



ระยะเจาะลึกยังผลและลักษณะเกรนของสารตัวนำยวดยิ่ง
ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย Ag_2O

โดย
นายพิพัฒน์ เชื้อเมืองพาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ระยะเจาะลึกยังผลและลักษณะเกรนของสารตัวนำยิ่งยวดยิ่ง
ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย Ag_2O

โดย
นายพิพัฒน์ เชื้อเมืองพาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**EFFECTIVE PENETRATION DEPTH AND GRANULAR SUPERCONDUCTORS
IN EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF YBCO SYSTEM WITH Ag₂O DOPANT**

By

Phiphat Chuamuangphan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Department of Physics

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2007

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ ระยะเวลาสีกยังผล
และลักษณะเกรนของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย Ag_2O ” เสนอโดย
นายพิพัฒน์ เชื้อเมืองพาน เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ชินะตั้งกูร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
รองศาสตราจารย์กำชัย ศรีชัยรัมย์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จำนงค์ ชำรงมาศ)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กำชัย ศรีชัยรัมย์)
...../...../.....

46306208 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : สารตัวนำยวดยิ่ง / ระยะเวลาลิกยังผล / เกรน / SEM / YBCO

ผู้พัฒนา เชื้อเมืองพาน : ระยะเวลาลิกยังผลและลักษณะเกรนของสารตัวนำยวดยิ่งใน
แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย Ag_2O . อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ. กำชัย ตรีชัย
รัศมี. 407 หน้า.

สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เตรียมได้จากปฏิกิริยาของแข็งของสารประกอบตั้งต้น Y_2O_3 , BaO , CuO และ Ag_2O ที่ผสมคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดี นำไปอัดเป็นเม็ดสารที่แรงกด 2 ตัน และเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังเผา พบว่า เม็ดสารมีสีดำปนเขียวแวววาว มวลและขนาดลดลง แสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ เนื้อสารมีลักษณะเป็นแผ่น ก้อนและแท่ง เคลือบด้วยเนื้อสารที่ หลอมเหลวและมีรูพรุน เกรนเกาะกลุ่มรวมกันแน่น มีขนาดปานกลางและเล็ก ค่าความเหนียวนำ ของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่งและระยะเวลาลิกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่ง พบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยมีค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$ อยู่ระหว่าง $121.508 - 140.390\text{ K}$, $114.973 - 131.002\text{ K}$ และ $115.777 - 131.290\text{ K}$ ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{zero})}$ อยู่ระหว่าง $97.177 - 131.894\text{ K}$, $97.077 - 123.109\text{ K}$ และ $100.957 - 108.617\text{ K}$ สำหรับ ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ มีค่ามากกว่า $T_{c(\text{mid})}$ แสดงให้เห็นถึงความ ไม่สมมาตรในการเปลี่ยนสถานะของสาร ค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอน α มีค่ามากกว่า 4 แสดงให้เห็นว่ามีสารเจือปนในเม็ดสารตัวนำยวดยิ่ง

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

46306208 : MAJOR : PHYSICS

KEYWORDS : SUPERCONDUCTORS / EFFECTIVE PENETRATION DEPTH / GRAIN
/ SEM / YBCO

PHIPHAT CHUAMUANGPHAN : EFFECTIVE PENETRATION DEPTH AND
GRANULAR SUPERCONDUCTORS IN EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF YBCO SYSTEM WITH
Ag₂O DOPANT. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.KAMCHAI TREECHAIRUSME. 407 pp.

The superconductors in equilibrium diagrams of YBCO system, undoped Ag₂O, (Ag₂O)_{0.1} and (Ag₂O)_{0.2} doped, were prepared by the solid-state reactions from starting amounts of high-purity Y₂O₃, BaO, CuO and Ag₂O powders. The materials were thoroughly mixed and pressed into pellets of 2 tons and sintered at 950 °C for 24 hours in the air. The sintered material pellets have been found that there were black-green samples. Also, the mass and size decreased and the Meissner effect was shown. The morphology of the samples are plate, bulk, rod (with melting part of material coated) and porosity. The grains in these samples are strongly linked small and medium size. The inductances of the copper wire solenoid that the samples serve as the core were measured and the effective penetration depths were calculated from ones. It was found that there are departures dependence on temperature, critical temperatures $T_{c(\text{onset})}$ between 121.508 – 140.390 K, 114.973 – 131.002 K and 115.777 – 131.290 K, critical temperatures $T_{c(\text{zero})}$ between 97.177 – 131.894 K, 97.077 – 123.109 K and 100.957 – 108.617 K for undoped Ag₂O, (Ag₂O)_{0.1} and (Ag₂O)_{0.2} doped, respectively. The critical temperatures are $T_{c(\text{inflect})}$ more than $T_{c(\text{mid})}$ which indicate that the transition phase of samples are asymmetric. The power of reduce-temperatures, α , more than 4 which indicate that impurities incorporate in the samples.

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2007

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์กำชัย ศรีชัยรัมย์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้คอยให้กำลังใจ กำกับ ติดตาม ดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือ ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เป็นอย่างดี ตลอดช่วงเวลาของการทำวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี ขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการถ่ายภาพ SEM ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ค
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมติฐานของการวิจัย	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการวิจัย	4
ข้อตกลงเบื้องต้น	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	5
2 ทฤษฎี	7
บทนำ.....	7
สมบัติของสารตัวนำวยวดยิ่ง	8
ชนิดของสารตัวนำวยวดยิ่ง	22
ทฤษฎีปรากฏการณ์นำวยวดยิ่ง	26
ตัวนำวยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูง	65
แผนภาพเฟสสมดุล.....	71
ขดลวดโซลินอยด์.....	80
โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ.....	88
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	93
วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	94
เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย	95
การเตรียมเม็ดสารตัวอย่าง	96

บทที่	หน้า
การทดลองเพื่อศึกษาค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบ สารตัวนำยวดยิ่งและระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่ง เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ.....	103
การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารตัวนำยวดยิ่ง ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO โดยการถ่ายภาพ SEM.....	108
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	110
สมบัติทางกายภาพของสารตัวนำยวดยิ่ง.....	110
สมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่ง.....	113
ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของสารตัวนำยวดยิ่ง.....	195
5 สรุปผลการทดลอง อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	238
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	238
ข้อเสนอแนะ.....	242
บรรณานุกรม.....	244
ภาคผนวก	246
ภาคผนวก ก กราฟผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	247
ภาคผนวก ข อุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำยวดยิ่ง YBCO.....	278
ภาคผนวก ค กราฟค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงแกนอากาศ อิฐและเหล็กกับอุณหภูมิ.....	282
ภาคผนวก ง วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือทดลอง	285
ภาคผนวก จ ข้อมูลผลการทดลอง.....	296
ประวัติผู้วิจัย	407

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำยวดยิ่งชนิดต่าง ๆ และปีที่ค้นพบ	65
3.1	แสดงสมบัติของสารตั้งต้น	94
3.2	แสดงมวลสารประกอบตั้งต้นในการเตรียมสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$	98
3.3	แสดงมวลสารประกอบตั้งต้นในการเตรียมสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z + (Ag_2O)_{0.1}$	98
3.4	แสดงมวลสารประกอบตั้งต้นในการเตรียมสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z + (Ag_2O)_{0.2}$	99
4.1	แสดงลักษณะสี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสารและ การทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของเมดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ	110
4.2	แสดงลักษณะสี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสารและ การทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของเมดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	111
4.3	แสดงลักษณะสี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสารและ การทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของเมดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	112
4.4	แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของ เมดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของ ระบบ YBCO ไม่เจือ	120
4.5	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวนำ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มากที่สุดและตัวแปรสมมาตรของเมดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ	121

ตารางที่		หน้า
4.6	แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$	130
4.7	แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$	131
4.8	แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$	144
4.9	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวนำ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด และตัวแปรอสมมาตรของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$	146
4.10	แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของ เม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของ ระบบ YBCO ไม่เจือ.....	154
4.11	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด และตัวแปรอสมมาตรของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ	155
4.12	แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของ เม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของ ระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$	164
4.13	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด และตัวแปรอสมมาตรของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$	165
4.14	แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของ เม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของ ระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$	178

ตารางที่	หน้า
4.15	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด และตัวแปรสมมาตรของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 180
4.16	แสดงเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอนและกำลังสองของสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ของเพียร์สันของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 193
4.17	แสดงเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอนและกำลังสองของสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ของเพียร์สันของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ 193
4.18	แสดงเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอนและกำลังสองของสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ของเพียร์สันของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 194
4.19	แสดงผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 202
4.20	แสดงผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ 214
4.21	แสดงผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 231
ข.1	แสดงค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ Ag_2O จากการวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง 279
ข.2	แสดงค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ จากการวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง 280

ตารางที่		หน้า
ข.3	แสดงค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ จากการวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง 281	281
จ.1	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 297	297
จ.2	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 300	300
จ.3	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 303	303
จ.4	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 305	305
จ.5	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 309	309
จ.6	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ 313	313

ตารางที่	หน้า
จ.21	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ 358
จ.22	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ 361
จ.23	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 15 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ 365
จ.24	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 18 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ 368
จ.25	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึก ยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ 372
จ.26	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6 และ 9 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม..... 376
จ.27	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 13 และ 14 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม..... 379
จ.28	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 5 และ 6 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม..... 383

ตารางที่	หน้า
จ.29	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 9 และ 10 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอกการิทึม..... 386
จ.30	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 และ 14 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอกการิทึม..... 390
จ.31	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 5 และ 6 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอกการิทึม..... 393
จ.32	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 9 และ 10 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอกการิทึม..... 396
จ.33	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 และ 14 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอกการิทึม..... 399
จ.34	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 15 และ 18 ใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอกการิทึม..... 403

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1(ก)	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงของ โลหะปกติบริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์	8
2.1(ข)	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าลดลงเป็นศูนย์ เมื่ออุณหภูมิลดลง จนถึงอุณหภูมิวิกฤตของปรอท ($T_c \sim 4.2\text{ K}$)	8
2.2(ก)	แสดงวงแหวนตัวนำยวดยิ่ง เมื่อ $T > T_c$ และมีสนามแม่เหล็กภายนอก พุ่งผ่านเข้าไปในวงแหวน	9
2.2(ข)	แสดงวงแหวนตัวนำยวดยิ่งหลังจากที่ลดอุณหภูมิลงจนกระทั่ง $T < T_c$ และเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งยังคงไหลวนต่อไปเรื่อย ๆ เป็นกระแสไฟฟ้ายืนยง.....	9
2.2(ค)	แสดงวงจรสมมูล RL.....	9
2.3	แสดงการทดลองของ Gouy	11
2.4(ก)	แสดงสนามแม่เหล็ก B_i ที่เกิดจากกระแสจลนภาพ I	12
2.4(ข)	แสดงสนามแม่เหล็กสุทธิที่เป็นผลมาจากตัวนำสมมูล	12
2.5	แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของตัวนำสมมูล	13
2.6	แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง.....	14
2.7	แสดงสภาพนำยวดยิ่งถูกทำลายด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต H_c	16
2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ ของสารตัวนำยวดยิ่ง.....	16
2.9	แสดงพลังงานอิสระกิบส์ต่อปริมาตรที่เกิดจากการไล่ความเข้ม สนามแม่เหล็กเข้าไปยังตัวนำยวดยิ่ง.....	18
2.10	แสดงเอนโทรปีของดิงกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในสถานะปกติ และสถานะนำยวดยิ่ง.....	19
2.11	แสดงความจุความร้อนจำเพาะของดิงกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ในสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง.....	20
2.12	แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่งบริสุทธิ์ชนิดที่หนึ่ง.....	23
2.13	แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่งไม่บริสุทธิ์ชนิดที่หนึ่ง	23

ภาพที่		หน้า
2.14	แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตเปลี่ยนตามอุณหภูมิของ สารตัวนำยวดยิ่ง	23
2.15	แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่งบริสุทธิ์ชนิดที่สอง	25
2.16	แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่งไม่บริสุทธิ์ชนิดที่สอง.....	25
2.17	แสดงสถานะผสมของสารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่สอง	26
2.18	แสดงระยะเจาะลึกของลอนดอน λ_L เกิดจากสนามแม่เหล็กเจาะลึก เข้าไปในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความหนาแน่นมาก ๆ	32
2.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเจาะลึกของลอนดอนกับอุณหภูมิ	33
2.20	แสดงสนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความหนาแน่นจำกัด 2a.....	34
2.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์กับ พารามิเตอร์ความเป็นระเบียบ.....	40
2.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์กับ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนนำยวดยิ่ง ($n_s = \psi ^2$)	41
2.23	แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน $\psi(x)$ ภายในสารตัวนำยวดยิ่ง	48
2.24	แสดงระยะเจาะลึกของโปรตอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เส้นทึบและเส้นประ สัมพันธ์กับเลขชี้กำลัง $\alpha = 4$, $\alpha = 3$ และ $\alpha = 6$ ตามลำดับ ในความสัมพันธ์ (2.91)	49
2.25	แสดงการแลกเปลี่ยนโฟนอนระหว่างอิเล็กตรอน 2 ตัว ในทฤษฎีสถาน	51
2.26(ก)	แสดงฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก $F(E)$ ที่ $T = 0\text{ K}$	53
2.26(ข)	แสดงความหนาแน่นของสถานะ $N(E)$ ที่ $T = 0\text{ K}$	53
2.27(ก)	แสดงทรงกลมเฟอร์มีรัศมี k_F	53
2.27(ข)	แสดงคู่อิเล็กตรอนที่มีโมเมนตัมและสปินทิศตรงข้ามกัน เพิ่มเข้ามาในทรงกลมเฟอร์มี ที่ $T = 0\text{ K}$	53
2.28	แสดงอันตรกิริยาดึงดูดระหว่างคู่อิเล็กตรอน - V_0 ในช่วง $\pm \hbar\omega_D$ รอบผิวเฟอร์มี	55
2.29	แสดงเขตทรงกลม 2 เขต มีรัศมี k_F และหนา Δk	56
2.30	แสดงช่องว่างพลังงาน $2\Delta(0)$ ของสารตัวนำยวดยิ่ง	58
2.31	แสดงฟังก์ชัน $ u_k ^2$ และ $ v_k ^2$	59

