จากการคำนวณมวลโมกุลของ Y₂O₃ BaCO₃ และ CuO เมื่อทราบมวลโมเลกุลของ Fe₂O₃ แล้ว จะสามารถคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งที่เจือเหล็กได้ดังนี้

อิตเตรียมออกไซด์ (Y₂O₃) : 0.5 × 225.809 = 112.904 กรัม

แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) : 5 × 197.388 = 986.940 กรัม

คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) : 3 × 79.540 = 238.620 กรัม

ไอรอน (III) ออกไซด์ (Fe₂O₃) : 1.5 × 159.687 = 239.530 กรัม

จากตัวอย่างการคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือ เหล็กจะทำให้ผู้วิจัยสามารถหาปริมาณของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งที่เจือ เหล็กในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อนำมาศึกษาผลที่เกิดขึ้นต่อไป

1.3 กระบวนการสังเคราะห์สารตัวอย่างด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

เมื่อคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่จะนำมาสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือ ด้วย Fe₂O₃ เรียบร้อยแล้ว กระบวนการต่อไปคือการสังเคราะห์สารตัวอย่างออกมา โดยตัวนำยวดยิ่ง ทั้ง 2 แบบนั้นจะสังเคราะห์ออกมาด้วยกระบวนการเดียวกันคือ การเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะ ของของแข็ง โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

1.3.1 กระบวนการแคลซิเนชัน

นำสารตั้งต้นที่จำเป็นในการเตรียมตัวนำทั้ง 2 แบบมาผสมในครกอะลูมินาให้เป็น สารเนื้อเดียวกันก่อนนำไปเผาให้ความร้อน จากนั้นนำสารที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันดีแล้วใส่ในถ้วยอะลูมิ นาเพื่อนำไปเผาให้ความร้อนในเตาเผาเพื่อให้สารเกิดโครงสร้างยึดเกาะกัน โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 °C และตั้งค่าให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตรา 20 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 950 °C เมื่อสังเคราะห์สาร ตัวอย่าง Y123 และเพิ่มอุณภูมิถึง 900 °C เมื่อสังเคราะห์ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ หลังจากนั้นคงไว้ที่ อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงปรับลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2 °C/min ลงมาที่อุณหภูมิ 100 °C



ภาพประกอบ 25 กระบวนการแคลซิเนชั่นในการสังเคราะห์สารตัวอย่าง (ก) สำหรับสารตัวอย่าง Y123 และ (ข) สำหรับสารตัวอย่าง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ สารตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแคลซิเนชันจะเกิดการจับตัวกันของโครงสร้างเป็นก้อนแข็งและมีสีดำ โดยจะต้องนำไปผ่านกระบวนการอบอ่อนเพื่อทำให้ได้ตัวอย่างที่มีสมบัติความเป็นตัวนำยวดยิ่ง

1.3.2 กระบวนการซินเตอร์ริงและการอบอ่อน

นำสารตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแคลซิเนชันมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่าน ตะแกรงขนาด 40 ไมโครเมตร เพื่อทำให้สารมีขนาดอนุภาคเล็กลง หลังจากนั้นอัดขึ้นรูปตามแบบ พิมพ์โดยใช้เครื่องอัดไฮโดรลิกทิ้งไว้ 30 นาที สารที่อัดขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นก้อนกลมแบน จากนั้น นำไปเผาขึ้นรูปหรือเรียกว่าการซินเตอร์ริงโดยทำการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ℃ และตั้งค่าให้ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตรา 20 ℃/min จนถึงอุณหภูมิ 950 ℃ เมื่อสังเคราะห์สารตัวอย่าง Y123 และ เพิ่มอุณภูมิถึง 900 ℃ เมื่อสังเคราะห์ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ คงไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กระบวนการต่อไปคือการอบอ่อนซึ่งเป็นการเพิ่มออกซิเจนเข้าไปในโครงสร้างเพื่อทำให้สาร ตัวอย่างเกิดสมบัติความเป็นตัวนำยวดยิ่ง โดยลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 2 ℃/min จนถึงอุณหภูมิ 550 ℃ คงไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นจึงปรับลดอุณหภูมิอีกครั้งจนถึง 100 ℃ ด้วยอัตรา 2 ℃/min ตามภาพประกอบ 27 เมื่อสารตัวอย่างผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงและการอบอ่อนแล้ว จะได้สารตัวอย่างที่สามารถนำไปทดสอบสภาพความเป็นตัวนำยวดยิ่งและสมบัติทางฟิสิกส์ในขั้นตอน ต่อไป



(ก)



ภาพประกอบ 26 กระบวนการซินเตอร์ริงและอบอ่อนในการสังเคราะห์สารตัวอย่าง (ก) สำหรับสาร ตัวอย่าง Y123 และ (ข) สำหรับสารตัวอย่าง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃

2. การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวอย่าง

สารตัวอย่างที่ได้มาจากกระบวนการสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ผู้วิจัยจะนำมาทดสอบสภาพ ความต้านทานและสมบัติทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

- 1. วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว
- 2. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM
- 3. วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกิดขึ้นด้วย EDX
- 4. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้อาศัยชุดอุปกรณ์การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัดแบบ 4 ขั้วที่ จัดทำขึ้นเองเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับลักษณะของตัวอย่างและบริบทของการวิจัยที่เกิดขึ้น

2.1 ขั้นตอนการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัดแบบ 4 ขั้วแบบเรียง

ในการวัดจะใช้อุปกรณ์ที่ถูกออกแบบขึ้นมาให้ที่สอดคล้องกับรูปร่างของสารตัวอย่างที่มี ลักษณะเป็นแผ่นวงกลม ซึ่งจะใช้การเรียงขั้วของเข็มวัดให้ระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร และจะใช้ กาวเงินในการประสานขั้วทั้ง 4 เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า และนำไปใส่ในถังที่บรรจุด้วยในโตรเจนเหลว อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย

- 1) สายโคเอ็กเซียลเบอร์ TSLE156277
- 2) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค
- 3) เทอร์โมมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 51

- 4) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงตัวยี่ห้อ MASTECH รุ่น HY3005
- 5) แหล่งให้ความร้อน
- 6) มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 8845A
- 7) คอมพิวเตอร์



ภาพประกอบ 27 รูปแบบการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่าง

หลังจากนั้นก็ทำการวัดความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งชุดอุปกรณ์การวัดจะใช้อุปกรณ์แบบ เดียวกับการวัดการกระจายอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของสารมีค่าเท่ากับ 77 เคลวิน จะเริ่มให้ไฟฟ้า กระแสตรงที่มีขนาดคงตัว คือ 100 มิลลิแอมแปร์ จนกระทั่งอุณหภูมิของสารถึง 120 เคลวิน บันทึก ข้อมูลในคอมพิวเตอร์ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจาก สมการ (2.3) หลังจากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานกับอุณหภูมิโดยจะ สามารถทราบค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นได้โดยการพิจารณาจากกราฟ ในช่วงที่สภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างมีการลดลงอย่างทันทีทันใด

2.2 ขั้นตอนการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการจัดเรียงขั้วที่มีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งเล็กกว่าแบบสี่ขั้ว แบบเรียง โดยการหาความต้านทานไฟฟ้าสามารถหาได้จากการวัดรอบสารตัวอย่าง ซึ่งสามารถ จัดเรียงขั้วในการการวัดได้หลายลักษณะดังนี้



ภาพประกอบ 28 ลักษณะการจัดเรียงขั้ววัดแบบแวนเดอร์พาว

ขั้นตอนการวัดจะเหมือนกับการวัดต้านทานด้วยวิธีเข็มวัดแบบ 4 ขั้วแบบเรียงแต่จะใช้ คอมพิวเตอร์ช่วยในการเก็บค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความ ต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างด้วยวิธีแบบแวนเดอร์พาวนี้จะประกอบไปด้วย

- 1. สายโคเอ็กเซียลเบอร์ TSLE156277
- 2. เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค
- 3. สายเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล NI USB-TC01
- 4. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงตัวยี่ห้อ MASTECH รุ่น HY3005
- 5. มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 8845A
- 6. มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 8846A
- 7. คอมพิวเตอร์

หลังจากทำการวัดค่าความต้านทานแล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้า ρ_A และ ρ_B จากสมการ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ เพื่อหาค่าสภาพความต้านทานเฉลี่ย ของสารตัวอย่างตามสมการ (2.8) ในขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานทั้งสองลักษณะนี้ ผู้วิจัยจะอาศัย ชุดเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นเองในการเก็บข้อมูล ซึ่งหลังจากการเก็บข้อมูลในส่วนนี้เสร็จสิ้น ผู้วิจัยจะ ทำการส่งตัวอย่างของตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์ขึ้นไปวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการภายนอกเพื่อศึกษา สมบัติอื่น ๆ ได้แก่ 1) การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM) ในภาพประกอบ 45 และ 50 โดยใช้ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6380LV และใน ภาพประกอบ 46 ถึง 49 และภาพประกอบ 51 ถึง 53 โดยใช้ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300
 2) การหาองค์ประกอบธาตุของตัวนำยวดยิ่งด้วยเครื่องเอกซ์เรย์สเปกโตสโกปีแบบ กระจายพลังงาน (EDX) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-MaxN20

3) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่งด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Discovery diffractometer

รายละเอียดและผลการวิจัยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอในบทถัดไป



บทที่ 4 ผลการวิจัย

จากวิธีดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 เพื่อศึกษาผลของการเจือ Fe₂O₃ ที่มีต่อตัวนำยวดยิ่งที่ สังเคราะห์ขึ้นได้ โดยผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่ง YBa₂Cu₃O_{7-δ} และ YBa₅Cu₆Fe_xO_{24-δ} ซึ่งมีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง

อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูก วัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว ใน 2 ลักษณะ โดยผลที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

1.1 ผลการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง

การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงมีลักษณะการวางตำแหน่งของเข็ม วัดในแนวตรงโดยมีระยะห่างของเข็มวัดแต่ละตำแหน่งห่างกัน 5 มิลลิเมตร ผู้วิจัยทำการวัดโดยการให้ ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 100 มิลลิแอมแปร์ แล้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อนำไปคำนวณค่าความ ต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยการเก็บข้อมูลอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 77 ถึง120 เคลวิน ซึ่งได้ผลเป็นดังนี้



ภาพประกอบ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงของตัวนำยวดยิ่ง Y123



ภาพประกอบ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงของตัวนำยวดยิ่ง Y156



ภาพประกอบ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ Normalized กับอุณหภูมิด้วย วิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงของตัวนำยวดยิ่ง Y123 เปรียบเทียบกับ Y156

อุณหภูมิวิกฤตของสารตัวอย่างสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ของสภาพต้านทาน ไฟฟ้ากับอุณหภูมิโดยวิธีของมูราเซซึ่งค่าที่ได้แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 1 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156

ชนิดของสารตัวอย่าง	T _c offset (เคลวิน)	T _c onset (เคลวิน)	∆T _c (เคลวิน)
Y123	88	91	3
Y156	92	95	3

ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เมื่อนำมาหาค่าความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงนั้น ตัวอย่างส่วนใหญ่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปจนถึงช่วงหนึ่งจะเกิดการ ลัดวงจรขณะเก็บข้อมูลแสดงในภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 32 ตัวอย่างการลัดวงจรขณะเก็บข้อมูลของตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วย Fe₂O₃

ผลจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวทำให้สารตัวอย่างเกิดการหลอมเหลวบริเวณผิวที่ สัมผัสอยู่กับเข็มวัดจึงไม่สามารถนำผลมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าของสภาพความต้านทานและอุณหภูมิ วิกฤตที่เกิดขึ้นได้

1.2 ผลการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว

การวัดค่าความต้านทานในลักษณะนี้จะกระทำในสภาพแวดล้อมเดียวกับการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงและใช้เงื่อนไขเดียวกันคือให้ค่ากระแสไฟฟ้าขนาด 100 มิลลิ แอมแปร์เข้าไปในวงจร แต่การให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปด้วยวิธีการวัดในลักษณะนี้จะมีการสลับทิศ ทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ให้เข้าไปจากนั้นทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ในช่วงอุณหภูมิ 77 ถึง 120 เคลวิน เพื่อนำมาคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งและหาค่าของอุณหภูมิ วิกฤตต่อไป

ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์สารตัวอย่างซึ่งเป็นตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ในสัดส่วนเดียวกันเท่ากับ 0.001 0.003 0.005 และ 0.010 เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ เกิดขึ้นโดยนำมาทำการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวในลักษณะดังที่กล่าว มาข้างต้น ผลการวิจัยสามารถแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความ ต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิและสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ Normalized กับอุณหภูมิเช่นเดียวกัน กับผลการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง

ผลการวิจัยตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ สัดส่วนเท่ากับ 0.001 0.003 0.005 และ 0.010 ด้วยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวสามารถแสดงผลใน การได้ตามภาพประกอบดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123



ภาพประกอบ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123



ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เท่ากับ 0.003



ภาพประกอบ 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123



ภาพประกอบ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เท่ากับ 0.010

จากกราฟความสัมพันธ์ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ แต่ละสัดส่วนสามารถ นำมาเขียนกราฟแบบ Normalized เพื่อเปรียบเทียบผลของการวิจัยได้ดังนี้



ภาพประกอบ 38 สภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ Normalized กับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe₂O₃

ส่วนต่อมาเป็นผลการวิจัยของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ วิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156



ภาพประกอบ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เท่ากับ 0.001



ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เท่ากับ 0.003



ภาพประกอบ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เท่ากับ 0.005

จากกราฟความสัมพันธ์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ แต่ละสัดส่วนพบว่ามี เพียงตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ สัดส่วน 0.010 เท่านั้นที่ไม่สามารถหากราฟความสัมพันธ์ ที่เกิดขึ้นได้ โดยตัวอย่างที่เจือด้วยสัดส่วนอื่น ๆ สามารถนำมาเขียนกราฟแบบ Normalized เพื่อ เปรียบเทียบผลของการวิจัยได้ดังนี้



ภาพประกอบ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ Normalized กับอุณหภูมิ ด้วยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เท่ากับ 0.000 0.001 0.003 0.005 และ 0.010 อุณหภูมิวิกฤตที่ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ด้วยสัดส่วน เท่ากับ 0.000 0.001 0.003 0.005 และ 0.010 ที่พบจากการวิจัยแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 2 อุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ โดยการวัดความ ต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาว

ชนิดของสารตัวอย่าง	T _c offset (เคลวิน)	T _c onset (เคลวิน)	$\mathbf{\Delta}$ T _c (เคลวิน)
Y123	89.4	95.7	6.3
Y123 + 0.001 Fe	92.5	99.4	6.9
Y123 + 0.003 Fe	90.5	100.9	10.4
Y123 + 0.005 Fe	91.8	99.5	7.7
Y123 + 0.01 Fe	84.4	93.9	9.5
Y156	89.4	94.8	5.4
Y156 + 0.001 Fe	87.1	94.5	7.4
Y156 + 0.003 Fe	86.4	92.5	6.1
Y156 + 0.005 Fe	81.7	89.9	8.2
Y156 + 0.01 Fe	ไม่สามารถสังเกตเห็น T _c		

ผลการวิจัยพบว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ส่วนใหญ่มีค่าอุณหภูมิวิกฤต

เพิ่มขึ้นซึ่งตัวอย่างที่มีค่าอุณภูมิวิกฤต onset สูงสุดคือตัวนำยวดยิ่ง Y123 + 0.003 Fe มีค่า T_c onset เท่ากับ 100.9 เคลวิน แต่เมื่อสัดส่วนของ Fe₂O₃ ที่เจือลงไปเพิ่มขึ้นจนถึงถึงระดับหนึ่ง อุณหภูมิวิกฤตของสารตัวอย่างจะลดลงโดยสารตัวอย่างที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset ต่ำที่สุดคือตัวนำ ยวดยิ่ง Y123 + 0.01 Fe ซึ่งมีค่า T_c onset เท่ากับ 93.9 เคลวิน ในส่วนของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ผลการวิจัยพบว่าค่าของอุณหภูมิวิกฤตลดลงตามสัดส่วนปริมาณของ Fe₂O₃ ที่เจือลงไป โดยตัวอย่างที่ มีค่าอุณหภูมิวิกฤต บระ เท่ากับ 89.9 เคลวิน และมีตัวอย่างที่ไม่สามารถสังเกตเห็นอุณหภูมิวิกฤตได้ในช่วง 77 ถึง 120 เคลวิน คือตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.01 Fe

2. ลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่ง

ตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์ขึ้นในการวิจัยจะอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างโดยจะทำการ ถ่ายภาพที่กำลังขยาย 500 1000 และ 2000 เท่า แสดงได้ตามภาพประกอบดังต่อไปนี้





ภาพประกอบ 44 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ภาพประกอบ 45 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.001 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ภาพประกอบ 46 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.003 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ภาพประกอบ 47 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.005 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ภาพประกอบ 48 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y123 + 0.01 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ภาพประกอบ 49 ภาพถ่าย**ลักษณะพื้นผิว**ของ Y156 ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า


ภาพประกอบ 50 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y156 + 0.001 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ภาพประกอบ 51 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y156 + 0.003 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า



ภาพประกอบ 52 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของ Y156 + 0.005 Fe ที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 1000 เท่า ค) 2000 เท่า

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเกรนจากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 2000 เท่าพบว่าขนาดเกรนของ ตัวอย่างตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่ไม่ได้เจือ Fe₂O₃ มีขนาดใหญ่กว่าตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่ถูกเจือด้วย Fe₂O₃ ซึ่งขนาดของเกรนที่พบจากตัวอย่างของตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วย Fe₂O₃ แต่ ละสัดส่วนนั้นมีขนาดใกล้เคียงกันและมีรูพรุนเกิดขึ้น

3. องค์ประกอบธาตุของตัวนำยวดยิ่ง

ผู้วิจัยใช้เครื่องเอกซ์เรย์สเปกโตสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-MaxN20 ในการหาองค์ประกอบธาตุของตัวนำยวดยิ่งที่พบในตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น โดยทำการ สุ่มตำแหน่งในการวิเคราะห์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เพื่อคำนวณหาปริมาณของธาตุที่เป็น องค์ประกอบจากนั้นจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการ เตรียมสารตัวอย่าง ซึ่งได้ผลการวิจัยเป็นดังต่อไปนี้

			10.			
<u>ตรโดยองสารตัวอย่าง</u>	ຮາຕ		ปริมาณ At	omic% แต่	ละตำแหน่ง	
0 190 100 11 100 10	ןאו ט	1	2	3	4	5
	Y	7.69	7.57	7.14	7.32	7.62
V122	Ba	14.06	13.53	14.13	16.66	14.38
1125	Cu	24.66	24.61	23.82	23.51	24.11
	0	53.58	54.29	54.91	52.51	53.89
	Y	7.30	6.79	7.33	_	-
	Ba	16.09	16.86	16.71	-	-
Y123 + 0.001 Fe	Cu	22.62	21.50	22.52	-	-
	Fe	0.07	0.34	0.24	-	-
	0	53.92	54.52	53.20	-	-
	Y	7.50	7.28	7.19	-	-
	Ba	16.51	16.51	16.94	-	-
Y123 + 0.003 Fe	Cu	22.81	22.52	22.67	-	-
	Fe	0.38	-0.15	0.39	-	-
	0	52.80	53.85	52.81	-	-

ตาราง 3 ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น

20.000000000000000000000000000000000000	~~~~	ປ	ิโริมาณ Ato	mic% ของ	แต่ละตำแหเ	ุ่ง
อาดเภองยุ เวิดเวียย เง	ן <i>א</i> ו ס	1	2	3	4	5
	Y	6.86	7.11	7.32	-	-
	Ba	16.11	15.27	15.79	-	-
Y123 + 0.005 Fe	Cu	23.24	23.06	22.32	-	-
	Fe	0.03	0.20	0.31	-	-
	0	53.76	54.37	54.26	-	-
	Y	7.34	6.94	7.03	-	-
	Ва	14.82	16.26	15.93	-	-
Y123 + 0.01 Fe	Cu	22.91	22.80	22.84	-	-
	Fe	0.56	0.48	0.37	-	-
	0	54.36	53.52	53.83		-
	Y	2.45	1.54	5.49	0.00	8.52
V156	Ва	16.58	19.29	18.49	16.45	16.01
1150	Cu	20.50	20.33	22.08	22.47	23.44
	0	60.47	58.84	53.94	61.08	52.03
	Y	2.76	3.67	2.20	-	-
	Ва	17.74	17.03	17.32	-	-
Y156 + 0.001 Fe	Cu	14.45	17.34	15.56	-	-
	Fe	-0.03	0.10	0.29	-	-
	0	65.07	61.86	64.63	-	-
	Y	3.06	2.55	3.29	-	-
	Ba	15.60	16.83	17.22	-	-
Y156 + 0.003 Fe	Cu	17.17	17.27	17.05	-	-
	Fe	0.12	0.15	0.09	-	-
	0	64.06	63.20	62.34	-	-

ตาราง 3 ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น (ต่อ)

<u>ต</u> ญิคตองสารตัวอย่าง	ຮາສ	ປ	ริมาณ Atoi	mic% ของแ	ต่ละตำแหเ	ุ่ง
0 140 0001 1901 900 10	UIV	1	2	3	4	5
	Y	3.06	2.55	3.29	-	-
	Ba	15.60	16.83	17.22	-	-
Y156 + 0.005 Fe	Cu	17.17	17.27	17.05	-	-
	Fe	0.12	0.15	0.09	-	-
	0	64.06	63.20	62.34	-	-

ตาราง 3 ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น (ต่อ)

จากตาราง 3 นำค่าเฉลี่ยปริมาณ Atomic% ของธาตุที่พบมาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับ สัดส่วนปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการเตรียมสารตัวอย่าง โดยการหาอัตราส่วน องค์ประกอบธาตุแต่ละชนิดที่พบเทียบกับปริมาณ Atomic% เฉลี่ยของอิตเตรียม ผลการคำนวณเป็น ดังนี้

ตาราง 4 อัตราส่วนปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบเมื่อเทียบกับอิตเตรียม

ชนิดของสารตัวอย่าง	ชนิดของธาตุ	ปริมาณ Atomic% เฉลี่ย	อัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้
	Y	7.47	1.00
V/102	Ва	14.55	1.95
1125	Cu	24.14	3.23
	0	53.84	7.21
	Y	7.14	1.00
	Ba	16.55	2.32
Y123 + 0.001 Fe	Cu	22.21	2 1 1 *
	Fe	0.22	5.14
	0	53.88	7.55

ชนิดของสารตัวอย่าง	ชนิดของธาตุ	ค่าเฉลี่ย Atomic%	อัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้
	Y	7.32	1.00
	Ва	16.65	2.27
Y123 + 0.003 Fe	Cu	22.67	210 *
	Fe	0.21	5.12
	0	53.15	7.26
	Y	7.10	1.00
	Ва	15.72	2.22
Y123 + 0.005 Fe	Cu	22.87	2 25 *
	Fe	0.18	5.25
	0	54.13	7.63
	Y ——	3.60	1.00
	Ва	17.36	4.82
Y123 + 0.01 Fe	Cu	21.76	3 28 *
	Fe	0.47	5.20
	0	57.27	15.91
	Y	3.60	1.00
V156	Ва	17.36	4.82
1150	Cu	21.76	6.04
	0	57.27	15.91
	Y	2.88	1.00
	Ва	17.36	6.04
Y156 + 0.001 Fe	Cu	15.78	5 53 *
	Fe	0.12	5.55
	0	63.85	22.20

ตาราง 4 อัตราส่วนปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบเมื่อเทียบกับอิตเตรียม (ต่อ)

ชนิดของสารตัวอย่าง	ชนิดของธาตุ	ค่าเฉลี่ย Atomic%	อัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้
	Y	2.97	1.00
	Ва	16.55	5.58
Y156 + 0.003 Fe	Cu	17.16	5 83 *
	Fe	0.12	5.05
	0	63.20	21.30
	Y	3.35	1.00
	Ва	17.10	5.10
Y156 + 0.005 Fe	Cu	18.08	5 11 *
	Fe	0.18	5.44
	0	61.29	18.28

ตาราง 4 อัตราส่วนปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบเมื่อเทียบกับอิตเตรียม (ต่อ)

หมายเหตุ: * เป็นอัตราส่วนค่าเฉลี่ย Atomic% รวมของ Cu และ Fe เทียบกับ Y

ผลจากตารางที่ 4 พบว่าอัตราส่วนของธาตุที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนจากปริมาณ อัตราส่วนของธาตุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการเตรียมสารตัวอย่างแสดงให้เห็นถึงความไม่ สม่ำเสมอในการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบภายในตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์ได้

4. โครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่ง

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่งที่ผู้วิจัยสังเคราะห์ขึ้นมานั้นจะเลือกใช้เทคนิค การตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยทำการเริ่มวัดมุม 2**0** ด้วยอัตรา 0.02 องศาต่อ วินาที จากตำแหน่ง 10 องศา ถึง 90 องศา เครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Discovery diffractometer ผลการวิจัยแสดงได้จากเส้นสเปกตรัมของตัวอย่างดังภาพประกอบที่ 54 และ 55 ซึ่งผลการตรวจวัดนี้จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมฟูลพรอฟ



ภาพประกอบ 53 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ที่เจือด้วย Fe₂O₃



ภาพประกอบ 54 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃

	34	าน่วยเซลล์จ	าอง			/			ا مردمان مرمده ا			
	و)	สารนำยวดเ	- 63		นอม			นนายเข	ปราชชาตา	าตและกลุม	Rhen	
ตัวนำยวดยิ่ง		Y123		c/a	ໃຄໂສ	χ^{2}		CuFe ₂ O ₄			BaCuO ₂	
		Pmmm			พรอปิก			l41/amd			lm-3m	
	a (Å)	b (Å)	c (Å)				a (Å)	(Å)	c (Å)	a (Å)	b (Å)	c (Å)
50 TV	3.82643	3.89063	11.67231	2 01044		-						
CZ11	0.00012	0.00012	0.00038	5.05044	1.00	Т. Г. Г	1		ı	I	I	I
V122 - 0.001F.	3.88063	3.82908	11.67474	120000		1.85	5.90903	5.90903	8.79539			
	0.00020	0.00012	0.00025	5.00847	1.00		0.00013	0.00013	0.00062	ı	ı	ı
V122 - 0.003F.	3.87958	3.83163	11.67739		7 () 7	1.23	5.91670	5.91670	8.81481			
97CUU.U + CZI 1	0.00014	0.00010	0.00020	06600.0	1.54		0.00013	0.00013	0.00065	I	ı	I
V122 - 0.00FE	3.83524	3.87908	11.67438	000000	¢.	1.15	5.92961	5.92961	8.63484			
	0.00009	0.00014	0.00018	06040.c	1.24		0.00010	0.00010	0.00037	I	ı	I
V122 - 0.010Fc	3.83857	3.87583	11.67791	20070 6	7 7 7	1.76	6.20032	6.20032	8.58503			
	0.00012	0.00015	0.00026	07740.C	1.14		0.00084	0.00084	0.00066	ı	1	I

ตาราง 5 ค่าคงตัวหน่วยเซลล์ของตัวน้ำยวดยิ่ง Y123 และกลุ่มปริภูมิของสารน้ำยวดยิ่งและสารปกติ

			c (Å)	18.28995	0.00034	18.31988	0.00050	18.31954	0.00052	18.31798	0.00056
มปริภูมิ	BaCuO ₂	lm-3m	b (Å)	18.28995	0.00034	18.31988	0.00050	18.31954	0.00052	18.31798	0.00056
ງກອີແລະກລຸ່ງ			a (Å)	18.28995	0.00034	18.31988	0.00050	18.31954	0.00052	18.31798	0.00056
ัลล์ของสารเ			c (Å)	11.42448	0.00026		I		I		I
หน่วยเซ	Ba ₂ Cu ₃ O ₆	Ba ₂ Cu ₃ O ₆ Pccm		20.65148	0.00039				1		
			a (Å)	13.03835	0.00026						
χ^{2}				, ,	C1.1	1 50	OC.T	00	1.30	1 82	CD.1
แอน ไอโซ		ูปใก		72 1	T./O	0	1.40	07 0	0.00	1 01	17.1
1	, L	พริต		_							
1	c/a lo	N 36		E OOOAD	247742.C	00000 2	0.01009	E OAA16	01444.0	6 06108	0.100.0
ම ය ස	c/a to	NSe	c (Å)	22.91207 E 00043	0.00071 0.00071	23.34635	0.00083	23.04671 E 04415	0.00229	23.32614 ¢ 06108	0.00111
ນ່ວຍເซลล์ของ ເກຣນຳຍວ໑ຍິ່ง	Y156 c/a lo	Pmmm	b (Å) c (Å)	3.88694 22.91207 E 00043	0.00013 0.00071	3.89463 23.34635	0.00015 0.00083	3.90379 23.04671 E 04415	0.00034 0.00229	3.89474 23.32614 6.06108	0.00016 0.00111
หน่วยเซลล์ของ สารนำยวดยิ่ง แ	Y156 c/a le	Pmmm 9136	a (Å) b (Å) c (Å)	3.81905 3.88694 22.91207 E 00042	0.00013 0.00013 0.00071	3.84056 3.89463 23.34635	0.00014 0.00015 0.00083	3.87720 3.90379 23.04671 E 00014	0.00036 0.00034 0.00229	3.84794 3.89474 23.32614 6.06108	0.00021 0.00016 0.00111

ตาราง 6 ค่าคงตัวหน่วยเซลล์ของตัวน้ำยวดยิ่ง Y156 และกลุ่มปริภูมิของสารน้ำยวดยิ่งและสารปกติ

หมายเหตุ: แอนไอโซทรอปิก = [100(*b* - *a*)] 0.5(*b* + *a*)

เมื่อ a และ b คือ ขนาดแกนของปริภูมิสารน้ำยวดยิ่ง

จากผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่งสามารถระบุ ค่าคงตัวหน่วยเซลล์และรูปแบบโครงสร้างปริภูมิของสารที่พบโดยแบ่งออกเป็น สารนำยิ่งยวดมี รูปแบบกลุ่มปริภูมิแบบ Pmmm มีโครงสร้างแบบออโทรอมบิกและสารปกติซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของ CuFe₂O₄ มีรูปแบบกลุ่มปริภูมิแบบ I41/amd มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล กลุ่มของ Ba₂Cu₃O₆ มี รูปแบบกลุ่มปริภูมิแบบ Pccm มีโครงสร้างแบบออโทรอมบิกและกลุ่มของ BaCuO₂ มีรูปแบบกลุ่ม ปริภูมิแบบ Im-3m มีโครงสร้างแบบคิวบิกซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 5 และ 6 จากผลการวิเคราะห์ อุณหภูมิวิกฤตที่เกิดขึ้นของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ และข้อมูลค่าคงตัว หน่วยเซลล์ของแกนที่ปรากฏซึ่งพบว่าความยาวหน่วยเซลล์ของแกน *c* ของตัวนำยวดยิ่งประเภท Y156 จะมากกว่าประเภท Y123 แต่เมื่อเปรียบเทียบในตัวนำยวดยิ่งประเภทเดียวกันจะมีขนาด ใกล้เคียงกัน โดยสามารถเขียนกราฟเพื่อแสดงแนวโน้มและหาความสัมพันธ์ของปริมาณต่าง ๆ ที่อาจ มีผลต่อสมบัติของตัวนำยวดยิ่งได้ดังนี้



ภาพประกอบ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตและปริมาณของเหล็กในตัวนำยวดยิ่ง



ภาพประกอบ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเซลล์แกน c และ ปริมาณของเหล็กในตัวนำยวดยิ่ง Y156



ภาพประกอบ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยเซลล์ c/a และ ปริมาณของเหล็กในตัวนำยวดยิ่ง Y156

บทที่ 5 สรุป อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยจากบทที่ 4 เกี่ยวกับตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ เพื่อ ศึกษาอุณหภูมิวิกฤตโดยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วและผลที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบธาตุและโครงสร้างผลึก ซึ่งสามารถสรุปและอภิปรายผลที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้

......

สรุปผลการวิจัย

การเตรียมตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมได้ โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งโดยมีกระบวนการที่สำคัญประกอบด้วย กระบวนการเผาผง (Calcination) โดยนำสารตั้งต้นได้แก่ อิตเตรียมออกไซด์ (Y₂O₃) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) คอป เปอร์ออกไซด์ (CuO) และสารที่ใช้ในการเจือเผาให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่ 900 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 24 ชั่วโมง และใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างคงที่หลังจากนั้นปรับลดอุณหภูมิลงเพื่อนำสารที่ ผ่านกระบวนการเผาผงแล้วมาอัดขึ้นรูปตามแบบพิมพ์โดยทำการให้ความดัน หลังจากนั้นนำเข้าสู่ กระบวนการเผาขึ้นรูป (Sintering) โดยให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน หลังจากนั้นเริ่มเข้าเข้าสู่กระบวนการอบอ่อน (Annealing) โดยการลดอุณหภูมิ ลงมาเป็น 550 องศาเซลเซียส และทำการเติมออกซิเจนเข้าไปภายในโครงสร้างของสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทั้งหมดปรับลดอุณหภูมิเตาเผาลงเพื่อนำตัวนำยวดยิ่งที่ได้ออกมาเพื่อ ทำการศึกษาต่อไป

จากการศึกษาผลของเจือ Fe₂O₃ ที่มีต่อความต้านทานของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ซึ่งทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้ว เพื่อหา อุณหภูมิวิกฤตพบว่า การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงสามารถวัดค่าความต้านทาน ไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123 ได้ โดยพบว่ามีค่าอุณหภูมิวิกฤต offset เท่ากับ 88 เคลวิน และมีค่า อุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 91 เคลวิน และสามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ของตัวนำยวดยิ่ง Y156 ได้ โดยพบว่ามีค่าอุณหภูมิวิกฤต offset เท่ากับ 92 เคลวินและมีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 95 เคลวิน แต่เมื่อวัดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ โดยใช้การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียงพบว่าไม่สามารถวัดค่าความต้านทาน ไฟฟ้าเพื่อนำมาหาค่าอุณหภูมิวิกฤตได้ ส่วนในกรณีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งโดย ใช้การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวพบว่า สามารถวัดค่าความต้านทาน ้ไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งแต่ละตัวอย่างเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตได้โดยตัวนำยวดยิ่ง Y123 มีค่าอุณหภูมิ ี้ วิกฤต offset เท่ากับ 89.4 เคลวิน และอุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 95.7 เคลวิน ส่วนตัวนำยวดยิ่ง Y156 ที่วัดค่าความต้านทานโดยการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วในลักษณะนี้สามารถ พิจารณาค่าอุณหภูมิวิกฤต offset ได้เท่ากับ 89.4 เคลวิน และมีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 94.8 เคลวิน ซึ่งในการวิจัยนี้เมื่อนำตัวอย่างตัวนำยวดยิ่งทั้ง 2 ประเภทที่มีการเจือ Fe₂O₃ ลงไปใน กระบวนการเตรียมมาวัดความต้านทานไฟฟ้าแล้วพิจารณาเปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวด ี้ยิ่งแต่ละตัวอย่างพบว่า ปริมาณการเจือ Fe₂O₃ ลงไปในกระบวนการเตรียมตัวนำยวดยิ่งมีผลต่อ ้อุณหภูมิวิกฤตที่พิจารณาได้ อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เติมสารเจือลงไปนั้น มีค่าอุณหภูมิวิกฤตลดลงแปรผันกับการเพิ่มปริมาณ Fe₂O₃ ที่เจือลงไปในตัวนำยวดยิ่งตัวอย่าง ซึ่ง ตัวนำยวดยิ่งที่เติมสารเจือลงไปประเภท Y123 ตัวนำยวดยิ่ง Y123 + 0.003 Fe มีค่าอุณหภูมิวิกฤต สูงสุดโดยมีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 100.9 เคลวินและมีค่าอุณหภูมิวิกฤต offset เท่ากับ 90.5 เคลวิน ตัวนำยวดยิ่ง Y123 + 0.01 Fe มีค่าอุณหภูมิวิกฤตต่ำสุดโดยมีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 93.9 เคลวินและมีค่าอุณหภูมิวิกฤต offset เท่ากับ 88.4 เคลวินและตัวนำยวดยิ่งประเภท Y156 ที่เติมสารเจือลงไป ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.001 Fe มีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดโดยมีค่าอุณหภูมิ วิกฤต onset เท่ากับ 94.5 เคลวินและมีค่าอุณหภูมิวิกฤต offset เท่ากับ 84.1 เคลวิน ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.001 Fe มีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดโดยมีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 94.5 เคลวินและมี ้ค่าอุณหภูมิวิกฤต offset เท่ากับ 84.1 เคลวิน ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.005 Fe มีค่าอุณหภูมิวิกฤต ต่ำสุดโดยมีค่าอุณหภูมิวิกฤต onset เท่ากับ 89.9 เคลวินและมีค่าอุณหภูมิวิกฤต offset เท่ากับ 81.7 ้เคลวินในตัวนำประเภท Y156 นี้มีตัวนำยวดยิ่งตัวอย่างที่ไม่สามารถพิจารณาค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ เกิดขึ้นได้แก่ ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.01 Fe

การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย การศึกษาลักษณะ พื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งที่เจือด้วย Fe₂O₃ พบว่า ตัวนำยวดยิ่งประเภท Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ มีขนาดของเกรนประมาณ 3 ถึง 6 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กลงเมื่อเทียบกับตัวนำยวดยิ่งประเภท เดียวกันที่ไม่ได้เจือสารใด ๆ ลงไป ขนาดของเกรนที่สังเกตได้ในตัวนำยวดยิ่งทั้ง 2 ประเภทเมื่อ พิจารณาจากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่าแต่ละตัวอย่างมีขนาดใกล้เคียงกัน มีรูพรุน เกิดขึ้นตามบริเวณขอบเกรนและสามารถเห็นลักษณะของเกรนได้ 2 รูปแบบคือ ลักษณะเป็นรูปแผ่น และลักษณะเป็นรูปแท่งกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว การศึกษาองค์ประกอบธาตุของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ โดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์สเปกโตสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) พบว่าตัวอย่างตัวนำยวดยิ่งที่ทำการวิเคราะห์มีองค์ประกอบเป็นธาตุชนิดเดียวกับสารตั้งต้นที่ใช้ใน กระบวนการเตรียม แต่ตัวอย่างตัวนำยวดยิ่งทั้ง 2 ประเภทมีอัตราส่วนของธาตุคลาดเคลื่อนและไม่ เท่ากับอัตราส่วนตามสูตรที่ในกระบวนการเตรียมสารตั้งต้นซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงความไม่กระจาย ตัวของธาตุที่เกิดขึ้นภายในตัวนำยวดยิ่ง

การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ โดยวิธีการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า รูปแบบเส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการวิเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งแต่ละประเภท มีลักษณะใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่งที่ไม่ได้เจือสารใดลงไปและพบรูปแบบกลุ่มปริภูมิของสารนำยวดยิ่ง ที่มีโครงสร้างแบบออโทรอมบิกเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบการเกิดรูปแบบปริภูมิของสารอื่นประกอบไป ด้วย กลุ่มของ CuFe₂O₄ รูปแบบกลุ่มปริภูมิมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล กลุ่มของ Ba₂Cu₃O₆ รูปแบบกลุ่มปริภูมิแบบมีโครงสร้างแบบ ออโทรอมบิกและกลุ่มของ BaCuO₂ รูปแบบกลุ่มปริภูมิ มี โครงสร้างแบบคิวบิก ในตัวนำยวดยิ่งประเภท Y123 และ Y156 มีค่าหน่วยเซลล์แกน a และ b ที่ ใกล้เคียงกัน ค่าหน่วยเซลล์แกน c ของตัวนำยวดยิ่งประเภท Y123 จะมีค่าน้อยกว่าประเภท Y156 แต่เมื่อเปรียบเทียบกันภายในตัวนำยวดยิ่งประเภทเดียวกันแต่ละตัวอย่างนั้นจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

อภิปรายผลการวิจัย

วิธีปฏิกิริยาสถานะของของแข็งเป็นหนึ่งในกระบวนการที่นักวิจัยนำมาใช้เพื่อทำการ สังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง โดยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ด้วย กระบวนการนี้มีปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำให้สารที่สังเคราะห์เกิดสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่งคือ อุณหภูมิ ที่ใช้ในการให้ความร้อนซึ่งมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นผลของการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูงที่แตกต่าง กันซึ่งส่งผลต่อสมบัติของตัวนำยวดยิ่ง (ปิยะมาศ ไชยนอก, 2557, pp. 80-83) ทางผู้วิจัยเห็นว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อยู่ในช่วงประมาณ 800-950 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การอัด ขึ้นรูปซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการสังเคราะห์ ความดันที่ใช้ในขั้นตอนนี้ถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควร นำมาพิจารณาเนื่องจากการให้ความดันมีผลต่อปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวนำยวด ยิ่งที่ส่งผลต่อสภาพนำยวดยิ่ง (Liu et al., 2005) และการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งแต่การวิจัยนั้นจะมี ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของบริบทในการศึกษา การลดลงของอุณหภูมิวิกฤตที่พบในตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ

Fe₂O₃ ลงไป โดยทำการวิเคราะห์จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็ม วัด 4 ขั้วมีความสอดคล้องกับการวิจัยของหลิว (Liu et al., 2005) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำ ยวดยิ่งมีการลดลงของอุณหภูมิวิกฤตเข้าใกล้ศูนย์เคลวินตามปริมาณสัดส่วนของอนุภาคของเหล็กที่ เจือลงไป และพบว่าในการวิจัยตัวนำยวดยิ่งชนิดเดียวกันในลักษณะการสังเคราะห์เป็นแบบแผ่นฟิล์ม ที่ใช้เหล็กเป็นสารเจือก็ทำให้อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่งประเภทอิตเตรียมลดลง (Zhang et al., 2014) นอกจากนี้ในการวิจัยที่ศึกษาผลของปริมาณโลหะทรานซิชั่นชนิดอื่น เช่น Cr Co และ Mn ที่ เจือลงไปในตัวนำยวดยิ่งประเภทอิตเตรียมพบว่าสามารถวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตได้ในช่วงต่ำกว่า

77 เคลวิน (Salama et al., 2016) สอดคล้องกับแนวโน้มของค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ลดลงของตัวนำยวด ยิ่งในการวิจัยทั้ง 2 ประเภท และการไม่สามารถพิจารณาค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.01 Fe ได้ จากผลการวิจัยการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วตัวของนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ ที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้ทั้ง 2 ลักษณะคือ การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็ม ้วัด 4 ขั้วแบบเรียงและแบบแวนเดอร์พาวสามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่ไม่มีการเจือสารใด ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิวิกฤตได้เช่นเดียวกัน ส่วน ้ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ แต่ละสัดส่วนสามารถพิจารณาอุณหภูมิวิกฤตที่ เกิดขึ้นได้จากความต้านทานที่วัดจากเทคนิคการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์ พาว ความแตกต่างของวิธีการวัดทั้ง 2 ลักษณะ พิจารณาได้จากสมบัติของตัวนำยวดยิ่งที่มีการเจือ Fe₂O₃ ลงไป ตัวอย่างเหล่านี้จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวนำยวดยิ่ง ประเภท Y156 ซึ่งมีเฟสของสารที่มีสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่งน้อย (Sujinnapram, Udomsamuthirun, Kruaehong, Nilkamjon, & Ratreng, 2011) ร่วมกับบริบทของเครื่องมือขณะ ทำการวัด ความชื้น ประสิทธิภาพของฉนวนระหว่างขั้ววัด ทำให้มีโอกาสในการเกิดกระแสไฟฟ้า รั่วไหลซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการวัดด้วยเทคนิคการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็ม วัด 4 ขั้ว (Keithley, 2016) สอดคล้องกับการเกิดกระไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นในการวิจัยขณะทำการ วัดด้วยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบเรียง

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งที่พบในการวิจัย ตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือ Fe₂O₃ มีขนาดของเกรนเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวนำยวดยิ่งประเภทเดียวกันที่ไม่มี การเจือสารลงไป ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือรูปแบบแท่งและรูปแบบแผ่น แสดงให้เห็นถึงการเกิดเฟสใหม่สอดคล้องกับการวิจัยของพอล โจเซฟและคณะ (Paul Joseph, Venkateswaran, & Selva Vennila, 2010) ซึ่งอธิบายว่าการเกิดโครงสร้างของ Cu-Fe-O จะทำให้ เกิดเฟสใหม่คือ เฟสของ CuO ที่มีรูปร่างแบบแท่ง และเฟสของ CuFe₂O₄ ที่มีรูปร่างแบบแผ่น นอกจากนี้รูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวนำยวดยิ่งและผลการทดวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย เทคนิคเอกซ์เรย์สเปกโตสโกปีแบบกระจายพลังงานแสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสารซึ่ง สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของคอร์ไตกาและคณะ (Kortyka et al., 2010) ที่พบว่าสารประกอบ ในกลุ่มธาตุ Rare earth จะมีการกระจายตัวของธาตุแต่ละบริเวณไม่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลให้ผลการ วิเคราะห์สัดส่วนธาตุที่เป็นองค์ประกอบไม่เท่ากับสัดส่วนการเตรียมสารตั้งต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y156 ที่เจือด้วย Fe₂O₃ พบรูปแบบ ปริภูมิของสารที่มีรูปแบบโครงสร้างสอดคล้องกับงานวิจัยของชูและคณะ (Wu et al., 1987) ที่ สามารถสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งจากสารประกอบอิตเตรียมที่มีกลุ่มปริภูมิสารนำยวดยิ่งแบบ Pmmm หรือลักษณะโครงสร้างแบบออโทรอมบิก นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบรูปแบบกลุ่มปริภูมิอื่นที่มีลักษณะ โครงสร้างต่างกันซึ่งเป็นกลุ่มที่ไม่ใช่สารนำยวดยิ่งร่วมด้วยและผลของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ค่า หน่วยเซลล์ของแกน c และผลของการเจือ Fe₂O₃ ลงไปในตัวนำยวดยิ่งเมื่อพิจารณาในตัวนำยวดยิ่ง ประเภทเดียวกันค่าหน่วยเซลล์ของแกน c และ c/a นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการเจือ Fe₂O₃ ลงไปในตัวนำยวดยิ่งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยเซลล์ของแกน c

ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งในงานวิจัยนี้พบว่ามีหลายปัจจัยที่ ส่งผลต่อการ เตรียมตัวนำยวดยิ่งและสมบัติของตัวนำยวดยิ่งที่สังเคราะห์ได้ ตัวนำยวดยิ่งแต่ละประเภทต้องการ ปัจจัยที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ในการวิจัยต่อไปควรมีการศึกษาเปรียบเทียบปัจจัย อื่นที่ส่งผลต่อสมบัติการเป็นตัวนำยวดยิ่ง เช่น กระบวนการเตรียม การให้ความร้อน ความดัน และ การศึกษาในช่วงอุณหภูมิที่นอกเหนือจากช่วง 77 ถึง 120 เคลวินเพื่อพัฒนาสภาพนำยวดยิ่งและ สมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ ของตัวนำยวดยิ่งให้ดีขึ้นต่อไป



บรรณานุกรม

- Bednorz, J. G., & Müller, K. A. (1986). Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift fur Physik B Condensed Matter, 64*, 189-193.
 doi:10.1142/9789814293365_0011
- Goldstein, J., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., . . . Michael, J. R. (1981). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis* (3rd ed.). New York: Springer Science+Business Media.
- Gonsalves, S. H., Monteiro, J. F. H. L., Da Silva Leal, A. C., De Andrade, A. V. C., De Souza, G. B., Siqueira, E. C., . . . Jurelo, A. R. (2017). Fe-doping effect on the Bi₃Ni superconductor microstructure. *Materials Research, 20*(3), 601-606. doi:10.1590/1980-5373-MR-2016-0538
- Iwasa, Y., Bascuan, J., Seungyong Hahn, M., Tomita, M., & Weijun Yao, M. (2010). High-Temperature Superconducting Magnets for NMR and MRI: R&D Activities at the MIT Francis Bitter Magnet Laboratory. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 20*(3), 718-721. doi:10.1109/TASC.2010.2040073
- Jie, W., Chen-Fong, T., Zhenxing, B., Naugle, & Haiyan, W. (2009). Microstructural and Pinning Properties of YBa₂Cu₃O_{7-α} Thin Films Doped with magnetic Nanoparticles. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19*(3), 3503-3506. doi:10.1109/TASC.2009.2017846
- Kamihara, Y., Hiramatsu, H., Hirano, M., Kawamura, R., Yanagi, H., Kamiya, T., & Hosono, H. (2006). Iron-based layered superconductor: LaOFeP. *Journal of the American Chemical Society, 128*(31), 10012-10013. doi:10.1021/ja063355c
- Kamihara, Y., Watanabe, T., Hirano, M., & Hosono, H. (2008). Iron-based layered superconductor La[O_{1-x}F_x]FeAs (x = 0.05-0.12) with T_c = 26 K. *Journal of the American Chemical Society, 130*(11), 3296-3297. doi:10.1021/ja800073m
- Keithley, I. I. (2016). Resistivity Measurements of Semiconductor Materials Using the 4200A-SCS Parameter Analyzer and a Four-Point Collinear Probe. Retrieved from <u>http://www.tek.com/dl/1KW-60640-0_FourPointCollinear_4200A-SCS_AN.pdf</u>

Keithley Instruments Inc. (2011). Four-Probe Resistivity and Hall Voltage Measurements

with the Model 4200-SCS. Application Note Series, 2475, 1-8.