ภาพที่		หน้า
2.32	แสดงความหนาแน่นสถานะของอนุภาคกึ่งในสารตัวนำยวดยิ่ง ที่ได้จากทฤษฎี BCS.....	61
2.33	แสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารตัวนำยวดยิ่ง Vanadium, Indium และ Tin.....	62
2.34	แสดงกระแสทะลุผ่านอุโมงค์รอยต่อระหว่างสารตัวนำยวดยิ่งกับตัวนำปกติ (เส้นที่ 2) และรอยต่อระหว่างตัวนำปกติกับตัวนำปกติ (เส้นที่ 1)	63
2.35	แสดงการเปลี่ยนแปลงช่องว่างพลังงานตามอุณหภูมิของ In, Sn และ Pb ที่ได้จากการทดลองการทะลุผ่านอุโมงค์และทฤษฎี BCS.....	63
2.36	แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะเจาะลึกตามอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง และทฤษฎี BCS ของ Al, Cd และ Zn.....	64
2.37	แสดงการค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งชนิดต่าง ๆ และอุณหภูมิวิกฤต	66
2.38	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันและสภาพต้านทานไฟฟ้า กับอุณหภูมิในช่วง 50 – 150 K ของสาร $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	68
2.39	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างsusceptibility $\chi(T)$ กับอุณหภูมิ ของสารตัวอย่าง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ อยู่ในสนามแม่เหล็ก 0.1 mT	69
2.40	แสดงกราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งของsusceptibilityเทียบกับอุณหภูมิ ในรูป 2.39 และพิกัดที่ตำแหน่ง $T_c = 87.65 \pm 0.15 \text{ K}$ ความกว้าง $\Delta T = 0.95 \pm 0.15 \text{ K}$	69
2.41	แสดงกราฟอนุพันธ์อันดับสองของsusceptibilityเทียบกับอุณหภูมิ ในรูป 2.39 และความกว้างพีคถึงพีค $\Delta T_{pp} = 0.5 \text{ K}$	70
2.42	แสดงกราฟของสภาพต้านทาน ความจุความร้อนจำเพาะ แมกนีไทเซชัน และ susceptibility ของสารตัวอย่าง YBaCuO	71
2.43	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของน้ำบริสุทธิ์.....	73
2.44	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของเหล็กบริสุทธิ์.....	74
2.45	แสดงอัญรูปของเหล็กที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ....	74
2.46	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของทองแดง-นิกเกิล	75
2.47	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบสามตัวที่ประกอบด้วย โลหะบริสุทธิ์ A, B, C	76
2.48	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบ $\frac{1}{2}(\text{La}_2\text{O}_3) - \text{BaO} - \text{CuO}$	76

ภาพที่		หน้า
2.49	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบ $\frac{1}{2}(Y_2O_3) - BaO - CuO$ ที่อุณหภูมิ 950 °C	77
2.50	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบ $Bi_2O_3 - SrO - CaO - CuO$ เผาในอากาศที่อุณหภูมิ 850 °C	78
2.51	แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบสี่ตัวเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 850 °C	79
2.52	แสดงสนามแม่เหล็กที่จุด P เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ	80
2.53	แสดงทิศของสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา	81
2.54	แสดงสนามแม่เหล็กที่จุด P บนแกน z ห่างจากลวดวงกลมเป็นระยะ h	82
2.55(ก)	แสดงเส้นสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดวงกลม 1 รอบ	84
2.55(ข)	แสดงเส้นสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดโซลินอยด์	84
2.55(ค)	แสดงภาคตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์	84
2.56	แสดงเกรนและขอบของเกรน	88
2.57	แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของเกรน	89
2.58	แสดงเกรนและจำนวนขนาดของเกรน (G.S.#)	90
2.59	แสดงการเคลื่อนที่ของอะตอมและขอบของเกรน	91
2.60	แสดงเกรนขนาดเล็กหายไปและเกรนขนาดใหญ่มีขนาดใหญ่ขึ้น	91
2.61	แสดงการเติบโตของเกรนเมื่อเวลาผ่านไป	92
3.1	แสดงแผนภาพการดำเนินการวิจัย	93
3.2	แสดงสารตัวอย่างที่พันด้วยลวดทองแดง	95
3.3	แสดงการหาค่า x, y และ z	96
3.4	แสดงสารตัวอย่าง 36 เม็ด	96
3.5	แสดงผงสารประกอบตั้งต้นที่บดคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดีในครกหินอ่อน	99
3.6	แสดงแม่พิมพ์อัดเม็ดสารและคีมจับ	100
3.7	แสดงการอัดเม็ดสาร	100
3.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเผาเม็ดสาร	101
3.9	แสดงเตาเผาเม็ดสารขณะเผาที่ 950 °C	101
3.10	แสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของสารตัวนำยวดยิ่ง	102
3.11	แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมเม็ดสารตัวอย่าง YBCO	102

ภาพที่		หน้า
3.12	แสดงแบบจำลองเม็ดสารตัวอย่างบริเวณที่อยู่ในสถานะปกติและ สถานะนำยวดยิ่ง.....	104
3.13	แสดงจุดข้อมูลบนรูปสามเหลี่ยม	105
3.14	แสดงแผนภาพการวัดค่าความเหนียวนำและอุณหภูมิของสารตัวอย่าง ที่แช่ในไนโตรเจนเหลว.....	108
3.15	แสดงแผนภาพขั้นตอนการถ่ายภาพ SEM.....	109
4.1	แสดงค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	114
4.2	แสดงค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	115
4.3	แสดงค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	116
4.4	แสดงค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	117
4.5	แสดงค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	118
4.6	แสดงค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	119
4.7	แสดงค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	122

ภาพที่		หน้า
4.8	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	123
4.9	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	124
4.10	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	125
4.11	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	126
4.12	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	127
4.13	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	128
4.14	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	129
4.15	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	133
4.16	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	134

ภาพที่		หน้า
4.17	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	135
4.18	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	136
4.19	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	137
4.20	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	138
4.21	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	139
4.22	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	140
4.23	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	141
4.24	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	142
4.25	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของสาร	143
4.26	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร	148

[illegible]

ภาพที่		หน้า
4.54	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	183
4.55	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	183
4.56	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	184
4.57	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	184
4.58	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	185
4.59	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	185
4.60	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	186
4.61	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	186
4.62	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตราส่วนลอการิทึม	187

[illegible]

ภาพที่		หน้า
4.72	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตรฐานลอการิทึม	192
4.73	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตรฐานลอการิทึม	192
4.74	แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของสาร มาตรฐานลอการิทึม	193
4.75	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ	196
4.76	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ	197
4.77	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ	198
4.78	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ	199
4.79	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ	200
4.80	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ	201
4.81	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	206
4.82	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	207
4.83	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	208
4.84	แสดงภาพถ่าย SEM ของเมล็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	209

ภาพที่		หน้า
4.85	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	210
4.86	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	211
4.87	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	212
4.88	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	213
4.89	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	219
4.90	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ ผิวด้านนอก	220
4.91	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ ภายในเนื้อเม็คสาร.....	221
4.92	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	222
4.93	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	223
4.94	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	224
4.95	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	225
4.96	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	226
4.97	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	227
4.98	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมดุ ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	228

ภาพที่		หน้า
4.99	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	229
4.100	แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	230
ก.1	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO ไม่เจือ	248
ก.2	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	248
ก.3	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	249
ก.4	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	250
ก.5	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	250
ก.6	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	251
ก.7	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	251
ก.8	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	252
ก.9	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	252
ก.10	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ	253
ก.11	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	253
ก.12	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	254

ภาพที่	หน้า
ก.13	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 255
ก.14	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 255
ก.15	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 256
ก.16	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 256
ก.17	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 257
ก.18	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 257
ก.19	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด ของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ 258
ก.20	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด ของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ 258
ก.21	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด ของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 259

ภาพที่		หน้า
ก.22	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด สัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉื่อยของเม็ดสารตัวอย่าง ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ.....	259
ก.23	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด สัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉื่อยของเม็ดสารตัวอย่าง ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	260
ก.24	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด สัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉื่อยของเม็ดสารตัวอย่าง ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	260
ก.25	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	261
ก.26	แสดงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	261
ก.27	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมมูลของ ระบบ YBCO ไม่เจือ.....	262
ก.28	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมมูลของ ระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$	262
ก.29	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมมูลของ ระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$	263
ก.30	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	264
ก.31	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	264
ก.32	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	265
ก.33	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$	265

ภาพที่	หน้า
ก.34	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 266
ก.35	แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูล ของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 266
ก.36	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ..... 267
ก.37	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ 267
ก.38	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 268
ก.39	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 269
ก.40	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 269
ก.41	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 270
ก.42	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 270
ก.43	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 271
ก.44	แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 271

ภาพที่	หน้า
ก.45	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ 272
ก.46	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ 272
ก.47	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 273
ก.48	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ 273
ก.49	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ 274
ก.50	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 274
ก.51	แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6 9, 10, 13 และ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 275
ก.52	แสดงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 275
ก.53	แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ 276

ภาพที่	หน้า
ก.54	แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอนของเม็ดสารตัวอย่างใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ 276
ก.55	แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอนของเม็ดสารตัวอย่างใน แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 277
ก.56	แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอนของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6 9, 10, 13 และ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ 277
ค.1	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงแกนอากาศเปลี่ยนแปลง ไปตามอุณหภูมิ 283
ค.2	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงแกนอิฐเปลี่ยนแปลง ไปตามอุณหภูมิ 283
ค.3	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงแกนเหล็กเปลี่ยนแปลง ไปตามอุณหภูมิ 284
ง.1	แสดงภาพสารตั้งต้น Y_2O_3 , BaO และ CuO..... 286
ง.2	แสดงภาพเครื่องชั่งสารสีดำแห่ง Sartorius..... 287
ง.3	แสดงภาพแม่พิมพ์อัดเม็ดสารและกิมจับ..... 287
ง.4	แสดงภาพครกหินอ่อนที่มีสารตั้งต้นบดคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน 288
ง.5	แสดงภาพอะซิโตนใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ต่าง ๆ..... 288
ง.6	แสดงภาพถังเก็บไนโตรเจนเหลว 289
ง.7	แสดงภาพภาชนะเก็บสารตัวอย่างที่ใส่เม็ดสารดูความชื้น 289
ง.8	แสดงภาพเครื่องอัดเม็ดสารไฮดรอลิก 290
ง.9	แสดงภาพเตาเผาสาร VECSTAR FURNACES รุ่น VF2..... 290
ง.10	แสดงภาพจานเพาะเชื้อและบีกเกอร์ใส่ไนโตรเจนเหลว 291
ง.11	แสดงภาพการทดลองการยกแท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ ของเม็ดสารตัวอย่าง 291
ง.12	แสดงภาพเม็ดสารตัวอย่างพันด้วยลวดทองแดง..... 292
ง.13	แสดงภาพเครื่องวัด Precision LRC HEWLETT PACKARD รุ่น 4284A..... 292
ง.14	แสดงภาพเครื่องวัดความต่างศักย์และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 293
ง.15	แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือในการเก็บข้อมูลการทดลอง 293
ง.16	แสดงภาพถังบรรจุไนโตรเจนเหลวขณะแช่เม็ดสารตัวอย่าง..... 294

ภาพที่		หน้า
ง.17	แสดงภาพภาชนะอลูมิเนียมภายในบรรจุเม็ดสารตัวอย่างและ เทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมิ	294
ง.18	แสดงกล้องถ่ายภาพ SEM camscan รุ่น MX2000	295

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

นับตั้งแต่เมื่อปี ค.ศ. 1911 Onnes และ Holst ได้ค้นพบปรากฏการณ์การนำยวดยิ่งของสารปรอทที่อุณหภูมิ 4.2 K ต่อมาในปี ค.ศ. 1933 Meissner และ Ochsenfeld ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่ง พบว่าสารตัวนำยวดยิ่งไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กพุ่งผ่านเนื้อสาร เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ไมสเนอร์-โอเชินฟีลด์” อีกสองปีถัดมา ค.ศ. 1935 Fritz และ Heinz London ได้เสนอทฤษฎีที่แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่ง ทำให้เข้าใจในเรื่องของปรากฏการณ์ไมสเนอร์-โอเชินฟีลด์ ได้มากขึ้น เรียกทฤษฎีนี้ว่า “ทฤษฎีลอนดอน” ซึ่งเป็นที่มาของ “ระยะเจาะลึกของลอนดอน” ถือได้ว่าเป็นทฤษฎีแรกที่ใช้อธิบายสมบัติทางคลาสสิกของสารตัวนำยวดยิ่งได้เป็นผลสำเร็จอีกด้วย

นอกจากนี้ การพัฒนาทางด้านสารตัวนำยวดยิ่งยังได้มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องตลอดศตวรรษที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านทฤษฎีและปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น ทฤษฎีกินซ์เบิร์ก-แลนดาว (ค.ศ. 1950), ทฤษฎี BCS (ค.ศ. 1957), ปรากฏการณ์โจเซฟสัน (ค.ศ. 1962) เป็นต้น หรือทางด้านการค้นหาสารตัวนำยวดยิ่งใหม่ ๆ นอกเหนือจากสารปรอท ซึ่งในช่วงแรก ๆ เป็นการค้นหาสารตัวนำยวดยิ่งของธาตุเดี่ยว (Element) เช่น Al, Ga, In, Pb, Nb, Sn, Ta, Ti, V, W, Zn ต่อมาเป็นระบบสารคู่ (Binary system) ซึ่งอาจจะเป็นพวกอัลลอยส์ (Alloy) หรือสารประกอบ (Compound) เช่น V_3Si , Nb_3Sn , Mg_2B ระบบสามตัว (Ternary system) เช่น La-Ba-Cu-O, La-Sr-Cu-O, Y-Ba-Cu-O, Tl-Ba-Cu-O ระบบสี่ตัว (Quaternary system) เช่น Bi-Sr-Ca-Cu-O, Hg-Ba-Ca-Cu-O ซึ่งสองระบบหลังนี้จัดเป็นพวกสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูง (High critical temperature superconductors) ค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดย Bednorz และ Muller (La-Ba-Cu-O)

มีหลากหลายปัญหาที่น่าสนใจเกี่ยวกับสารตัวนำยวดยิ่ง โดยเฉพาะปัญหาการเจาะลึกของสนามแม่เหล็กเข้าไปในเนื้อของสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูงและลักษณะเกรนของสารจากการศึกษาสังเกตพบว่าสารเหล่านี้มีระยะเจาะลึกของสนามแม่เหล็กเข้าไปในผิวน้อยมาก อย่างไรก็ตาม การทดลองก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าระยะเจาะลึกของสารตัวนำยวดยิ่งนั้น

สามารถวัดค่าได้และสอดคล้องกับทฤษฎีของลอนดอนและทฤษฎี BCS ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ เนื่องจากการทดลองที่ได้มาจากธาตุเดี่ยวที่มีความบริสุทธิ์ แต่พอมาถึงปัจจุบันได้มีการค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งที่เป็นสารในระบบสารคู่ ระบบสาม และระบบสี่ ตามลำดับ สารตัวนำยวดยิ่งเหล่านี้มีความไม่บริสุทธิ์ จึงทำให้เกิดพฤติกรรมวอร์เทกซ์ (Vortex behavior) เกิดขึ้นเป็นสาเหตุทำให้ค่าระยะเจาะลึกของสารเหล่านี้มีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นค่าที่คำนึงถึงผลกระทบรวมทั้งหมด ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเรียกระยะเจาะลึกนี้ว่า “ระยะเจาะลึกยังผล”

สำหรับงานวิจัยนี้จะได้ศึกษาการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลระบบ YBCO ที่ไม่เจือและเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$ โดยการเผาเม็ดสารในอากาศที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เม็ดสารเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในเตา ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเม็ดสารก่อนเผาและหลังเผา ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของสารเมื่อสารอยู่ในขดลวดโซลินอยด์ในสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง ศึกษาระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งในระบบ YBCO ซึ่งเป็นสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูง ($T_c \sim 92$ K) รวมทั้งศึกษาลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารโดยการถ่ายภาพ SEM

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ที่ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO คือ ลักษณะเม็ดสาร สี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสารก่อนเผาและหลังเผา ปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์และอุณหภูมิวิกฤต

1.2.3 เพื่อศึกษาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

1.2.4 เพื่อศึกษาระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

1.2.5 เพื่อศึกษาอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เทียบกับอุณหภูมิของสาร

1.2.6 เพื่อศึกษาอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

1.2.7 เพื่อศึกษาลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO โดยการถ่ายภาพ SEM

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ลักษณะสี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาและมวลของแต่ละสารตัวอย่างที่ไม่เจือเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$ ก่อนเผาและหลังเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีความแตกต่างกัน

1.3.2 ค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวอย่างและระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิวิกฤต

1.3.3 ค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวอย่างและระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิของสารตัวอย่าง

1.3.4 ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของแต่ละสารตัวอย่างที่ไม่เจือเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$ มีลักษณะที่แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาค่าความเหนียวนำและหาค่าระยะเจาะลึกยังผล ตลอดจนลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ทั้งที่เจือและไม่เจือด้วย Ag_2O เเผาที่ 950 °C ในอากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในสัดส่วนของสาร Y_2O_3 , BaO, CuO ดังนี้

1.4.1 $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ โดยมีค่า x, y, z เป็นไปตามเงื่อนไข คือ $1 \leq x \leq 3$, $2 \leq y \leq 4$ และ $4 \leq z \leq 6$ ยกเว้น $x=3$, $y=2$, $z=5$

1.4.2 $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z + (Ag_2O)_{0.1}$ โดยมีค่า x, y, z เป็นไปตามเงื่อนไข คือ $1 \leq x \leq 3$, $2 \leq y \leq 4$ และ $4 \leq z \leq 7$

1.4.3 $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z + (Ag_2O)_{0.2}$ โดยมีค่า x, y, z เป็นไปตามเงื่อนไข คือ $1 \leq x \leq 4$, $2 \leq y \leq 5$ และ $3 \leq z \leq 7$

นำไปวัดหาสมบัติทางกายภาพ (ลักษณะเม็ดสาร สี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสารก่อนเผาและหลังเผา ปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ และ อุณหภูมิวิกฤต) แล้วนำไปพันด้วยลวดทองแดงจำนวน 80 รอบ วัดหาค่าความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในช่วง 77 K ไปจนถึงอุณหภูมิห้องด้วย LRC มิเตอร์ โดยตั้งความถี่ที่ใช้วัดไปที่ 50 kHz , ความต่างศักย์ 1.00 V วิเคราะห์หาค่าระยะเจาะลึกยังผลจากค่าความเหนี่ยวนำที่วัดได้ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำและระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้นหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำและระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ หลังจากนั้นนำสารตัวอย่างไปถ่ายภาพ SEM เพื่อดูลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารตัวอย่าง

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสารตัวนำยวดยิ่ง

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีและการใช้เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวิจัย ได้แก่ เครื่องมือวัด LRC มิเตอร์ เครื่องจ่ายกระแสคงที่ โวลต์มิเตอร์ เทอร์มิสเตอร์และกล้องถ่ายภาพ SEM

1.5.3 เตรียมเม็ดสารตัวนำยวดยิ่งตามแผนภาพสมดุลในระบบ YBCO ที่ไม่เจือสารใด ๆ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ จำนวนทั้งหมด 25 เม็ด

1.5.4 ออกแบบการทดลองและทดลองเพื่อศึกษาค่าความเหนี่ยวนำและระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

1.5.5 นำสารตัวนำยวดยิ่งไปถ่ายภาพ SEM เพื่อศึกษาลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสาร

1.5.6 สรุปและอภิปรายผล เขียนรายงานการวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.6.1 ในขั้นตอนของการเตรียมสารในแต่ละครั้ง สารตั้งต้นอาจมีความชื้นอยู่บ้างและอาจมีความชื้นไม่เท่ากันในแต่ละวันซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการอบแห้งสารทุกครั้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 10 นาที ก่อนทำการเตรียมสารทุกครั้ง ดังนั้น ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงถือได้ว่าสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมสารแต่ละครั้งมีความชื้นที่ไม่แตกต่างกันและมีลักษณะอื่น ๆ ที่เหมือนกันทุกประการ

1.6.2 ลักษณะเม็ดสารตัวอย่างหลังเผาแต่ละเม็ดสารอาจมีที่ว่างเนื่องจากมีรูพรุน มีรอยร้าว รอยปริแตก ในขณะที่ทำการเผาเม็ดสารตัวอย่าง ดังนั้น ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงถือว่า รูพรุน รอยร้าว รอยปริแตกเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อสารในการคำนวณหาค่าระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวอย่างด้วย

1.6.3 เม็ดสารตัวอย่างหลังเผาแต่ละเม็ดอาจมีการยุบตัว มีการหลอมเหลว ทำให้มีรูปร่างลักษณะที่บิดเบี้ยวไปจากเดิม ไม่เป็นรูปทรงกระบอกอย่างสมบูรณ์ แต่ในการคำนวณหาค่าระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวอย่าง ผู้วิจัยใช้แบบจำลองของสารตัวอย่างที่เป็นรูปทรงกระบอกที่สมบูรณ์เท่านั้น

1.6.4 ในการทดลองวัดค่าความเหนียวนำและคำนวณหาระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแต่ละครั้งจะมีน้ำแข็งและน้ำมาเกาะเนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในอากาศ (ใช้เครื่องเป่าผมเป่าให้แห้งทุกครั้งหลังจากทดลองเสร็จแล้ว) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สารมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นและอาจทำให้สารตัวอย่างมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมในการทดลองแต่ละครั้ง ดังนั้น ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงถือว่าในการทดลองแต่ละครั้งสารตัวอย่างมีสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ

1.6.5 เนื่องจากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้ในโครเจนเหลวในการลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงในขณะที่ทำการทดลองซึ่งมีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 77 เคลวิน เท่านั้น ไม่สามารถลดอุณหภูมิลงไปจนถึงศูนย์สัมบูรณ์ได้ และไม่พบว่ามีรายงานค่าระยะเจาะลึกยังผลที่ศูนย์สัมบูรณ์ของสารตัวนำยวดยิ่งในระบบ YBCO ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้ระยะเจาะลึกยังผลที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งเป็นระยะเจาะลึกยังผลที่มีค่าน้อยที่สุดในการทดลองแทนระยะเจาะลึกยังผลที่ศูนย์สัมบูรณ์ ($\lambda_{\text{eff}}(77 \text{ K}) = \lambda_{\text{eff}(\text{min})} \approx \lambda_{\text{eff}}(0)$ ที่ $T \rightarrow 0 \text{ K}$)

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.7.1 ระยะเจาะลึกยังผล หมายถึง ระยะเจาะลึกทั้งหมดของสนามแม่เหล็กที่ซึมเข้าไปในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งซึ่งเกิดจาก ระยะเจาะลึกของลอนดอน ความบกพร่องของสาร ความไม่สมบูรณ์ของสาร รอยปริแตกของสาร สิ่งเจือปนต่าง ๆ เป็นต้น

1.7.2 โลหะปกติ หมายถึง โลหะที่ยังไม่แสดงสมบัติสภาพนำยวดยิ่ง

1.7.3 ความเหนียวนำ หมายถึง ความเหนียวนำตนเองของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่ง

1.7.4 อุณหภูมิวิกฤตจุดเริ่มเปลี่ยนสถานะ ($T_{c(\text{onset})}$) หมายถึง อุณหภูมิจุดที่เริ่มปรากฏ แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งขณะเมื่อลดอุณหภูมิลงหรืออุณหภูมิจุดสุดท้ายของการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งขณะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

1.7.5 อุณหภูมิวิกฤตจุดกึ่งกลาง ($T_{c(\text{mid})}$) หมายถึง อุณหภูมิจุดกึ่งกลางของการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งขณะเมื่อลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ

1.7.6 อุณหภูมิวิกฤตจุดเปลี่ยนแปลง ($T_{c(\text{inflect})}$) หมายถึง อุณหภูมิจุดที่มีการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งอย่างรวดเร็วที่สุดขณะเมื่อลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ

1.7.7 อุณหภูมิวิกฤตจุดศูนย์ ($T_{c(\text{zero})}$) หมายถึง อุณหภูมิจุดสุดท้ายของการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งซึ่งมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์ขณะเมื่อลดอุณหภูมิลงหรืออุณหภูมิจุดที่เริ่มปรากฏแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งขณะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

1.7.8 การเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำ ($\mathcal{E}_L$) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างผลต่างของค่าความเหนี่ยวนำที่อุณหภูมิวิกฤตจุดเริ่มเปลี่ยนสถานะ ($T_{c(\text{onset})}$) และค่าความเหนี่ยวนำที่อุณหภูมิวิกฤตจุดศูนย์ ($T_{c(\text{zero})}$) กับค่าความเหนี่ยวนำที่อุณหภูมิวิกฤตจุดศูนย์