- Kittel, C. (1996). *Introduction to solid state physics* (7th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Kortyka, A., Puzniak, R., Wisniewski, A., Weber, H. W., Tang, C. Y., Yao, X., & Conder, K. (2010). Irreversibility line and anisotropy of SmBa2Cu3[formula omitted] with varying oxygen content. *Physica C: Superconductivity and its applications,* 470(1), S217-S218. doi:10.1016/j.physc.2009.10.150
- Liu, Y. H., Che, G. C., Li, K. Q., Zhao, Z. X., Kou, Z. Q., Di, N. L., & Cheng, Z. H. (2005). Superconductivity and mössbauer effect of Fe_xCu_{1-x}Ba₂YCu₂O_{7+y} superconductors synthesized by high pressure. *Physical Review B, 71*(10). doi:10.1103/PhysRevB.71.104503
- Metin, T., & Tepe, M. (2016). The Effect of Ag Doping on the Superconducting Properties of Y₃Ba₅Cu_{8-x}Ag_xO_{18-δ} Ceramics. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 30*, 1083-1087. doi:10.1007/s10948-016-3768-8
- Miccoli, I., Edler, F., Pfnür, H., & Tegenkamp, C. (2015). The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. *Journal of Physics*, *27*, 1-29. doi:10.15488/374
- Newbury, D. E. (1999). Standardless Quantitative Electron-Excited X-ray Microanalysis by Energy-Dispersive Spectrometry: What Is Its Proper Role? *Microscopy and Microanalysis, 4,* 585–597.
- Paul Joseph, D., Venkateswaran, C., & Selva Vennila, R. (2010). Critical Analysis on the Structural and Magnetic Properties of Bulk and Nanocrystalline Cu-Fe-O.
 Advances in Materials Science and Engineering, 2010(12, 2010).
 doi:10.1155/2010/715872
- Raymond, C. (1951). Application Of Electron Probe To Local Chemical And Crystalographic Analysis. University of Paris, Paris.
- Rodriguez-Carjaval, J. (2013). An introduction to the program FULLPROF2000. *Journal of Materials Chemistry*, 43-45.
- Sahoo, M., & Behera, D. (2014). Effect of Ti Doping on Structural and Superconducting Property of YBa₂Cu₃O_{7-y} High T_c Superconductor. *Journal of Superconductivity*

and Novel Magnetism, 27(1), 83-93. doi:10.1007/s10948-013-2269-2

- Salama, A. H., El-Hofy, M., Rammah, Y. S., & Elkhatib, M. (2016). The influence of magnetic nano metal oxides doping on structure and electrical properties of YBCO superconductor. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 7(1). doi:10.1088/2043-6262/7/1/015011
- Saxena, A. K. (2009). *High-Temperature Superconductors*: Springer Series in Materials Science.
- Sujinnapram, S., Udomsamuthirun, P., Kruaehong, T., Nilkamjon, T., & Ratreng, S. (2011). XRD spectra of new YBaCuO superconductors. *Bulletin of Materials Science, 34*(5), 1053-1057.
- Udomsamuthirun, P., Kruaehong, T., Nilkamjon, T., & Ratreng, S. (2010). The New Superconductors of YBaCuO Materials. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 23*(7), 1377-1380. doi:10.1007/s10948-010-0786-9
- Vanderah, T. A. (1990). *Chemistry of Superconductor Materials* (1st Ed.). New Jersey: NoYes Publications.
- Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., . . . Chu, C. W. (1987). Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letter, 58*, 908-910.
- Zhang, H., Zhao, Y., Wang, W., Pan, M., & Lei, M. (2014). Fe-doped epitaxial YBCO films prepared by chemical solution deposition. *Journal of Modern Transportation, 22*(1), 45-49. doi:10.1007/s40534-014-0034-2
- เกียรติพงษ์ ได้การ. (2555). X-ray Diffractometer XRD. Retrieved from <u>http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-</u>เครื่อง วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์-xrd.html

เจริญชัย เหลืองอ่อน. (2554). การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด. เทคโนโลยีวัสด*ุ, 62*, 74-79.

- ฐิติพงศ์ เครือหงส์. (2550). การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่ง Y-Ba-Cu-O. วารสาร วิทยาศาสตร์ มศว*, 23*(2), 15-27.
- ฐิติพงศ์ เครือหงส์. (2554). การเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของตัวนำยวดยิ่งใหม่กลุ่ม YBaCuO. (ปริญญานิพนธ์ ปร.ด. (ฟิสิกส์)), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.
- ฐิติพงศ์ เครือหงส์. (2556). หนึ่งศตวรรษของตัวนำยวดยิ่ง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 23(2), 525-542.

- รู้ติพงศ์ เครือหงส์, ธัญนพ นิลกำจร, เสริมสุข รัดเร่ง, ณัฐพงศ์ แถมยิ้ม, ปิยะพงษ์ ธรรมบำรุง, ศุภวัฒน์ ด้วงรอด, & พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ. (2552). การสร้างแบบจำลองรถไฟฟ้า Maglev. วารสาร วิทยาศาสตร์ มศว*, 25*(2), 91-100.
- ดนัย กิจชัยนุกูล. (2547). เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. Retrieved from <u>www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf</u>
- บวรกิตติ์ พันธ์เสถียร. (2557). กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือ วิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, p. 4.
- ปียะมาศ ไชยนอก. (2557). สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง YBa₂Cu₃O_{y-x}F_x และ YBa₃Cu₄O_{y-x}F_x (ปริญญานิพนธ์ ปร.ด. (ฟิสิกส์)), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิ โรฒ, กรุงเทพฯ.
- พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ. (2559). ตัวนำยวดยิ่งพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- พรนิภา ขาวสมบูรณ์. (2558). เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์. จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, p. 6.
- ลดาวดี มะรุมดี, & วิมลวรรณ โพธิ์น่วม. (2557). การออกแบบและสร้างระบบวัดกึ่งอัตโนมัติเพื่อใช้วัด สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนาด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์และปรากฏการณ์ฮอลล์. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมพร ศรีอาภานนท์. (2555). การเตรียมและสมบัติพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม YBaCuO. วารสาร วิทยาศาสตร์บูรพา, *17*(2), 109-115.





1. ลักษณะของชุดเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

ภาพประกอบ 1

2. ลักษณะการวัดและจัดเก็บข้อมูล



3. อุปกรณ์อื่น ๆ



ภาพประกอบ 3

อุณหภูมิ		ความต่าง	งศักย์ (V)			กระแสไข	ฟฟ้า (A)	
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I ₁	l ₂	I ₃	I ₄
77	0.000014	0.000006	0.000018	0.000004	0.101051	0.100592	0.100544	0.076467
78	0.000014	0.000008	0.000019	0.000002	0.101105	0.099844	0.100318	0.101715
79	0.000011	0.000008	0.000017	0.000002	0.101087	0.099799	0.100351	0.100819
80	0.000013	0.000007	0.000017	0.000002	0.101196	0.099808	0.100297	0.101365
81	0.00001	0.000008	0.000017	0.000001	0.10122	0.09972	0.100354	0.101452
82	0.000011	0.000009	0.000018	0.000001	0.101211	0.099663	0.100411	0.101437
83	0.000008	0.000007	0.000018	0.000001	0.101169	0.100695	0.100339	0.101404
84	0.00001	0.000009	0.000018	0.000002	0.101268	0.100659	0.1003	0.101359
85	0.000009	0.000008	0.00002	0.000002	0.101117	0.100381	0.099935	0.101295
86	0.000007	0.000008	0.000019	0.000001	0.101027	0.100487	0.099856	0.101413
87	0.000008	0.000009	0.000017	0.000001	0.100586	0.100448	0.099597	0.101464
88	0.000006	0.000009	0.000018	0	0.100294	0.099678	0.100242	0.101679
89	0.000007	0.000009	0.000017	-0.000005	0.100022	0.099398	0.099633	0.102324
90	0.000015	0.000005	0.000036	-0.000066	0.099796	0.099029	0.098411	0.103254
91	0.000062	-0.000028	0.000126	-0.000238	0.099591	0.098894	0.100294	0.104207
92	0.000163	-0.000134	0.000225	-0.000248	0.09941	0.09883	0.100001	0.101018
93	0.000232	-0.000233	0.000331	-0.000253	0.099343	0.098749	0.099962	0.101851
94	0.000383	-0.000318	0.00044	-0.000256	0.099274	0.098707	0.099775	0.102225
95	0.000478	-0.00041	0.000575	-0.000255	0.099229	0.098619	0.099651	0.101166
96	0.000523	-0.000507	0.000669	-0.000254	0.099271	0.098652	0.099603	0.101329
97	0.000536	-0.000525	0.000691	-0.000254	0.09925	0.098616	0.099573	0.101359
98	0.000542	-0.000532	0.0007	-0.000256	0.099232	0.098625	0.099467	0.101467
99	0.000547	-0.000533	0.000704	-0.000255	0.099265	0.098577	0.099443	0.101676
100	0.000551	-0.000537	0.000708	-0.000255	0.099398	0.098646	0.099325	0.101573
101	0.000553	-0.000539	0.000713	-0.000256	0.09934	0.098556	0.099283	0.101727
102	0.000555	-0.000552	0.000713	-0.000258	0.099358	0.100378	0.099177	0.102044
103	0.000558	-0.000554	0.000716	-0.000256	0.09941	0.100324	0.099147	0.102167
104	0.00056	-0.000554	0.000718	-0.000258	0.099331	0.100267	0.09902	0.102291

4. ปริมาณทางฟิสิกส์ที่ได้จากการวัดความต้านโดยวิธีเข็มวัด 4 ขั้วแบบแวนเดอร์พาวของ

1) ตัวนำยวดยิ่ง Y123

105	0.000561	-0.000556	0.000718	-0.000255	0.099382	0.100267	0.098903	0.10151
106	0.000564	-0.000559	0.000719	-0.000256	0.099367	0.100297	0.098767	0.101507
107	0.00057	-0.000559	0.00072	-0.00026	0.100085	0.100306	0.098743	0.101866
108	0.000572	-0.000559	0.000723	-0.000261	0.100146	0.10026	0.098761	0.101848
109	0.000572	-0.000562	0.000723	-0.00026	0.100073	0.100209	0.098692	0.102219
110	0.000574	-0.000562	0.000726	-0.00026	0.10011	0.100236	0.098523	0.102176
111	0.000575	-0.000563	0.000727	-0.000263	0.100116	0.100288	0.098574	0.102363
112	0.000575	-0.000565	0.000727	-0.000264	0.100116	0.100212	0.098396	0.102557
113	0.000577	-0.000565	0.000727	-0.000263	0.10014	0.100173	0.098302	0.102692
114	0.000578	-0.000567	0.000726	-0.000266	0.100137	0.1002	0.098182	0.100079
115	0.000579	-0.000568	0.000728	-0.000253	0.100049	0.100194	0.098191	0.09972
116	0.000581	-0.000569	0.000731	-0.000248	0.100155	0.100209	0.098188	0.098363
117	0.000581	-0.000567	0.000729	-0.000255	0.100131	0.09992	0.098094	0.10033
118	0.000581	-0.000569	0.00073	-0.000253	0.100131	0.100013	0.098109	0.100333
119	0.000585	-0.000571	0.000732	-0.000254	0.100034	0.10033	0.098016	0.100487
120	0.000582	-0.000571	0.000732	-0.000255	0.100064	0.100339	0.098031	0.100737
2) ຕັວ	มนำยวดยิ่ง Y1	123 + 0.001	Fe		1 B			

อุณหภูมิ		ความต่าง	งศักย์ (V)		~ .	กระแสไข	ฟฟ้า (A)	
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
77	-0.00001	-0.000006	-0.000002	0.000001	0.101817	0.099126	0.100761	0.102707
78	-0.000008	-0.000006	-0.000003	0.000002	0.102029	0.098861	0.100098	0.102816
79	-0.000006	-0.000005	-0.000002	0.000002	0.100927	0.099096	0.100221	0.102783
80	-0.000009	-0.000006	-0.000003	0.000001	0.101169	0.099431	0.099751	0.102786
81	-0.000006	-0.000005	-0.000002	0.000004	0.100454	0.100098	0.100309	0.102783
82	-0.000006	-0.000005	-0.000003	0	0.100852	0.102744	0.100442	0.102849
83	-0.000006	-0.000007	-0.000003	0.000001	0.100245	0.104412	0.100544	0.102919
84	-0.000005	-0.000004	-0.000003	0.000003	0.100411	0.104795	0.100245	0.102967
85	-0.00001	-0.000005	-0.000003	0.000004	0.100442	0.103124	0.10001	0.102566
86	-0.000006	-0.000007	-0.000002	0.000003	0.100215	0.09998	0.099654	0.103154
87	-0.000006	-0.000007	-0.000003	0.000003	0.098553	0.100327	0.099054	0.10341
88	-0.000008	-0.000006	-0.000004	0.000004	0.100484	0.100218	0.098224	0.103232
89	-0.000006	-0.000008	-0.000003	0.000003	0.101187	0.100749	0.097883	0.102964