1.7.9 การเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ($\mathcal{E}_\lambda$) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างผลต่างของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่อุณหภูมิวิกฤตจุดเริ่มเปลี่ยนสถานะ ($T_{c(\text{onset})}$) และค่าระยะเจาะลึกยังผลที่อุณหภูมิวิกฤตจุดศูนย์ ($T_{c(\text{zero})}$) กับค่าระยะเจาะลึกยังผลที่อุณหภูมิวิกฤตจุดศูนย์

1.7.10 ขอบ หมายถึง ขอบของเมล็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งด้านซ้ายมือในภาพถ่าย SEM

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาของสารตัวนำยวดยิ่ง ประวัติโดยสังเขป การค้นพบสมบัติเบื้องต้น ชนิดของสารตัวนำยวดยิ่ง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูง แผนภาพเฟสสมดุล สနามแม่เหล็กและความเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดโซลินอยด์ และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งที่จะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในขั้นนี้

2.1 บทนำ

ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 มีเหตุการณ์อยู่ 2 เหตุการณ์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการค้นพบสมบัติที่สำคัญของสารตัวนำยวดยิ่งและเป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหาสารตัวนำยวดยิ่ง ทั้งที่เป็นโลหะ โลหะผสม เซรามิก ศึกษาค้นคว้าวิจัยและสร้างทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับสภาพนำยวดยิ่งของสารชนิดต่าง ๆ ของนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก เหตุการณ์แรก เกิดขึ้นเมื่อ Heike Kamerlingh Onnes นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ แห่งมหาวิทยาลัย Leiden ประสบผลสำเร็จในการทำฮีเลียมเหลวขึ้นในปี ค.ศ. 1908 อีก 3 ปีต่อมา ในปี ค.ศ. 1911 H.K Onnes พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะชนิดต่าง ๆ เช่นปรอท ตะกั่ว ดีบุก ไนโอเบียม และโลหะอื่น ๆ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเป็นศูนย์ ($R = 0$) เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิวิกฤต (**Critical temperature – T_c**) ซึ่งอุณหภูมิวิกฤตนี้มีค่าไม่เท่ากันของโลหะแต่ละชนิดและส่วนมากมีค่าไม่เกิน 10 เคลวิน เช่น อุณหภูมิวิกฤตของ ดีบุก, ปรอท, ตะกั่ว และไนโอเบียม มีค่าเท่ากับ 3.69, 4.2, 7.26 และ 9.2 เคลวิน ตามลำดับ เป็นต้น เหตุการณ์ที่สอง อีก 22 ปีต่อมา เกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1933 Karl Walther Meissner และ Robert Ochsenfeld นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน พบว่า โลหะดังกล่าวเมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตแล้ว จะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กพุ่งผ่านเข้าไปในเนื้อโลหะและยังผลักสนามแม่เหล็กออกจากโลหะด้วย ทำให้ภายในเนื้อโลหะไม่มีสนามแม่เหล็กอยู่เลย นั่นคือ สนามแม่เหล็กภายในเนื้อโลหะมีค่าเป็นศูนย์ ($B = 0$) หรือแสดงความเป็นสารแม่เหล็กไดอาแมกเนติกที่สมบูรณ์ (**Perfect diamagnetism**) จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์-โอเชินฟีลด์” ต่อมาเรียกสั้น ๆ ว่า “ปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์” รายละเอียดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

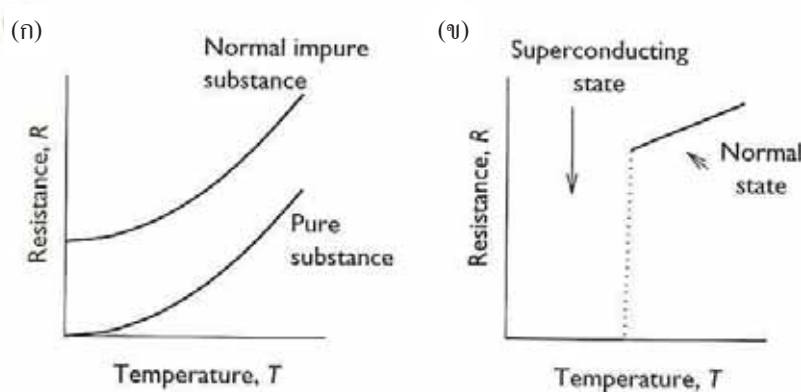
2.2 สมบัติของสารตัวนำยิ่งยวด

2.2.1 สมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำยิ่งยวด

โลหะปกติ (normal metal) เมื่อใส่สนามไฟฟ้า $\vec{E}$ เข้าไป ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในโลหะปกติขึ้นนั้น ๆ ด้วยค่าความหนาแน่นกระแส $\vec{J}$ และสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ นั่นคือ

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad \text{----- (2.1)}$$

สภาพต้านทานไฟฟ้านี้มีความสัมพันธ์กับความต้านทานไฟฟ้า R และเกิดจากสาเหตุหลักที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ 1) เกิดจากการสั่นของอะตอม (thermal vibrations) และ 2) เกิดจากความไม่บริสุทธิ์ (impurities) และความบกพร่อง (defects) ของผลึกโลหะปกติ ทั้งสองสาเหตุนี้ก่อให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในโลหะปกติ (อิเล็กตรอนไม่เกิดการกระเจิงก็ต่อเมื่อโลหะปกติมีโครงผลึกที่สมบูรณ์ (perfect lattice)) เมื่อลดอุณหภูมิลง การสั่นของโครงผลึกก็จะลดลง ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงตามไปด้วย ดังรูป 2.1 (ก) ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าเป็นโลหะปกติที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อลดอุณหภูมิลงจนเข้าใกล้ $T = 0 \text{ K}$ ปรากฏว่าโลหะชิ้นนี้ยังคงมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเหลืออยู่ ($R > 0 \Omega$) แต่ถ้าเป็นโลหะปกติที่บริสุทธิ์ เมื่อลดอุณหภูมิลงจนเข้าใกล้ $T = 0 \text{ K}$ โลหะชิ้นนี้จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเข้าใกล้ $R = 0 \Omega$ ด้วย

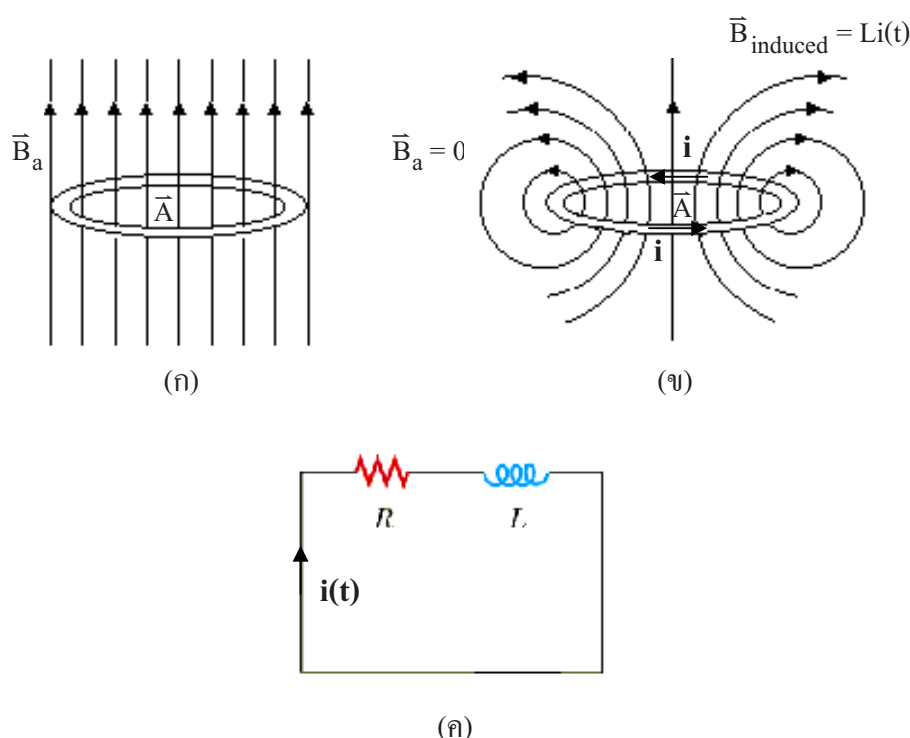


รูป 2.1 (ก) แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงของโลหะปกติบริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์

(ข) แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงเป็นศูนย์ เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิวิกฤตของ

ปรอท ($T_c \sim 4.2 \text{ K}$)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อ H.K. Onnes ทดลองวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่อุณหภูมิจุดค่าหนึ่ง ($T_c \sim 4.2 \text{ K}$) ปรอทมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่งด้วยค่า $R \sim 0$ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_c ดังรูป 2.1 (ข) ตอนนั้น H.K. Onnes เกิดข้อสงสัยว่าทำไมผลการทดลองที่ได้จึงออกมาเช่นนี้ ซึ่ง H.K. Onnes เองก็ยังไม่แน่ใจว่าอาจเกิดจากความผิดพลาดในการวัดทดลองบางอย่างเกิดขึ้นก็ได้ เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าค่า $R \sim 0$ หรือ $R \equiv 0$ อย่างแท้จริง การวัดทดลองของ H.K. Onnes มีข้อผิดพลาดหรือไม่ จึงต้องทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าอย่างละเอียดและรอบคอบด้วยเทคนิคการสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียร์ (nuclear magnetic resonance techniques ; NMR) โดย File และ Mills เมื่อปี ค.ศ. 1963 เพื่อให้ปัญหานี้ได้รับการพิสูจน์ลงความเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าความต้านทานไฟฟ้า R หรือสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ที่ถูกต้องจริงๆ นั้นมีค่าเท่าใด พิจารณาวงจรรูป 2.2



รูป 2.2 (ก) แสดงวงแหวนตัวนำยวดยิ่ง เมื่อ $T > T_c$ และมีสนามแม่เหล็กภายนอกพุ่งผ่านเข้าไปในวงแหวน

(ข) แสดงวงแหวนตัวนำยวดยิ่งหลังจากลดอุณหภูมิลงจนกระทั่ง $T < T_c$ และเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ยังคงไหลวนต่อไปเรื่อย ๆ เป็นกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ค) แสดงวงจรสมมูล RL

จากวงจรรูป 2.2 และกฎของเลนส์ (Lenz's Law) จะได้ว่า

$$-A \frac{dB_a}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

เมื่อ R , L และ A คือ ความต้านทานไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำตนเอง และพื้นที่ที่สนามแม่เหล็กพุ่งผ่าน ตามลำดับ เมื่อ $R=0$ จากสมการ (2.2) จะได้ว่า

$$-A \frac{dB_a}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad \text{-----} \quad (2.3)$$

เพราะฉะนั้น จะได้ว่า $Li + AB_a = \text{ค่าคงที่}$

จากสมการ (2.2) ถ้า $\vec{B}_a = 0$ ได้ค่ากระแสไฟฟ้า $i(t)$ ดังสมการ

$$i(t) = i(0)e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{-----} \quad (2.4)$$

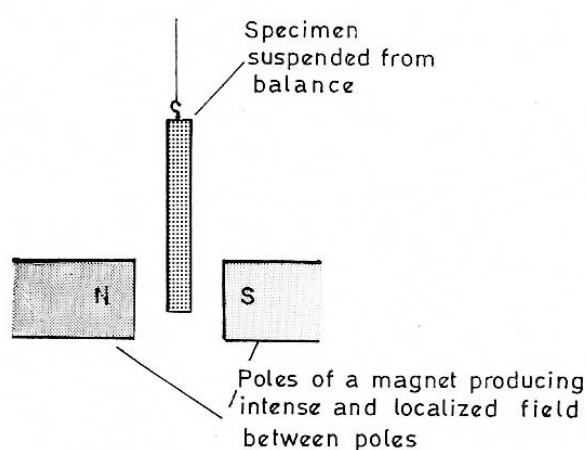
สำหรับสารที่อยู่ในสถานะนำยวดยิ่ง มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ($R=0$) จากสมการ (2.4) ลดรูปลงมาเป็นสมการ (2.5) คือ

$$i(t) = i(0) \quad \text{-----} \quad (2.5)$$

กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น $i(0)$ ไม่มีการสูญเสียเมื่อเวลาผ่านไป t เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า “กระแสไฟฟ้ายืนหยัด (Persistent currents)” หรือ “กระแสไฟฟ้านำยวดยิ่ง (Supercurrent)” เทคนิคดังกล่าวเป็นการสังเกตสนามแม่เหล็กซึ่งสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า $i(t)$ ตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ไหลในวงจรครบรูปนำยวดยิ่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำตนเอง L เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากมีความต้านทานไฟฟ้า R ในวงจร ได้ค่าคงที่เวลา (time constant) $\tau = \frac{L}{R}$ จากการเผ่าสังเกตค่ากระแสไฟฟ้ายืนหยัดใน 1 ปี พบว่าค่า τ อย่างน้อยที่สุดของวงจรครบรูปนำยวดยิ่งมีค่าประมาณ 100 000 ปี เมื่อนำมาหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะได้ว่า $\rho < 10^{-26} \Omega.m$ ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้านี้มีค่าน้อยกว่าในสถานะปกติมากเกินกว่า 10^{15} เท่า (สภาพต้านทานไฟฟ้าของทองแดงซึ่งถือว่าเป็นโลหะนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด ณ อุณหภูมิห้อง มีค่าประมาณ $10^{-8} \Omega.m$) ดังนั้น จึงถือเป็นข้อพิสูจน์และลงความเห็นได้อย่างมีเหตุผลว่า $R \equiv 0$ ในสถานะนำยวดยิ่ง

2.2.2 สมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำยิ่งยวด

จากการทดลองของ Gouy เมื่อนำเอาแท่งสารแม่เหล็กที่ไม่ใช่สารเฟอร์โรแมกเนติกแขวนหย่อนลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของแท่งสารให้อยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก โดยให้ปลายด้านหนึ่งอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงกว่า ส่วนอีกปลายหนึ่งอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กอ่อนกว่าจนเกือบจะเป็นศูนย์ ดังรูป 2.3 พบว่าสนามแม่เหล็กออกแรงกระทำต่อแท่งสารแม่เหล็กมีทิศในแนวตั้ง นั่นคือ ถ้าแรงมีทิศขึ้น แสดงว่าสารแม่เหล็กแท่งนี้เป็นสารไดอะแมกเนติก แต่ถ้าแรงมีทิศลง แสดงว่าเป็นสารพาราแมกเนติก



รูป 2.3 แสดงการทดลองของ Gouy

ด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถจำแนกได้ว่าสารใดเป็นสารไดอะแมกเนติกหรือสารพาราแมกเนติก ซึ่งบ่งบอกปริมาณออกมาได้อย่างชัดเจนจากค่าของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของสาร (magnetic susceptibility ; χ_m) หาค่าได้จากสมการ

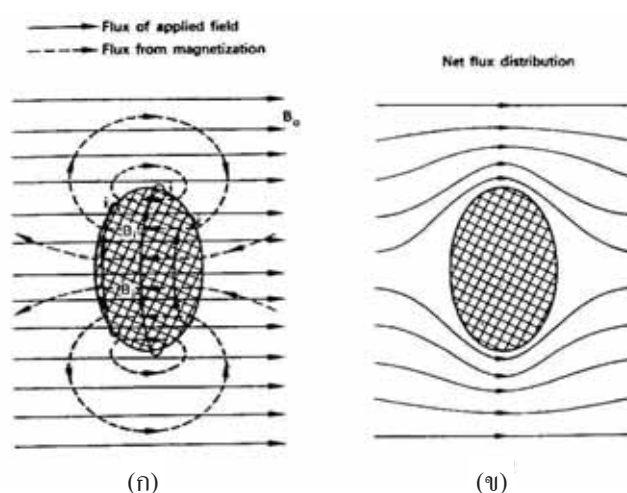
$$\chi_m = \frac{2\mu_0 F}{B^2 A} \quad \text{----- (2.6)}$$

เมื่อ B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณขอบล่างของแท่งสาร

F คือ แรงในแนวตั้งที่กระทำต่อขอบล่างของแท่งสาร

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของแท่งสาร

สำหรับสารพาราแมกเนติกแล้ว แรงกระทำต่อแท่งสารมีทิศลงให้มีค่าเป็นบวก ส่วนสารไดอาแมกเนติก แรงกระทำต่อแท่งสารมีทิศขึ้นให้มีค่าเป็นลบ จากการทดลองของ Gouy พบว่าสารแม่เหล็กส่วนใหญ่ (ยกเว้นสารเฟอร์โรแมกเนติก) มีค่า χ_m น้อยมาก อยู่ในระดับ 10^{-5} ถึง 10^{-6} โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่เป็นโลหะในสถานะปกติ แต่ถ้าโลหะชนิดเดียวกันนี้อยู่ในสถานะนำวยอดยิ่ง จะมีค่า χ_m เท่ากับ -1 ซึ่งเป็นสมบัติของสารไดอาแมกเนติกอย่างแรงและเป็นไปได้สำหรับสารตัวนำวยอดยิ่งทุกชนิด ดังนั้น จากการทดลองของ Gouy จะเห็นได้ว่าแรงที่กระทำต่อแท่งสารตัวนำวยอดยิ่งมีมากประมาณ 10^5 ถึง 10^6 เท่าของแรงที่กระทำต่อแท่งสารแท่งเดียวกันนี้เมื่ออยู่ในสถานะปกติ



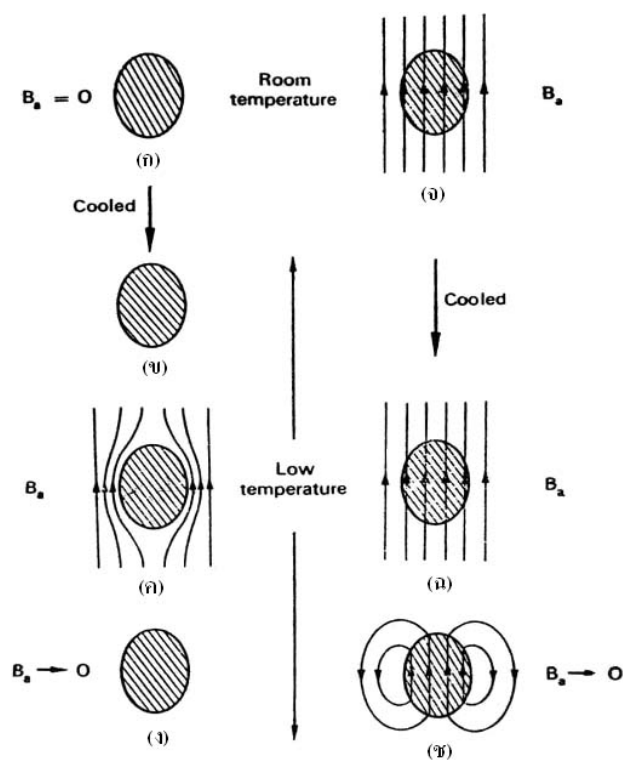
รูป 2.4 (ก) แสดงสนามแม่เหล็ก B_1 ที่เกิดจากกระแสลอมก้าบัง i

(ข) แสดงสนามแม่เหล็กสุทธิที่เป็นผลมาจากตัวนำสมบูรณ์

พิจารณาพฤติกรรมทางแม่เหล็กของโลหะตัวนำสมบูรณ์ (Perfect conductor) ภายใต้อานการณ์ที่แตกต่างกัน คือ

สถานการณ์แรก สมมติว่าสารตัวอย่างที่เป็นโลหะตัวนำสมบูรณ์ มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ ไม่มีความต้านทานไฟฟ้า มีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ต่อมาใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป B_a จากหัวข้อที่ผ่านมา เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายในโลหะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ภายในโลหะจึงยังคงมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ อธิบายได้ว่า เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอก B_a เข้าไปแล้วจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบ ๆ บนผิวโลหะ เรียกว่า “กระแสลอมก้าบัง (Screening currents)” กระแสลอมก้าบังนี้เหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก B_i ขึ้น ดังรูป 2.4 (ก) ซึ่งมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก B_a ภายในโลหะสนามแม่เหล็ก B_1

จึงไปหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}_a$ ทำให้สนามแม่เหล็กสุทธิภายในโลหะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนบริเวณภายนอกโลหะสนามแม่เหล็ก $\vec{B}_i$ มีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}_a$ ดังนั้น บริเวณภายนอกโลหะสนามแม่เหล็ก $\vec{B}_i$ จึงมีการซ้อนทับกับสนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}_a$ ทำให้ บริเวณภายนอกโลหะยังคงมีสนามแม่เหล็กอยู่และมีค่ามากกว่าบริเวณใกล้ ๆ ขอบผิวโลหะ จึงทำให้ โลหะตัวนำสมบูรณ์นี้ผลักสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปไม่ให้เข้าไปภายในเนื้อโลหะได้ ดังรูป 2.4 (จ) ลักษณะเช่นนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่าโลหะตัวนำสมบูรณ์เป็นสารไดอะแมกเนติกสมบูรณ์ ต่อมาเมื่อเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกจนมีค่าเท่ากับศูนย์แล้ว โลหะตัวนำสมบูรณ์ก็กลับสู่สภาพ เดิม ดังรูป 2.5 (ก) – (ง)

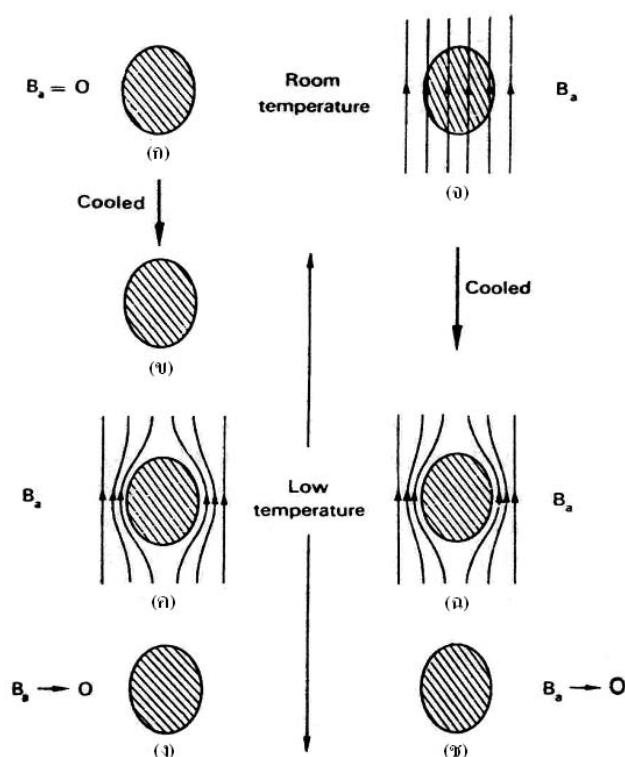


รูป 2.5 แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของตัวนำสมบูรณ์

สถานการณ์ที่สอง เป็นการพิจารณาลำดับขั้นตอนที่แตกต่างไปจากสถานการณ์แรก คือ สมมติว่าใส่สนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}_a$ เข้าไปในขณะที่โลหะยังอยู่ในอุณหภูมิห้องและมีความต้านทานไฟฟ้า เนื่องจากโลหะส่วนใหญ่ (ยกเว้น สารเฟอร์โรแมกเนติก เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล) มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ (Relative magnetic permeability) ใกล้เคียงกันมาก ($\mu_r \sim 1$) ดังนั้น จึงถือได้ว่าสนามแม่เหล็กภายในโลหะ มีค่าไม่แตกต่างจากสนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}_a$ ที่ใส่เข้าไป หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงต่ำมาก ๆ ทำให้โลหะมีความต้านทานไฟฟ้า

ลดลงเป็นศูนย์ แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไปก่อนหน้านี้ ทำให้สนามแม่เหล็กภายนอกยังคงมีอยู่ภายในโลหะเช่นเดิม ไม่ถูกผลักออกไปจากเนื้อโลหะ ดังรูป 2.5 (ฉ) ต่อมาเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกจนมีค่าเป็นศูนย์ แต่สนามแม่เหล็กภายในโลหะตัวนำสมบูรณ์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูป 2.5 (ซ) เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าขึ้นหัดเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์บนโลหะตัวนำสมบูรณ์

จากสถานการณ์ทั้งสอง เป็นที่น่าสนใจและสำคัญอย่างยิ่ง จากรูป 2.5 (ค) และ (ฉ) จะเห็นได้ว่า โลหะตัวนำสมบูรณ์อยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน คือ อยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำมาก ๆ และมีสนามแม่เหล็กภายนอก B_a ใส่เข้าไปเหมือนกัน แต่พฤติกรรมทางแม่เหล็กที่แสดงออกมานั้น มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง นั่นคือ มีความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ที่แตกต่างกัน และในทำนองคล้าย ๆ กัน จากรูป 2.5 (ง) และ (ซ) ก็ยังแสดงให้เห็นว่าโลหะตัวนำสมบูรณ์มีความเป็นแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ในขณะที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขภายนอกเดียวกัน จึงเป็นที่น่าสนใจและสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อความเป็นแม่เหล็กของตัวนำสมบูรณ์ไม่เป็นไปในทางเดียวกันเสมอไปภายใต้เงื่อนไขภายนอกเดียวกัน หากแต่ขึ้นอยู่กับลำดับขั้นตอนของการใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปและการลดอุณหภูมิลงนั่นเอง