90	-0.000007	-0.000006	-0.000003	0.000003	0.101501	0.098248	0.097542	0.102394
91	-0.000007	-0.000007	-0.000003	0.000003	0.101464	0.096691	0.097092	0.101597
92	-0.000007	-0.000009	-0.000002	0.000001	0.094205	0.097108	0.09654	0.101193
93	-0.000008	-0.000022	0.000012	-0.000001	0.090198	0.098507	0.096055	0.100954
94	-0.000008	-0.000046	0.000031	-0.000012	0.086831	0.096827	0.095499	0.100825
95	0.000003	-0.00006	0.000046	-0.00003	0.08872	0.089109	0.094516	0.100849
96	0.000014	-0.000072	0.000059	-0.000046	0.089052	0.09069	0.093843	0.100858
97	0.000033	-0.000098	0.000067	-0.000054	0.090065	0.098942	0.093273	0.100819
98	0.000043	-0.000107	0.00009	-0.000078	0.090029	0.093116	0.092618	0.101036
99	0.000067	-0.000116	0.000095	-0.000089	0.09107	0.096097	0.092099	0.101063
100	0.000078	-0.000123	0.000098	-0.000095	0.091529	0.101561	0.091652	0.101166
101	0.000082	-0.000126	0.000098	-0.000094	0.088982	0.095855	0.090977	0.101359
102	0.000079	-0.000126	0.000097	-0.000099	0.086584	0.099645	0.090391	0.101353
103	0.000078	-0.000125	0.0001	-0.000098	0.085135	0.102689	0.087338	0.101407
104	0.000075	-0.000127	0.0001	-0.000097	0.080589	0.1043	0.084309	0.101437
105	0.00008	-0.000123	0.0001	-0.0001	0.084749	0.101217	0.082924	0.101555
106	0.000077	-0.000125	0.000099	-0.0001	0.083729	0.088306	0.082758	0.101579
107	0.000077	-0.000125	0.0001	-0.0001	0.07898	0.090132	0.082372	0.101679
108	0.000077	-0.000125	0.0001	-0.0001	0.073664	0.096214	0.082058	0.101802
109	0.000077	-0.000125	0.0001	-0.000101	0.072273	0.099382	0.081741	0.101869
110	0.000078	-0.000125	0.0001	-0.000101	0.075447	0.09937	0.081114	0.101908
111	0.000078	-0.000125	0.0001	-0.000101	0.079689	0.099977	0.08038	0.10205
112	0.000078	-0.000125	0.0001	-0.000102	0.078111	0.099968	0.078823	0.102068
113	0.000077	-0.000125	0.0001	-0.0001	0.078784	0.100321	0.078392	0.10217
114	0.000077	-0.000125	0.0001	-0.000101	0.079195	0.100574	0.07812	0.102339
115	0.000077	-0.000125	0.0001	-0.000101	0.080383	0.100734	0.079361	0.102312
116	0.000078	-0.000125	0.0001	-0.000102	0.074793	0.100668	0.07962	0.102481
117	0.000072	-0.000125	0.0001	-0.000101	0.074817	0.103401	0.084948	0.102541
118	0.000072	-0.000124	0.000101	-0.000089	0.077058	0.104138	0.096658	0.102614
119	0.000072	-0.000124	0.0001	-0.000099	0.077363	0.104859	0.09597	0.102547
120	0.000072	-0.000124	0.0001	-0.000099	0.077273	0.105444	0.094124	0.102722

3) ตัวนำยวดยิ่ง Y123 + 0.003Fe

อุณหภูมิ	ความต่างศักย์ (V)				กระแสไฟฟ้า (A)			
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I ₁	l ₂	I ₃	I ₄
77	0	0	0	0	0.101344	0.100864	0.101344	0.101135
78	0	0	0.000002	0.000001	0.101377	0.101027	0.101878	0.100888
79	0	0	0.000001	0	0.101383	0.101048	0.10189	0.100855
80	0.000001	0	0.000001	0	0.101283	0.101063	0.101914	0.100891
81	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.101313	0.101093	0.101905	0.100837
82	0	0.000001	0	0.000003	0.101356	0.101048	0.101778	0.100801
83	0	0	0.000003	0.000003	0.101416	0.101012	0.101673	0.100939
84	0	0	0.000003	0.000003	0.101455	0.100903	0.101971	0.101163
85	0.000001	0.000001	0.000003	0.000003	0.101458	0.100876	0.102122	0.101069
86	0.000002	0	0.000005	0.000003	0.101368	0.100737	0.102074	0.101205
87	0.000001	0	0.000003	0.000003	0.101169	0.100472	0.102143	0.101289
88	0.000001	0.000001	0.000004	0.000003	0.100828	0.100143	0.102092	0.101289
89	0.000002	0.000001	0.000002	0.000003	0.100119	0.099702	0.102059	0.101196
90	0.00001	-0.000001	0.000004	0.000005	0.099642	0.098806	0.102022	0.101232
91	0.000023	-0.00001	0.000005	0.000002	0.099029	0.097964	0.101811	0.101138
92	0.00004	-0.000025	0.000023	0.000003	0.098432	0.097461	0.101522	0.101145
93	0.000047	-0.000047	0.000042	0.000004	0.097967	0.097071	0.101262	0.101075
94	0.000058	-0.000057	0.000058	0.000004	0.097756	0.096993	0.101196	0.100997
95	0.000073	-0.000072	0.000071	0.000004	0.097648	0.096957	0.10116	0.100867
96	0.000085	-0.000087	0.000086	0.000003	0.097623	0.096951	0.101138	0.100562
97	0.000096	-0.000105	0.000105	-2.1E-05	0.094796	0.098423	0.101126	0.100137
98	0.000106	-0.000115	0.00012	-3.7E-05	0.100224	0.100079	0.101169	0.099977
99	0.000109	-0.00012	0.000125	-6.1E-05	0.100146	0.100182	0.101184	0.099832
100	0.00011	-0.000118	0.000129	-8.8E-05	0.100203	0.100137	0.101283	0.099823
101	0.000107	-0.000122	0.00013	-0.00011	0.098182	0.100227	0.101407	0.099917
102	0.00011	-0.00012	0.000128	-0.00012	0.100297	0.100248	0.10147	0.099953
103	0.000111	-0.000121	0.000132	-0.00012	0.100399	0.100384	0.101651	0.100064
104	0.000111	-0.000124	0.000129	-0.00012	0.100496	0.100396	0.101697	0.100137
105	0.000111	-0.000122	0.000132	-0.00013	0.100478	0.100411	0.101703	0.100245
106	0.000111	-0.000122	0.000133	-0.00013	0.100487	0.100481	0.101947	0.100333

107	0.000111	-0.000123	0.000132	-0.00013	0.100559	0.100535	0.101941	0.100417		
108	0.000111	-0.000125	0.000131	-0.00013	0.100553	0.100638	0.10227	0.100523		
109	0.000111	-0.000125	0.000132	-0.00013	0.100671	0.100686	0.10233	0.100629		
110	0.000111	-0.000125	0.000132	-0.00013	0.100725	0.100795	0.10233	0.100653		
111	0.00011	-0.000124	0.000133	-0.00012	0.100825	0.100852	0.102484	0.100767		
112	0.000111	-0.000126	0.000134	-0.00013	0.100837	0.10093	0.102614	0.100834		
113	0.000111	-0.000126	0.000131	-0.00013	0.100704	0.101042	0.102647	0.100933		
114	0.00011	-0.000127	0.000132	-0.00013	0.100843	0.101102	0.102741	0.100973		
115	0.00011	-0.000127	0.000132	-0.00013	0.100957	0.101145	0.102879	0.101096		
116	0.00011	-0.000127	0.000133	-0.00013	0.10112	0.101096	0.102964	0.101154		
117	0.000112	-0.000128	0.000133	-0.00013	0.101172	0.101178	0.103027	0.101223		
118	0.00011	-0.000127	0.000133	-0.00013	0.10128	0.101286	0.103157	0.101277		
119	0.000111	-0.000126	0.000132	-0.00013	0.101313	0.101313	0.10319	0.101386		
120	0.000111	-0.000127	0.000131	-0.00013	0.10144	0.101335	0.103272	0.101443		
4) ตัวนำยวดยิ่ง Y123 + 0.005Fe										

อุณหภูมิ	ความต่างศักย์ (V) กร					กระแสไข	กระแสไฟฟ้า (A)		
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄		l ₂	₃	I ₄	
77	0.000027	-3.1E-05	0.000021	-2.7E-05	0.100997	0.102032	0.090334	0.100613	
78	0.000025	-3.1E-05	0.000025	-2.7E-05	0.101525	0.100061	0.100414	0.102068	
79	0.000026	-0.00003	0.000023	-2.7E-05	0.101298	0.10004	0.089613	0.102499	
80	0.000027	-3.3E-05	0.000021	-2.7E-05	0.101835	0.099986	0.086445	0.102593	
81	0.000026	-3.1E-05	0.000023	-2.8E-05	0.101476	0.09979	0.091818	0.102879	
82	0.000024	-3.1E-05	0.000025	-2.6E-05	0.101347	0.10014	0.095445	0.103576	
83	0.000027	-3.1E-05	0.000027	-2.6E-05	0.101576	0.10001	0.103754	0.103812	
84	0.000025	-3.1E-05	0.000027	-2.6E-05	0.101455	0.099802	0.101724	0.103196	
85	0.000027	-3.1E-05	0.000026	-2.6E-05	0.101181	0.102665	0.102297	0.103169	
86	0.000026	-3.2E-05	0.000026	-2.6E-05	0.100538	0.103166	0.102288	0.102653	
87	0.000028	-3.2E-05	0.000028	-2.7E-05	0.100788	0.103063	0.102137	0.102973	
88	0.000028	-3.3E-05	0.000027	-2.8E-05	0.100963	0.103139	0.102065	0.10326	
89	0.000025	-3.3E-05	0.000029	-2.7E-05	0.101519	0.103169	0.102019	0.103471	
90	0.000027	-3.4E-05	0.000028	-2.9E-05	0.101854	0.103202	0.101983	0.10351	
91	0.000028	-3.7E-05	0.000029	-3.9E-05	0.102216	0.103341	0.101938	0.103501	

92	0.000026	-4.3E-05	0.000031	-5.9E-05	0.102161	0.103272	0.10176	0.103374
93	0.000023	-6.1E-05	0.000036	-9.2E-05	0.102116	0.103211	0.101733	0.103332
94	0.00004	-9.5E-05	0.00004	-0.00011	0.101878	0.10306	0.101612	0.103275
95	0.000061	-0.00011	0.000051	-0.00013	0.101594	0.102946	0.101555	0.103232
96	0.000076	-0.00013	0.000078	-0.00016	0.101531	0.103027	0.101476	0.103422
97	0.000112	-0.00017	0.0001	-0.00017	0.10131	0.103193	0.101359	0.103419
98	0.000149	-0.00019	0.00012	-0.00018	0.101332	0.10335	0.10138	0.103591
99	0.00016	-0.0002	0.000162	-0.00019	0.101344	0.103341	0.101461	0.103923
100	0.00017	-0.0002	0.000169	-0.00019	0.101368	0.103492	0.101494	0.104177
101	0.000171	-0.0002	0.000177	-0.00019	0.10147	0.103537	0.101606	0.10443
102	0.000172	-0.0002	0.000177	-0.00019	0.10157	0.103582	0.101682	0.104868
103	0.000172	-0.0002	0.000178	-0.00019	0.101715	0.103643	0.101808	0.104967
104	0.000172	-0.0002	0.000178	-0.00019	0.101772	0.103588	0.101872	0.105305
105	0.000173	-0.0002	0.000178	-0.00019	0.101974	0.103579	0.102035	0.105411
106	0.00017	-0.0002	0.000177	-0.00019	0.10205	0.103555	0.102068	0.105541
107	0.000171	-0.0002	0.000177	-0.00019	0.102119	0.103534	0.102185	0.105625
108	0.000171	-0.0002	0.000177	-0.00019	0.102351	0.103576	0.102249	0.105854
109	0.000169	-0.0002	0.000177	-0.00019	0.102469	0.103552	0.102388	0.105954
110	0.000172	-0.0002	0.000177	-0.00019	0.102538	0.103591	0.102478	0.106174
111	0.000172	-0.0002	0.000176	-0.00019	0.102656	0.103646	0.102544	0.106265
112	0.00017	-0.0002	0.000176	-0.00019	0.102843	0.103676	0.102644	0.106343
113	0.000171	-0.0002	0.000176	-0.00019	0.102879	0.103809	0.102774	0.10653
114	0.00017	-0.0002	0.000176	-0.00019	0.103057	0.103872	0.102891	0.10656
115	0.000169	-0.0002	0.000174	-0.00019	0.103109	0.104005	0.102952	0.106693
116	0.000169	-0.0002	0.000174	-0.00019	0.103157	0.104068	0.102976	0.106753
117	0.000168	-0.0002	0.000173	-0.00019	0.103254	0.104198	0.103097	0.106889
118	0.000169	-0.0002	0.000173	-0.00019	0.103314	0.104264	0.103115	0.106974
119	0.00017	-0.0002	0.000173	-0.00019	0.103371	0.104388	0.103229	0.107076
120	0.000169	-0.0002	0.000173	-0.00019	0.103477	0.104424	0.103317	0.107212