รูป 2.6 แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง

อย่างไรก็ตาม จากการทดลองของ K.W. Meissner และ R. Ochsenfeld (1933) ได้ทำการวัดทดลองหาการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณภายนอกใกล้ ๆ กับโลหะดีบุกและตะกั่วที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตและมีสนามแม่เหล็กภายนอกอย่างอ่อนใส่เข้าไป เหมือนกับที่เคยทำการทดลองกับโลหะตัวนำสมบูรณ์ พบว่า ไม่ได้เป็นไปอย่างที่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า ตามสถานการณ์ ดังรูป 2.5 (ฉ) หากแต่โลหะดีบุกและตะกั่วได้กลายเป็นไดอาแมกเนติกสมบูรณ์ ดังรูป 2.6 (ฉ) ซึ่งมีการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กภายในโลหะดีบุกและตะกั่ว เหมือนกับสถานการณ์ ในรูป 2.5 (ค) และ 2.6 (ค) การทดลองนี้เป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่า สารตัวนำยวดยิ่ง นอกจากมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์แล้วยังมีสมบัติที่นอกเหนือไปจากตัวนำสมบูรณ์อีก คือ มีความเป็นไดอาแมกเนติกสมบูรณ์อยู่เสมอ เมื่ออยู่ในสถานะนำยวดยิ่งและมีสนามแม่เหล็กภายนอกอย่างอ่อนใส่เข้าไป หรืออาจกล่าวได้ว่า ภายในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่ง เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตแล้ว จะมีค่า $\vec{B}=0$ เสมอ ไม่ขึ้นอยู่กับลำดับขั้นตอนของการใส่สนามแม่เหล็กภายนอกอย่างอ่อนเข้าไปและการลดอุณหภูมิลง ดังรูป 2.6 สถานการณ์นี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์” นั่นเอง

จากความเป็นไดอาแมกเนติกสมบูรณ์ของตัวนำยวดยิ่ง เมื่อสนามแม่เหล็กภายในตัวนำยวดยิ่ง $\vec{B}=\mu_r\vec{B}_a$ มีค่าเป็นศูนย์แล้ว จะได้ว่า $\mu_r=0$ และจากสมการ (2.7) เป็นสมการหาค่าสนามแม่เหล็กภายในเนื้อวัสดุใด ๆ สัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_a$ กับแมกนีไทเซชัน $\vec{M}$

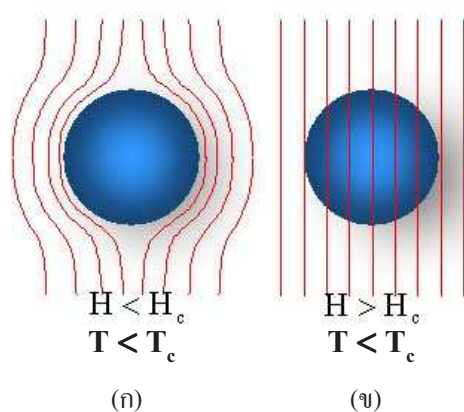
$$\vec{B}=\mu_0(\vec{H}_a+\vec{M}) \quad \text{-----} (2.7)$$

สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งแล้ว ($\vec{B}=0$) จะได้ว่า

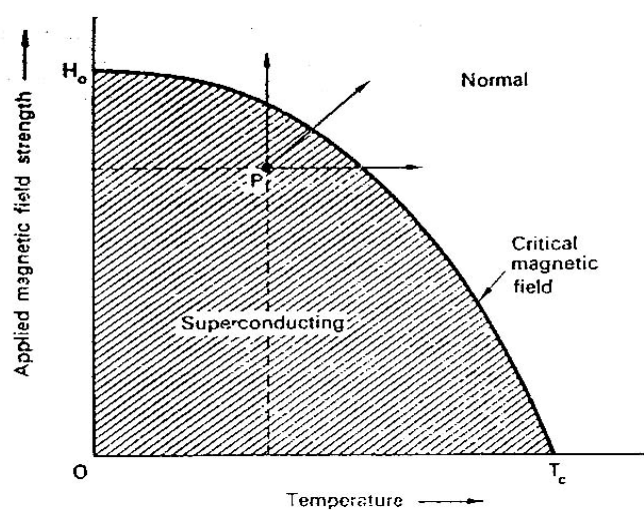
$$0=\mu_0(\vec{H}_a+\vec{M}) \quad \text{-----} (2.8)$$

ได้แมกนีไทเซชัน $\vec{M}=-\vec{H}_a$ และสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก $\chi_m=\frac{M}{H_a}=-1$

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของตัวนำยวดยิ่ง เมื่อใส่ความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างอ่อนเข้าไป $\vec{H}_a$ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตค่าหนึ่งแล้ว ผลปรากฏว่า สนามแม่เหล็กถูกผลักออกไปจากตัวนำยวดยิ่ง แต่ถ้าเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้นจนถึงค่าวิกฤตหรือมากกว่า พบว่า สภาพนำยวดยิ่งของสารตัวนำยวดยิ่งได้ถูกทำลายด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต $\vec{H}_c$ ดังรูป 2.7 และยังพบอีกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต $\vec{H}_c$ นี้ ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่งด้วย ดังรูป 2.8



รูป 2.7 แสดงสภาพนำวยดิ่งถูกทำลายด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต $\bar{H}_c$



รูป 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต
กับอุณหภูมิของสารตัวนำวยดิ่ง

รูป 2.8 เป็นกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารตัวนำวยดิ่ง
เขียนเป็นสมการทั่วไป จะได้ว่า

$$H_c(T) = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad \text{----- (2.9)}$$

จากรูป 2.8 และสมการ (2.9) จะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต H_c มีค่ามากที่สุด (H_0) ที่ $T = 0$ K และมีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ($H_c(T_c) = 0$) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง อุณหภูมิวิกฤต $T = T_c$ K

2.2.3 สมบัติทางความร้อนของสารตัวนำยวดยิ่ง

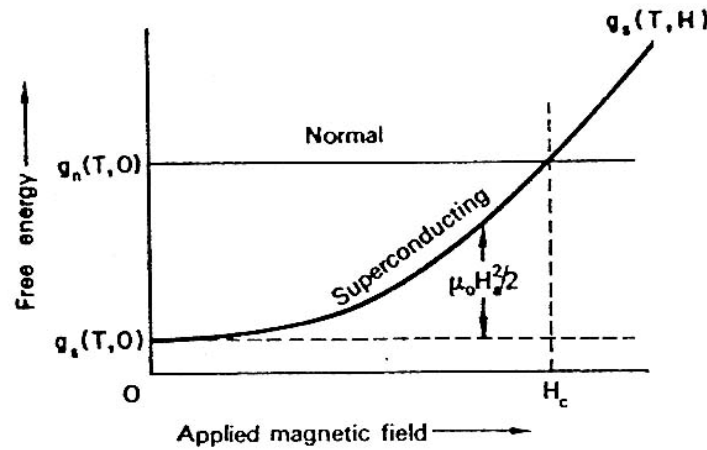
หัวข้อที่ผ่านมา การเปลี่ยนสถานะจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่งหรือจากสถานะนำยวดยิ่งเป็นสถานะปกติ โดยการเพิ่มและลดอุณหภูมิและหรือความเข้มสนามแม่เหล็กนั้น ถือได้ว่าเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอหรือจากไอกลายเป็นของเหลวของสาร ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงต้องอาศัยความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้ในการอธิบายและวิเคราะห์การเปลี่ยนสถานะของตัวนำยวดยิ่ง จากผลต่างของเอนโทรปี (Entropy) และผลต่างของความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ระหว่างสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ($T \rightarrow 0$ K)

เมื่อสารตัวนำยวดยิ่งอยู่ในสถานะนำยวดยิ่ง พลังงานอิสระจะต้องมีค่าน้อยกว่าเมื่อสารอยู่ในสถานะปกติ สมมติว่า ที่อุณหภูมิกที่ T ใด ๆ และไม่มีสนามแม่เหล็กใส่เข้าไป ($\vec{H}_a = 0$) กำหนดให้ พลังงานอิสระกิบส์ต่อปริมาตร (Gibbs free energy per unit volume) ของสถานะนำยวดยิ่ง คือ $g_s(T, 0)$ และของสถานะปกติ คือ $g_n(T, 0)$ เมื่อใส่ความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าไป $\vec{H}_a$ ได้แมกนีไทเซชัน $\vec{M}$ ทำให้พลังงานอิสระกิบส์ต่อปริมาตรเปลี่ยนแปลงไป ดังสมการ (2.10)

$$dg = -\mu_0 M dH_a \quad \text{----- (2.10)}$$

ในกรณีที่แมกนีไทเซชันมีค่าเป็นบวกหรือมีทิศเดียวกับทิศของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป พลังงานอิสระกิบส์จะมีค่าลดลง แต่สำหรับในกรณีของสารตัวนำยวดยิ่งนั้น แมกนีไทเซชันมีค่าเป็นลบหรือมีทิศตรงข้ามกับทิศของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป ซึ่งถ้าสนามแม่เหล็กภายในตัวนำยวดยิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ($\vec{B} = 0$) แล้ว จากสมการ (2.7) จะได้ว่า $\vec{M} = -\vec{H}_a$ ทำให้พลังงานอิสระกิบส์ต่อปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป 2.9 นั่นคือ จากสมการ (2.10) จะได้ว่า

$$g_s(T, H_a) = g_s(T, 0) + \frac{1}{2} \mu_0 H_a^2 \quad \text{----- (2.11)}$$



รูป 2.9 แสดงพลังงานอิสระกิบส์ต่อปริมาตรที่เกิดจากการใส่ความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าไปยังตัวนำยวดยิ่ง

อย่างไรก็ตาม ถ้าเพิ่มขนาดความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_a$ ขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าวิกฤต $\vec{H}_c$ แล้ว สารตัวนำยวดยิ่งจะเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะปกติ สมบัติความเป็นสารไดอามagnetik ก็เปลี่ยนไปด้วย กลายเป็นสารที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก แมกนีไทเซชันจึงมีค่าเป็นศูนย์ ($\vec{M}=0$) ทำให้การเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์อีกต่อไป นั่นคือ

$$0 \leq g_s(T, H_a) - g_s(T, 0) \leq \frac{1}{2} \mu_0 H_c^2 \quad \text{----- (2.12)}$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ของตัวนำยวดยิ่ง เนื่องจากการใส่ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_a$ เกิดขึ้นได้เฉพาะในช่วง $g_s(T,0)$ ถึง $g_s(T, H_c) = g_n(T,0) = g_n(T, H_c)$ นั่นเอง

จากสมการ (2.11) สามารถหาผลต่างของพลังงานอิสระกิบส์ระหว่างสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง เมื่อใส่ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_a$ เข้าไป คือ

$$g_n - g_s(H_a) = \frac{1}{2} \mu_0 (H_c^2 - H_a^2) \quad \text{----- (2.13)}$$

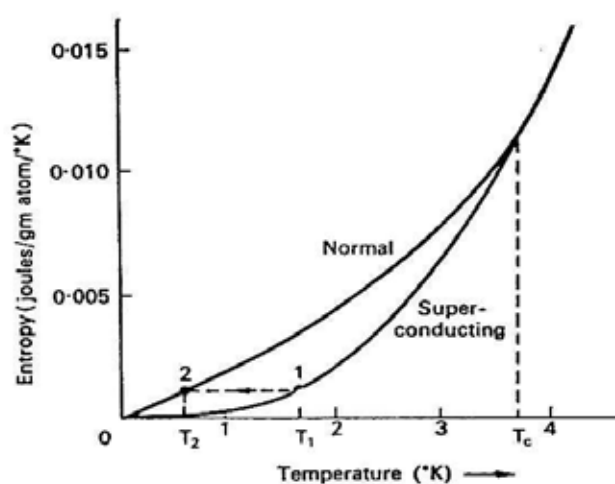
เมื่อความดัน P และความเข้มข้นแม่เหล็ก $\bar{H}_a$ ที่ใส่เข้าไปมีค่าคงที่ ส่วนความเข้มข้นแม่เหล็กวิกฤต $\bar{H}_c$ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ T ดังรูป 2.8 ทำให้ได้ผลต่างของเอนโทรปีต่อปริมาตร

$s = -\frac{\partial g}{\partial T}$ ระหว่างสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง คือ

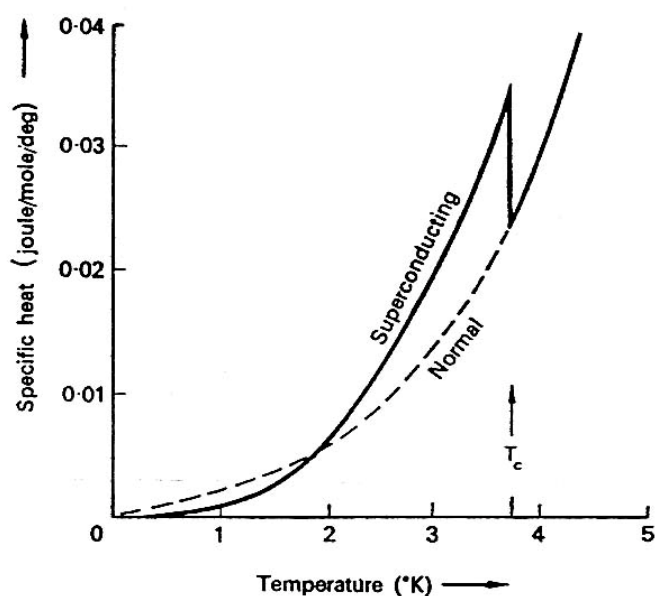
$$s_n - s_s = -\mu_0 \bar{H}_c \frac{\partial \bar{H}_c}{\partial T} \quad \text{----- (2.14)}$$

จากรูป 2.8 ความเข้มข้นแม่เหล็กวิกฤตมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชัน $\frac{\partial \bar{H}_c}{\partial T} = 0$ ที่ศูนย์สัมบูรณ์ และมีค่าเป็นลบที่อุณหภูมิ

ระหว่าง 0 ถึง T_c ดังนั้น สมการ (2.14) ด้านขวามือจึงมีค่าเป็นบวก ทำให้กล่าวได้ว่า เอนโทรปีในสถานะนำยวดยิ่งมีค่าน้อยกว่าในสถานะปกติ นั่นคือ ในสถานะนำยวดยิ่งมีความเป็นระเบียบมากกว่าในสถานะปกติ เมื่อความเข้มข้นแม่เหล็กวิกฤตมีค่าลดลงเป็นศูนย์ ($\bar{H}_c = 0$) ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิวิกฤต ผลต่างของเอนโทรปีระหว่างสถานะนำยวดยิ่งและสถานะปกติก็จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน ดังรูป 2.10



รูป 2.10 แสดงเอนโทรปีของดีบุกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง



รูป 2.11 แสดงความจุความร้อนจำเพาะของดีบุกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
ในสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของตัวนำยวดยิ่งที่ได้จากการทดลองและความร้อนแฝง (Latent heat) เป็นสมบัติอีกประการหนึ่งที่ต้องทำความเข้าใจ จากรูป 2.11 เป็นตัวอย่างในการทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของดีบุก เส้นทึบแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะของดีบุกในสถานะนำยวดยิ่ง เมื่อไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กใส่เข้าไป เส้นประเป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะในสถานะปกติ ด้วยวิธีการใส่ความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต ทำให้ดีบุกในสถานะนำยวดยิ่งถูกทำลายเปลี่ยนเป็นสถานะปกติ ซึ่งจากกราฟผลการทดลองสามารถทำนายและอธิบายได้โดยอาศัยหลักทางเทอร์โมไดนามิกส์ นั่นคือ จากความจุความร้อนจำเพาะ $C = vT \frac{\partial s}{\partial T}$ เมื่อ v คือ ปริมาตรต่อมวล และสมการ 2.14 ดังนั้น ได้ผลต่างของความจุความร้อนจำเพาะระหว่างสถานะนำยวดยิ่งและสถานะปกติ คือ

$$C_s - C_n = vT\mu_0 H_c \frac{\partial^2 H_c}{\partial T^2} + vT\mu_0 \left(\frac{\partial H_c}{\partial T} \right)^2 \quad \text{----- (2.15)}$$

ที่อุณหภูมิวิกฤต ความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตเป็นศูนย์ ($H_c = 0$) และไม่มี ความเข้มสนามแม่เหล็ก ไล่เข้าไป จากสมการ (2.15) ได้ว่า

$$(C_s - C_n)_{T_c} = vT_c\mu_0 \left(\frac{\partial H_c}{\partial T} \right)_{T_c}^2 \quad \text{----- (2.16)}$$

สมการ (2.15) และรูป 2.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อไม่ไล่ความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าไป ไม่ว่า อุณหภูมิของสารตัวนำยวดยิ่งเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม ความจุความร้อนจำเพาะมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิวิกฤต T_c หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นการเปลี่ยนสถานะโดยที่ไม่มีความ ร้อนแฝง L เข้ามาเกี่ยวข้อง จึงทำให้เกิดการกระโดดของค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิวิกฤต นั้นเอง

แม้ว่าไม่มีความร้อนแฝง ($L = 0$) ที่อุณหภูมิวิกฤต เมื่อไม่ไล่ความเข้มสนามแม่เหล็กเข้า ไปก็ตาม แต่ถ้าทำให้สารตัวนำยวดยิ่งมีการเปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตโดยการ ไล่ความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต ($H_c > 0$) เข้าไป ความร้อนแฝงสำหรับการเปลี่ยนสถานะนี้ สามารถหาได้จาก

$$L = vT(s_n - s_s) \quad \text{----- (2.17)}$$

แทนค่า $s_n - s_s$ จากสมการ (2.14) ได้ว่า

$$L = -vT\mu_0 H_c \frac{\partial H_c}{\partial T} \quad \text{----- (2.18)}$$

จากสมการ (2.17) และ (2.18) แม้ว่าความร้อนแฝงมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิวิกฤต เมื่อไม่ไล่ความเข้ม สนามแม่เหล็กเข้าไป เนื่องจากที่อุณหภูมิวิกฤตความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ ($H_c = 0$) นั้น แต่ถ้าไล่ความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต ($H_c > 0$) เข้าไป แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของ สารตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($0 < T < T_c$) ทำให้มีค่าความร้อนแฝง ($L > 0$) เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 0 ถึง T_c เอนโทรปีในสถานะปกติ s_n มีค่า

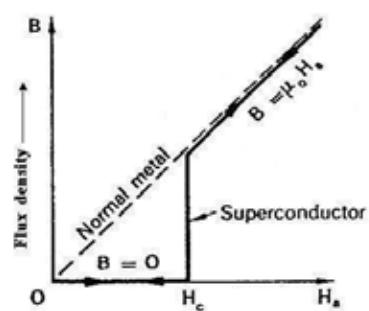
มากกว่าเอนโทรปีในสถานะนำยวดยิ่ง s_s ดังนั้น ในการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งจึงต้องการความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะ ณ อุณหภูมิคงที่ใด ๆ ที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง T_c

2.3 ชนิดของสารตัวนำยวดยิ่ง (Type of Superconductors)

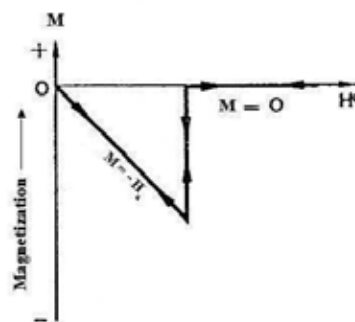
ในการจัดแบ่งชนิดของสารตัวนำยวดยิ่งนั้น อาจจัดแบ่งโดยใช้การตอบสนองต่อการเพิ่มและลดความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไป $\vec{H}_a$ เป็นเกณฑ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.3.1 สารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่หนึ่ง (Type I Superconductors)

ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T < T_c$) และมีความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างอ่อน ๆ ($\vec{H}_a < \vec{H}_c$) สนามแม่เหล็กภายในสารตัวนำยวดยิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ($\vec{B}=0$) ต่อมาฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเจาะลึกเข้าไปในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งได้ทั้งหมดทันทีที่ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตพอดี ($\vec{H}_a = \vec{H}_c$) หลังจากนั้นสารตัวนำยวดยิ่งก็จะเปลี่ยนสถานะไปเป็นสารปกติ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต ส่วนแมกนีไทเซชันมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นและกระโดดขึ้นไปมีค่าเป็นศูนย์ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤต นอกจากนี้ สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งบริสุทธิ์ชนิดที่หนึ่ง การเปลี่ยนแปลงระหว่างสภาพนำยวดยิ่งและสภาพปกติ เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ (Reversible transition) ดังรูป 2.12 ส่วนสารตัวนำยวดยิ่งไม่บริสุทธิ์ชนิดที่หนึ่ง เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible transition) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกักเก็บฟลักซ์แม่เหล็ก (Trapped flux) เอาไว้ภายในบริเวณความบกพร่อง (Defect) ของเนื้อสาร ดังรูป 2.13 สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่หนึ่งนี้ส่วนมากจะเป็นพวกธาตุเดี่ยว (Elements) มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตต่ำ นั่นคือ ที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าประมาณ 10 – 100 mT และค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิด้วย ดังสมการ (2.9) และรูป 2.14 (ก)

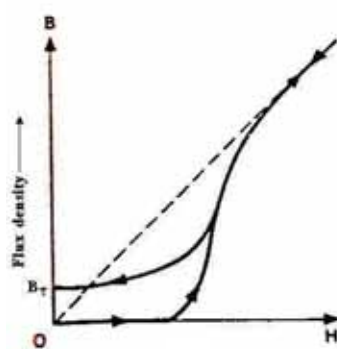


(ก)

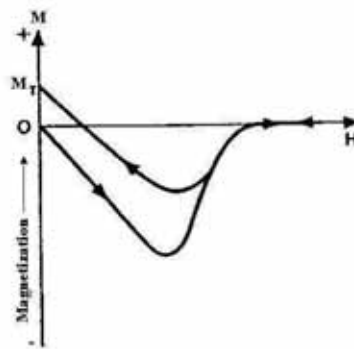


(ข)

รูป 2.12 แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยิ่งยวดชนิดที่หนึ่ง
(ก) สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสาร (ข) แมกนีไทเซชันของสาร

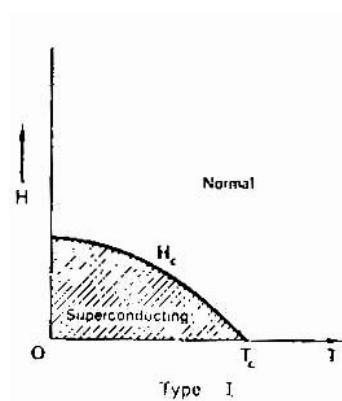


(ก)

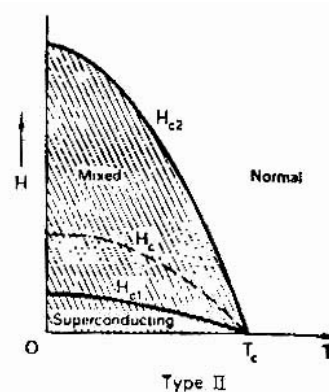


(ข)

รูป 2.13 แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยิ่งยวดชนิดที่หนึ่ง
(ก) สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสาร (ข) แมกนีไทเซชันของสาร



(ก)

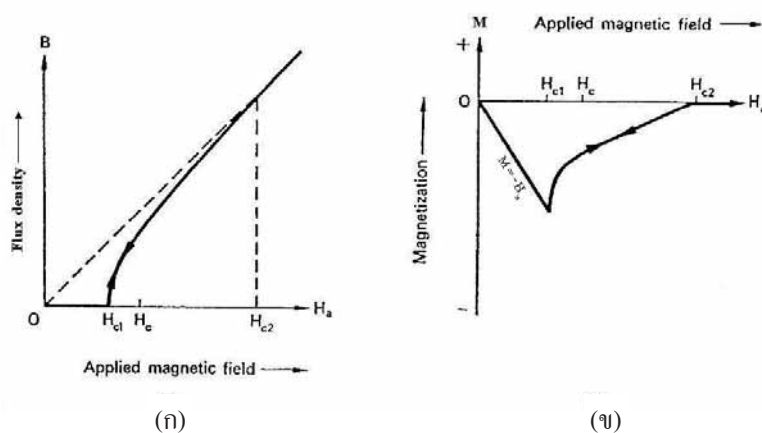


(ข)

รูป 2.14 แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตเปลี่ยนตามอุณหภูมิของสารตัวนำยิ่งยวด
(ก) ชนิดที่หนึ่ง (ข) ชนิดที่สอง

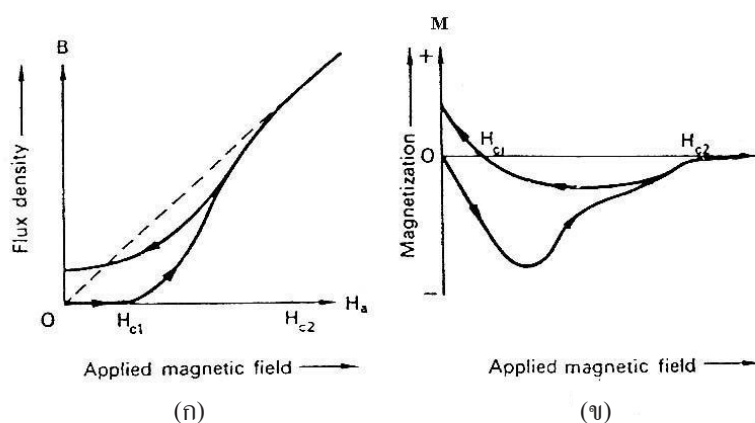
2.3.2 สารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่สอง (Type II Superconductors)

โดยทั่วไปแล้วเป็นสารพวกโลหะผสม (Alloys) และสารประกอบ (Compounds) มากกว่าที่จะเป็นธาตุเดี่ยว สารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่สองนี้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T < T_c$) จะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปในเนื้อสาร ($\vec{B}=0$) และผลักฟลักซ์แม่เหล็กออกไป หรือเป็นไดอะแมกเนติกสมบูรณ์ เมื่อใส่ความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่าไม่เกินความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับล่าง (Lower critical field ; $\vec{H}_{c1}$) ส่วนแมกนีไทเซชันมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับล่าง ($\vec{H}_{c1}$) แต่ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่านี้ และไม่เกินความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับบน (Upper critical field ; $\vec{H}_{c2}$) ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถจะลึกลงไปในเนื้อสารได้บางส่วน ทำให้ทั้งสนามแม่เหล็กและแมกนีไทเซชันมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กกำลังเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับบน ($\vec{H}_{c2}$) หลังจากนั้นสารตัวนำยวดยิ่งก็จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารปกติ ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถจะลึกลงไปในเนื้อสารได้อย่างสมบูรณ์ แมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับบน ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับบน ($\vec{H}_{c2}$) มีค่าประมาณ 100 T ซึ่งมีค่ามากกว่าสารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่หนึ่งประมาณ 1000 เท่า นอกจากนี้สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งบริสุทธิ์ชนิดที่สอง การเปลี่ยนแปลงระหว่างสภาพนำยวดยิ่งและสภาพปกติ เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ ดังรูป 2.15 ส่วนสารตัวนำยวดยิ่งไม่บริสุทธิ์ชนิดที่สอง เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ เนื่องจากเกิดการกักเก็บฟลักซ์แม่เหล็กเอาไว้ภายในบริเวณความบกพร่องของเนื้อสาร เช่นเดียวกับสารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่หนึ่ง ดังรูป 2.16 และค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิด้วยเช่นกัน ดังรูป 2.14 (ข)