5) ตัวนำยวดยิ่ง Y123 + 0.010Fe

อุณหภูมิ		ความต่าง	งศักย์ (V)		กระแสไฟฟ้า (A)			
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I_1	I ₂	I ₃	I ₄
77	0.000066	-4.9E-05	0.000078	-6.3E-05	0.101811	0.100728	0.110486	0.10049
78	0.000069	-4.8E-05	0.000077	-6.2E-05	0.102089	0.100586	0.112492	0.100399
79	0.000069	-4.8E-05	0.000077	-6.2E-05	0.102071	0.100613	0.112438	0.100405
80	0.000067	-4.8E-05	0.000078	-6.2E-05	0.101968	0.100686	0.112405	0.100432
81	0.000068	-4.7E-05	0.000071	-6.4E-05	0.101998	0.100595	0.101169	0.100417
82	0.000068	-4.7E-05	0.00007	-0.00006	0.101977	0.100677	0.101063	0.100478
83	0.000068	-0.00005	0.000072	-5.9E-05	0.10192	0.100607	0.100997	0.100306
84	0.000068	-4.9E-05	0.000071	-5.2E-05	0.101908	0.100469	0.097696	0.100242
85	0.000069	-4.8E-05	0.000072	-5.9E-05	0.102104	0.100414	0.101727	0.100632
86	0.000068	-4.9E-05	0.000085	-9.7E-05	0.101974	0.100647	0.100801	0.101015
87	0.000071	-4.9E-05	0.000105	-0.00012	0.10179	0.100568	0.098158	0.101193
88	0.000074	-4.4E-05	0.000143	-0.00014	0.101748	0.10081	0.099527	0.101301
89	0.000076	-7.7E-05	0.00018	-0.00016	0.101606	0.100807	0.102237	0.101416
90	0.000078	-0.00012	0.000191	-0.00016	0.10166	0.100647	0.100662	0.101504
91	0.000078	-0.00013	0.000193	-0.00016	0.101694	0.100469	0.102891	0.101669
92	0.000088	-0.00014	0.000202	-0.00016	0.101772	0.100122	0.105821	0.101748
93	0.000105	-0.00014	0.000206	-0.00016	0.101914	0.099823	0.106678	0.101835
94	0.000128	-0.00014	0.000208	-0.00016	0.101917	0.099657	0.10691	0.102016
95	0.000147	-0.00014	0.000208	-0.00016	0.102083	0.099413	0.10637	0.102013
96	0.000167	-0.00013	0.000206	-0.00017	0.102201	0.098704	0.105453	0.102137
97	0.000173	-0.00013	0.000202	-0.00016	0.102282	0.097732	0.104331	0.102152
98	0.000173	-0.00013	0.000199	-0.00016	0.102406	0.097964	0.102369	0.102237
99	0.000174	-0.00013	0.00019	-0.00016	0.102472	0.097711	0.109122	0.102038
100	0.000176	-0.00013	0.000201	-0.00017	0.102584	0.097503	0.103797	0.102026
101	0.000175	-0.00012	0.0002	-0.00017	0.102656	0.095158	0.106035	0.101835
102	0.000175	-0.00012	0.000205	-0.00016	0.102735	0.096525	0.096761	0.101615
103	0.000175	-0.00013	0.000194	-0.00017	0.102819	0.100918	0.099772	0.101461
104	0.000174	-0.00013	0.000196	-0.00016	0.102928	0.101866	0.101166	0.101232
105	0.000174	-0.00013	0.000197	-0.00016	0.102952	0.102216	0.101712	0.101141
106	0.000173	-0.00013	0.000196	-0.00016	0.1031	0.102351	0.101902	0.101111

107	0.000175	-0.00013	0.000197	-0.00016	0.103178	0.102668	0.10166	0.101021		
108	0.000172	-0.00013	0.000197	-0.00016	0.103187	0.102882	0.10182	0.101066		
109	0.000171	-0.00013	0.000195	-0.00016	0.103079	0.10157	0.101247	0.101084		
110	0.000171	-0.00013	0.000195	-0.00016	0.10325	0.101525	0.100309	0.100973		
111	0.000171	-0.00013	0.000193	-0.00016	0.103217	0.101392	0.099105	0.100589		
112	0.000174	-0.00013	0.000189	-0.00016	0.103341	0.101235	0.097835	0.100523		
113	0.00017	-0.00013	0.000189	-0.00016	0.103395	0.100979	0.099938	0.100496		
114	0.000173	-0.00013	0.000194	-0.00016	0.103438	0.100773	0.101679	0.100505		
115	0.000169	-0.00013	0.000193	-0.00016	0.103546	0.100408	0.101313	0.10055		
116	0.000171	-0.00013	0.000193	-0.00016	0.103607	0.100505	0.101854	0.100626		
117	0.000169	-0.00013	0.000191	-0.00016	0.103643	0.100273	0.100505	0.100731		
118	0.000169	-0.00013	0.000191	-0.00016	0.103778	0.098824	0.101181	0.100689		
119	0.00017	-0.00012	0.00019	-0.00016	0.103957	0.097436	0.100936	0.100282		
120	0.00017	-0.00012	0.00019	-0.00016	0.104222	0.095997	0.099036	0.100185		
6) ຫັວ	6) ตัวนำยวดยิ่ง Y156									

อุณหภูมิ	ความต่างศักย์ (V)			กระแสไฟฟ้า (A)				
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
77	0.004931	-0.00684	0.004986	-0.00467	0.102532	0.101851	0.101063	0.100559
78	0.004955	-0.00671	0.004957	-0.00476	0.103033	0.100906	0.100438	0.100791
79	0.004961	-0.00669	0.004927	-0.00477	0.103054	0.100725	0.09963	0.100843
80	0.004966	-0.0067	0.004935	-0.00478	0.103015	0.100662	0.099775	0.100939
81	0.004965	-0.0067	0.004966	-0.00479	0.102976	0.100713	0.100354	0.101099
82	0.004967	-0.00672	0.004976	-0.00481	0.102922	0.101039	0.100448	0.101316
83	0.004963	-0.00671	0.004995	-0.00482	0.102837	0.101003	0.100583	0.101431
84	0.004964	-0.00672	0.004959	-0.00478	0.102698	0.101054	0.099772	0.100659
85	0.005006	-0.00663	0.004953	-0.0048	0.103275	0.099292	0.098981	0.09995
86	0.005035	-0.00671	0.005009	-0.00485	0.103432	0.098592	0.098803	0.099657
87	0.005011	-0.00682	0.005056	-0.00499	0.102339	0.098248	0.09861	0.098873
88	0.005071	-0.00695	0.005232	-0.00524	0.10173	0.097738	0.097847	0.098079
89	0.005169	-0.00724	0.005719	-0.00608	0.10135	0.097216	0.096486	0.096091
90	0.005279	-0.00781	0.006759	-0.00761	0.101244	0.096477	0.094968	0.094256
91	0.005415	-0.01004	0.00832	-0.00964	0.101021	0.094727	0.09358	0.092718

92	0.005579	-0.01234	0.010755	-0.01239	0.100734	0.093508	0.092126	0.09149
93	0.005911	-0.01456	0.014006	-0.01513	0.100288	0.092615	0.091025	0.090765
94	0.007122	-0.01545	0.015369	-0.01587	0.098779	0.092461	0.090699	0.090678
95	0.008243	-0.01623	0.016612	-0.01642	0.097868	0.092491	0.090222	0.090744
96	0.011117	-0.01633	0.016761	-0.01644	0.096323	0.092576	0.090367	0.09082
97	0.012381	-0.01634	0.016735	-0.0164	0.096172	0.092675	0.090566	0.09094
98	0.012984	-0.01635	0.016703	-0.01636	0.096148	0.092805	0.090587	0.091121
99	0.013091	-0.01635	0.016653	-0.01633	0.096257	0.092938	0.090871	0.091167
100	0.013111	-0.01636	0.016568	-0.01626	0.096477	0.093092	0.091022	0.091312
101	0.013117	-0.01636	0.016515	-0.01619	0.096555	0.093203	0.091275	0.09152
102	0.013122	-0.01637	0.01647	-0.01612	0.096673	0.093387	0.091306	0.091743
103	0.013126	-0.01638	0.016389	-0.01604	0.096863	0.093502	0.091508	0.091864
104	0.013126	-0.0164	0.016304	-0.016	0.096978	0.093677	0.091749	0.091936
105	0.013134	-0.01641	0.016268	-0.01593	0.097105	0.093822	0.091915	0.092048
106	0.013159	-0.01644	0.016181	-0.01588	0.097313	0.09406	0.092051	0.092193
107	0.013177	-0.01643	0.016104	-0.01581	0.097458	0.09409	0.092232	0.092407
108	0.013198	-0.01645	0.016065	-0.01575	0.097557	0.094293	0.092383	0.092579
109	0.013206	-0.01646	0.015965	-0.01571	0.097681	0.094359	0.092527	0.092736
110	0.013247	-0.01643	0.015921	-0.01564	0.097801	0.094567	0.09253	0.09292
111	0.013281	-0.01643	0.015832	-0.01561	0.09791	0.094679	0.092754	0.093007
112	0.013316	-0.0163	0.015756	-0.01555	0.097976	0.094051	0.092962	0.093176
113	0.01335	-0.01627	0.015713	-0.01549	0.098091	0.094166	0.093068	0.09336
114	0.013442	-0.01626	0.015637	-0.01544	0.098336	0.094549	0.093288	0.093363
115	0.01349	-0.01627	0.015589	-0.01536	0.098429	0.094603	0.093348	0.093535
116	0.013555	-0.01625	0.015515	-0.01533	0.098514	0.094821	0.093517	0.09362
117	0.013701	-0.01623	0.015421	-0.01528	0.098806	0.094848	0.093668	0.093888
118	0.013775	-0.01616	0.015376	-0.01524	0.098909	0.095014	0.093665	0.093909
119	0.013857	-0.01613	0.015295	-0.01516	0.099045	0.095113	0.093765	0.093976
120	0.01393	-0.01609	0.015232	-0.01513	0.09912	0.095243	0.093798	0.094018
7) ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.001Fe

อุณหภูมิ	ความต่างศักย์ (V)				กระแสไฟฟ้า (A)			
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I ₁	₂	I ₃	I ₄
77	0.142239	-0.14002	0.123972	-0.12405	0.100816	0.100405	0.100882	0.10061
78	0.141518	-0.13986	0.125919	-0.12563	0.100508	0.100478	0.101534	0.101679
79	0.141412	-0.13988	0.12589	-0.12482	0.100448	0.100502	0.101473	0.100659
80	0.141232	-0.13934	0.125913	-0.12476	0.100315	0.100209	0.101446	0.100623
81	0.140968	-0.13929	0.124912	-0.12555	0.100085	0.100185	0.100707	0.101199
82	0.140174	-0.13888	0.125433	-0.12584	0.099742	0.099989	0.100939	0.101301
83	0.140209	-0.13896	0.126708	-0.12621	0.09972	0.10004	0.101778	0.101609
84	0.140146	-0.13864	0.126963	-0.12809	0.099726	0.099868	0.101908	0.103371
85	0.140535	-0.13865	0.129636	-0.12955	0.099956	0.099748	0.103785	0.102846
86	0.140969	-0.13415	0.130177	-0.13529	0.100055	0.09556	0.102463	0.099832
87	0.140786	-0.1345	0.139897	-0.14368	0.099895	0.093164	0.102795	0.102204
88	0.132095	-0.17165	0.149139	-0.14962	0.093137	0.103492	0.105257	0.104856
89	0.132942	-0.18414	0.145639	-0.1499	0.090421	0.103908	0.099235	0.099702
90	0.143988	-0.19487	0.154774	-0.15926	0.087256	0.104388	0.100324	0.101045
91	0.152136	-0.1986	0.165422	-0.17028	0.086967	0.100764	0.101434	0.100248
92	0.187214	-0.20696	0.17628	-0.18457	0.10163	0.10097	0.102101	0.100982
93	0.197752	-0.21664	0.191026	-0.19124	0.100798	0.101395	0.102526	0.101576
94	0.204754	-0.22491	0.200978	-0.20109	0.101268	0.102252	0.102593	0.103051
95	0.21864	-0.22808	0.207053	-0.20201	0.102291	0.103199	0.104237	0.104545
96	0.22471	-0.21806	0.203869	-0.20227	0.101105	0.099841	0.103854	0.105884
97	0.228113	-0.21761	0.195894	-0.18846	0.101522	0.100523	0.099895	0.093191
98	0.224815	-0.2178	0.195864	-0.18787	0.100912	0.101051	0.101413	0.099895
99	0.223305	-0.21775	0.193712	-0.18206	0.101235	0.102041	0.101271	0.097286
100	0.222708	-0.21927	0.191864	-0.18709	0.102246	0.103513	0.101455	0.101123
101	0.220781	-0.21722	0.190427	-0.18588	0.102783	0.103594	0.101739	0.10096
102	0.215533	-0.20782	0.186463	-0.18611	0.100623	0.099778	0.100888	0.102466
103	0.215411	-0.20802	0.186655	-0.18595	0.101199	0.101006	0.095324	0.102843
104	0.215339	-0.20825	0.202107	-0.1861	0.102508	0.101712	0.110277	0.103941
105	0.213012	-0.20837	0.189455	-0.18628	0.102065	0.102813	0.103622	0.104569
106	0.21274	-0.20844	0.187249	-0.17773	0.103172	0.103404	0.103709	0.100571

107	0.21266	-0.20193	0.179692	-0.17633	0.103534	0.10122	0.099557	0.100595
108	0.207812	-0.20157	0.180535	-0.17632	0.10198	0.101479	0.100942	0.100936
109	0.20759	-0.20061	0.181153	-0.17635	0.103362	0.102107	0.102535	0.101778
110	0.20785	-0.19938	0.181964	-0.1744	0.103935	0.10227	0.103594	0.101525
111	0.198132	-0.19848	0.177841	-0.17357	0.099778	0.103148	0.101851	0.101404
112	0.199041	-0.19768	0.178796	-0.17422	0.101488	0.103362	0.102831	0.10262
113	0.199224	-0.19576	0.179332	-0.17466	0.102219	0.103552	0.104204	0.103356
114	0.198867	-0.1899	0.178079	-0.17014	0.102822	0.100864	0.104732	0.101344
115	0.199292	-0.19	0.175033	-0.17274	0.103552	0.101307	0.104934	0.103591
116	0.199288	-0.19018	0.164212	-0.17311	0.104264	0.102517	0.097832	0.104346
117	0.189005	-0.19013	0.168305	-0.17385	0.100197	0.103085	0.100592	0.10567
118	0.188288	-0.18926	0.166897	-0.1645	0.100544	0.103869	0.100662	0.100152
119	0.188097	-0.18924	0.167352	-0.17061	0.101169	0.104491	0.101374	0.104343
120	0.188326	-0.185	0.170687	-0.16434	0.101639	0.10313	0.104062	0.101597
8) ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.003Fe								

8) ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.003Fe

อุณหภูมิ	ความต่างศักย์ (V)			5	กระแสไข	ฟฟ้า (A)		
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
77	0.242912	-0.24758	0.145888	-0.14594	0.100801	0.101199	0.100976	0.100629
78	0.240568	-0.24462	0.145795	-0.14687	0.100197	0.100324	0.100372	0.101018
79	0.240411	-0.24426	0.145845	-0.14739	0.100092	0.100073	0.100387	0.101365
80	0.239857	-0.24412	0.145887	-0.14768	0.099793	0.099947	0.100414	0.101437
81	0.24007	-0.24397	0.145932	-0.14782	0.099898	0.099974	0.100387	0.101576
82	0.241491	-0.24378	0.145903	-0.1484	0.100396	0.099817	0.100351	0.101832
83	0.241379	-0.2446	0.14596	-0.1484	0.100312	0.100037	0.100405	0.102016
84	0.241193	-0.24511	0.14616	-0.14687	0.100155	0.100119	0.100541	0.100414
85	0.242119	-0.24565	0.146087	-0.15137	0.100435	0.100245	0.100393	0.099796
86	0.234029	-0.24616	0.146532	-0.1643	0.095695	0.100369	0.100125	0.099935
87	0.237628	-0.2598	0.151365	-0.19444	0.084182	0.100508	0.100064	0.100082
88	0.293555	-0.30712	0.154032	-0.22147	0.101642	0.099343	0.099986	0.09991
89	0.294484	-0.36552	0.161649	-0.24105	0.102982	0.103042	0.09976	0.100885
90	0.290788	-0.41516	0.178891	-0.2638	0.101006	0.101724	0.09852	0.101739
91	0.303414	-0.45302	0.199919	-0.26906	0.100164	0.101959	0.101706	0.100994

92	0.425132	-0.45085	0.220809	-0.26828	0.100218	0.101516	0.101069	0.101199
93	0.439217	-0.45032	0.231352	-0.268	0.101099	0.103066	0.101316	0.101838
94	0.434833	-0.44113	0.246277	-0.26356	0.101703	0.101989	0.100822	0.101211
95	0.424469	-0.44056	0.253803	-0.26263	0.100725	0.102846	0.100288	0.101953
96	0.423097	-0.43254	0.260755	-0.25817	0.10182	0.101914	0.100906	0.101105
97	0.417644	-0.43201	0.263403	-0.25533	0.101407	0.102692	0.101636	0.100921
98	0.41719	-0.42816	0.262302	-0.25469	0.102137	0.102626	0.102406	0.101543
99	0.40846	-0.42043	0.261089	-0.25403	0.101181	0.101567	0.103169	0.101914
100	0.408063	-0.41995	0.260063	-0.25048	0.101814	0.102291	0.103923	0.101307
101	0.402199	-0.41944	0.25956	-0.25003	0.10138	0.102949	0.104285	0.101751
102	0.399866	-0.41152	0.248471	-0.24931	0.10135	0.101857	0.100752	0.102038
103	0.399384	-0.41099	0.247671	-0.24511	0.10211	0.102668	0.101316	0.100876
104	0.39101	-0.40572	0.246721	-0.24468	0.100665	0.10217	0.101932	0.101289
105	0.39108	-0.4009	0.245718	-0.24437	0.101129	0.101552	0.102469	0.101787
106	0.390665	-0.39992	0.245301	-0.2406	0.101857	0.102092	0.102816	0.100858
107	0.388591	-0.3925	0.24442	-0.24018	0.102201	0.101341	0.103432	0.101368
108	0.38138	-0.39227	0.2435	-0.23954	0.101166	0.10151	0.104089	0.10186
109	0.380896	-0.39168	0.234325	-0.23513	0.101947	0.102225	0.100604	0.100767
110	0.380663	-0.38519	0.233479	-0.23452	0.102315	0.101443	0.101123	0.101244
111	0.371936	-0.38492	0.232749	-0.23416	0.101114	0.10179	0.101742	0.101434
112	0.370456	-0.38094	0.232398	-0.23358	0.100819	0.101666	0.102095	0.102016
113	0.369886	-0.38044	0.227559	-0.23314	0.101642	0.102505	0.100843	0.102704
114	0.367117	-0.38018	0.226706	-0.22715	0.101805	0.102834	0.10138	0.100737
115	0.366851	-0.37298	0.226351	-0.22654	0.102228	0.101802	0.101627	0.101295
116	0.366265	-0.3727	0.225545	-0.22628	0.103012	0.102167	0.102152	0.101603
117	0.365948	-0.37219	0.224798	-0.22555	0.103425	0.102958	0.102725	0.102016
118	0.354846	-0.36755	0.224467	-0.22489	0.101151	0.102475	0.103103	0.102593
119	0.354312	-0.3646	0.223625	-0.22436	0.101869	0.102276	0.103646	0.102792
120	0.354034	-0.3629	0.217672	-0.22389	0.102264	0.102587	0.101727	0.103422

9) ตัวนำยวดยิ่ง Y156 + 0.005Fe

อุณหภูมิ	ความต่างศักย์ (V)				กระแสไฟฟ้า (A)			
(К)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
77	0.218667	-0.22257	0.192298	-0.19795	0.100982	0.100807	0.098112	0.100626
78	0.238493	-0.21156	0.185838	-0.20194	0.101446	0.101826	0.098254	0.100339
79	0.236119	-0.21753	0.192481	-0.20149	0.099769	0.100417	0.09715	0.100025
80	0.237211	-0.21801	0.201175	-0.20316	0.09979	0.100659	0.100918	0.100632
81	0.236386	-0.21841	0.199373	-0.2042	0.09931	0.100876	0.100254	0.100894
82	0.23865	-0.21995	0.199754	-0.20467	0.100345	0.101341	0.100791	0.101027
83	0.240776	-0.21912	0.199866	-0.21414	0.100577	0.100918	0.100553	0.104279
84	0.24259	-0.21944	0.204999	-0.21432	0.101289	0.100918	0.100948	0.100737
85	0.293464	-0.25308	0.215939	-0.24167	0.104147	0.103335	0.099895	0.099621
86	0.309397	-0.26945	0.249106	-0.25716	0.100903	0.101172	0.100644	0.103622
87	0.316325	-0.28911	0.261226	-0.26427	0.100897	0.101624	0.101597	0.101697
88	0.32541	-0.30299	0.27291	-0.27093	0.101956	0.1017	0.10303	0.102439
89	0.335059	-0.31599	0.279455	-0.28354	0.103419	0.103588	0.10179	0.103742
90	0.33685	-0.30968	0.293112	-0.30117	0.103281	0.099859	0.10284	0.105694
91	0.336419	-0.31113	0.300711	-0.29834	0.10475	0.100843	0.102451	0.10103
92	0.33458	-0.31031	0.302618	-0.3025	0.104892	0.101467	0.103012	0.101407
93	0.321223	-0.31125	0.304513	-0.3025	0.099862	0.102937	0.103917	0.102487
94	0.319467	-0.30928	0.295368	-0.30311	0.102309	0.103591	0.102152	0.103646
95	0.319384	-0.29932	0.294688	-0.30283	0.10351	0.101277	0.102792	0.105136
96	0.315829	-0.29917	0.294428	-0.28934	0.103063	0.102719	0.103923	0.100852
97	0.310673	-0.29527	0.290451	-0.28782	0.102001	0.101446	0.102861	0.101516
98	0.311056	-0.29309	0.284741	-0.28697	0.102563	0.101657	0.102928	0.102454
99	0.306483	-0.29382	0.282303	-0.28641	0.101419	0.102351	0.102336	0.103567
100	0.304563	-0.29315	0.279658	-0.28598	0.101211	0.102677	0.102973	0.104762
101	0.307712	-0.28976	0.278057	-0.28508	0.103057	0.101522	0.103839	0.105924
102	0.3074	-0.28033	0.274255	-0.28538	0.104451	0.099663	0.104569	0.107067
103	0.311966	-0.28062	0.267191	-0.27145	0.107191	0.100079	0.10256	0.10224
104	0.308465	-0.28001	0.265738	-0.27096	0.100405	0.100713	0.102584	0.102807
105	0.288901	-0.27973	0.266503	-0.27086	0.101012	0.101956	0.103326	0.103534
106	0.28971	-0.27888	0.26468	-0.26998	0.102366	0.103211	0.104834	0.104343

107	0.285971	-0.27843	0.262781	-0.27042	0.101878	0.103944	0.105052	0.105242
108	0.285465	-0.27145	0.255413	-0.27112	0.102451	0.10275	0.103042	0.106672
109	0.285494	-0.26769	0.256231	-0.27123	0.103371	0.102294	0.103628	0.107788
110	0.285793	-0.26635	0.257827	-0.27126	0.104252	0.102919	0.1043	0.108814
111	0.286822	-0.26613	0.257603	-0.25041	0.10599	0.103727	0.10529	0.101
112	0.286945	-0.2656	0.258712	-0.24909	0.106533	0.104319	0.10631	0.100798
113	0.287588	-0.25608	0.259071	-0.24864	0.107821	0.100647	0.106862	0.101338
114	0.26932	-0.261	0.243805	-0.24826	0.101718	0.10313	0.101226	0.102219
115	0.265654	-0.25808	0.24407	-0.24894	0.100592	0.103471	0.095744	0.102786
116	0.264329	-0.25318	0.26291	-0.24848	0.100677	0.101857	0.109402	0.10386
117	0.264806	-0.25306	0.209725	-0.24928	0.101504	0.102873	0.090032	0.10497
118	0.264758	-0.25372	0.234456	-0.23902	0.101968	0.103628	0.098046	0.101769
119	0.264738	-0.25556	0.213451	-0.23752	0.102849	0.105788	0.091782	0.102128
120	0.264452	-0.25589	0.277122	-0.2371	0.103269	0.106624	0.095659	0.102454



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวรายุทธ ·	นายวรายุทธ บุญโยประการ					
วัน เดือน ปี เกิด	3 สิงหาคม 25	535					
สถานที่เกิด	อำเภอมะขาม	จังหวัดจันทบุรี					
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย						
		โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี					
	พ.ศ. 2559	การศึกษาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์					
		มหาวิทยาลัยศรีนคริทรวิโรฒ					
	พ.ศ. 2561	การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์					
		มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ					
ที่อยู่ปัจจุบัน	42 หมู่ 5 ตำบลวังแซ้ม อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี 22150						