รูป 2.15 แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยิ่งยวดชนิดที่สอง

(ก) สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสาร (ข) แมกนีไทเซชันของสาร

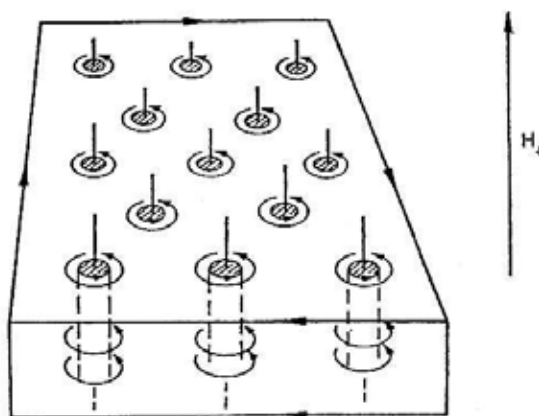


รูป 2.16 แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารตัวนำยิ่งยวดชนิดที่สอง

(ก) สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสาร (ข) แมกนีไทเซชันของสาร

ขณะที่สารตัวนำยิ่งยวดชนิดที่สองอยู่ในสถานะที่อยู่ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤตระดับล่างและระดับบนนั้น ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเจาะลึกเข้าไปได้บางส่วน จึงเรียกสถานะของสารตัวนำยิ่งยวดในสถานะนี้ว่า “สถานะผสม (Mixed state)” บุคคลที่ค้นพบสถานะผสมนี้เป็นคนแรก คือ Abrikosov ในปี ค.ศ. 1957 พิจารณาฟลักซ์แม่เหล็กเจาะลึกเข้าไปในเนื้อสารบางส่วนที่เป็นบริเวณสถานะปกติรูปทรงกระบอก เรียกว่า “วอร์เท็กซ์ (Vortex)” แต่ละวอร์เท็กซ์มีลักษณะเหมือนเป็นโซลินอยด์ที่มีควอนตัมฟลักซ์แม่เหล็กเดี่ยว (Single quantum of magnetic flux) หรือ ฟลักซอน (Fluxon) $\phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.0679 \times 10^{-15}$ เวเบอร์ และมีกระแสไฟฟ้า

ไหลวนรอบ ๆ ขอบของวอร์เท็กซ์บริเวณเนื้อสารส่วนที่มีสถานะเป็นสถานะนำยวดยิ่งและมีสนามแม่เหล็ก $\vec{B}=0$ หรือมีสภาพต้านทานไฟฟ้า $\rho=0$ แทรกอยู่ระหว่างวอร์เท็กซ์ ดังรูป 2.17 สมมติว่ามีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบวอร์เท็กซ์ภายในเนื้อสาร $\vec{J}$ ทำให้เกิดแรงต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่กระทำต่อวอร์เท็กซ์ $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{\Phi}_0$ เมื่อ $\vec{\Phi}_0$ คือ เวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ $\frac{h}{2e}$ มีทิศเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กก่อให้เกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ดังกล่าวกับ เวกเตอร์ $\vec{\Phi}_0$ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กแทรกเข้าไปได้ในบริเวณที่เป็นจุดบกพร่อง (Impurities) เช่น ดิสโลเคชัน (Dislocations) และขอบของเกรน (Grain boundaries) เป็นต้น



รูป 2.17 แสดงสถานะผสมของสารตัวนำยวดยิ่งชนิดที่สอง

2.4 ทฤษฎีปรากฏการณ์นำยวดยิ่ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองและทฤษฎีปรากฏการณ์นำยวดยิ่งในระยะแรกๆ ตั้งแต่แบบจำลองการไหลคู่ (Two-fluid model) ของกอร์เทอร์-แคซิเมียร์ (Gorter-Casimir), ทฤษฎีลอนดอน (The London theory), การทดลองของปีปปาร์ด (Pippard non-local electrodynamics), ทฤษฎีกินซ์เบิร์ก-แลนดาว (The Ginzburg-Landau theory) ไปจนถึงทฤษฎีบีซีเอส (The BCS theory) ที่ได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์นำยวดยิ่ง

ในเบื้องต้นเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า ภายในสารตัวนำยวดยิ่งนั้น มีอิเล็กตรอนบางส่วนเกิด การควบแน่น (Condensate) หรือเกิด มหโมเลกุล (Macromolecule) ขึ้น แล้วเกิด

การไหลวดยิ่ง (Superfluid) อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และมีการควบแน่นอย่างสมบูรณ์ทั่วทั้งปริมาตรทั้งหมดเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไปจนถึงศูนย์สัมบูรณ์ ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น อิเล็กตรอนบางส่วนเกิดการระเหยกกลับมาอยู่ในรูปแบบของอันตรกิริยาตามปกติของเฟอร์มิจนกระทั่งที่อุณหภูมิวิกฤต อิเล็กตรอนทุกตัวจึงเกิดการระเหยกได้อย่างสมบูรณ์

2.4.1 แบบจำลองการไหลคู่ (Two-fluid model)

แบบจำลองนี้คิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1934 โดย กอร์เทอร์และแคซิมีร์ (Gorter and Casimir) ซึ่งได้อธิบายไว้โดยอาศัยแนวคิดมาจาก สมบัติการไหลวดยิ่งของฮีเลียม (อิเล็กตรอนและนิวเคลียสของฮีเลียมมีสปินเป็นศูนย์หรือมีพฤติกรรมเป็นโบซอน (Boson) นั่นเอง) มาใช้ในการอธิบายสภาพนำไฟฟ้าวดยิ่งของสารตัวนำวดยิ่ง กล่าวคือ พิจารณาอะตอมของฮีเลียมในสองส่วน ส่วนที่หนึ่ง อะตอมควบแน่นอยู่ในสถานะพื้นแบบโบส-ไอน์สไตน์ ทำให้เกิดการไหลวดยิ่งของฮีเลียม ส่วนที่สอง อะตอมของฮีเลียมอยู่ในสถานะปกติ ในขณะที่ถ้าเป็นสารตัวนำวดยิ่ง สมมติให้ $n = N/V$ คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนการนำ เมื่อ N คือ จำนวนอิเล็กตรอนการนำทั้งหมดที่อยู่ในสารตัวนำวดยิ่งปริมาตร V กำหนดให้ n_n กับ n_s คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนการนำในสถานะปกติและสถานะนำวดยิ่ง ตามลำดับ จะได้ว่า $n = n_n + n_s$ และ $x = n_n/n$ คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นอิเล็กตรอนการนำในสถานะปกติกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนการนำทั้งหมด, $1 - x$ คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นอิเล็กตรอนการนำในสถานะนำวดยิ่งกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนการนำทั้งหมด และใช้สมมติฐานว่าสมการพลังงานอิสระของอิเล็กตรอนการนำของสารตัวนำวดยิ่ง

$$F(x, T) = \sqrt{x} f_n(T) + (1 - x) f_s(T) \quad \text{----- (2.19)}$$

เมื่อ $f_n(T)$ และ $f_s(T)$ มีค่าเป็น

$$f_n(T) = -\frac{\gamma T^2}{2} \quad \text{----- (2.20)}$$

$$f_s(T) = -\beta \quad (\text{ค่าคงที่}) \quad \text{----- (2.21)}$$

สมการ (2.20) เป็นพลังงานอิสระของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะปกติ ซึ่งมีค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็น γT (เชิงเส้น) ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ สมการ (2.21) เป็นพลังงานอิสระของอิเล็กตรอนนำวยวดยิ่งที่เกิดจากการควบแน่นและเกิดการไหลยวดยิ่งได้ พลังงานอิสระนี้มีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่อสารตัวนำวยวดยิ่งเข้าสู่สมดุลของสถานะ พลังงานอิสระ $F(x, T)$ มีค่าต่ำสุด จากสมการ (2.19) ได้ค่าอนุพันธ์ของพลังงานอิสระเทียบกับ x เท่ากับศูนย์ และได้ค่า x ที่อุณหภูมิ T ใด ๆ สามารถหาได้จากสมการ (2.22)

$$x = \frac{1}{16} \frac{\gamma^2}{\beta^2} T^4 \quad \text{----- (2.22)}$$

จากสมการ (2.22) ที่อุณหภูมิจุดวิกฤต T_c ได้ว่า $x = 1$ และ

$$T_c^2 = \frac{4\beta}{\gamma} \quad \text{----- (2.23)}$$

เพราะฉะนั้น จากสมการ (2.22) แทนค่าด้วยสมการ (2.23) ได้ว่า

$$x = \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \quad \text{----- (2.24)}$$

ดังนั้น จากสมการ (2.19) ได้ค่าพลังงานอิสระที่ขึ้นกับอุณหภูมิ T ใด ๆ สำหรับอิเล็กตรอนนำวยวดยิ่ง ($x \rightarrow 0$) และอิเล็กตรอนอิสระในโลหะปกติ ($x \rightarrow 1$) ตามลำดับ คือ

$$F_s(T) = -\beta \left[1 + \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right] \quad \text{----- (2.25)}$$

$$F_n(T) = -\frac{\gamma T^2}{2} = -2\beta \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \quad \text{----- (2.26)}$$

จากความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับสนามแม่เหล็กวิกฤต ได้ว่า

$$F_s(T) + \frac{1}{2}\mu_0 H_c^2 = F_n(T) \quad \text{----- (2.27)}$$

จากสมการ (2.27) จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}\mu_0 H_c^2 = F_n(T) - F_s(T) = \beta \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^2$$

หรือ

$$H_c(T) = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad \text{----- (2.28)}$$

เมื่อ $H_0 = \sqrt{\frac{2\beta}{\mu_0}}$

ได้ค่าความจุความร้อนจำเพาะในสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง คือ

$$c_n = -T \frac{\partial^2 F_n(T)}{\partial T^2} = \gamma T \quad \text{----- (2.29)}$$

$$c_s = 3\gamma T_c \left(\frac{T}{T_c} \right)^3 \quad \text{----- (2.30)}$$

จากค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารตัวนำยวดยิ่งในสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง แสดงให้เห็นถึงการกระโดดของค่าความจุความร้อนจำเพาะ ซึ่งเป็นที่ยอมรับและสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีอัตราส่วนของค่าความจุความร้อนจำเพาะในสถานะนำยวดยิ่งกับสถานะปกติที่อุณหภูมิวิกฤต c_s/c_n เท่ากับ 3

2.4.2 ทฤษฎีลอนดอน (The London theory)

ในปี ค.ศ. 1935 สองพี่น้อง Heinz และ Fritz London ได้พยายามอธิบายเกี่ยวกับสภาพนำยวดยิ่งและปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์-โอเชินฟีลด์ โดยได้ยึดเอาแนวความคิดของแบบจำลองการไหลคู่ ที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนไหลยวดยิ่ง n_s และความหนาแน่นอิเล็กตรอนไหลปกติ n_n มีความเร็วเป็น $\vec{v}_s$ และ $\vec{v}_n$ ตามลำดับ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนทั้งสองสถานะมีความสัมพันธ์กัน คือ

$$n_s + n_n = n \quad \text{-----} \quad (2.31)$$

เมื่อ n คือ จำนวนอิเล็กตรอนการนำต่อหน่วยปริมาตร, $n_s(T_c) = 0$ และ $n_s(0) = n$ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งในสถานะนำยวดยิ่งและสถานะปกติ คือ

$$\vec{J}_s = -en_s \vec{v}_s \quad \text{-----} \quad (2.32)$$

$$\vec{J}_n = -en_n \vec{v}_n \quad \text{-----} \quad (2.33)$$

ในสารตัวนำยวดยิ่ง พบว่า อิเล็กตรอนนำยวดยิ่งมีการเคลื่อนที่โดยปราศจากความต้านทาน ดังนั้นถ้าสมมติว่ามีสนามไฟฟ้าคงที่ $\vec{E}$ ใส่เข้าไปภายในสารตัวนำยวดยิ่ง อิเล็กตรอนนำยวดยิ่งจะถูกเร่งจากหยุดนิ่งด้วยสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ นี้ นั่นคือ

$$m\dot{\vec{v}}_s = -e\vec{E} \quad \text{-----} \quad (2.34)$$

เมื่อ m และ e คือ มวลและประจุของอิเล็กตรอนนำยวดยิ่ง ตามลำดับ จากสมการ (2.32) และ (2.34) จะได้ว่า

$$\dot{\vec{J}}_s = \frac{n_s e^2}{m} \vec{E} \quad \text{-----} \quad (2.35)$$

จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)

$$\dot{\vec{B}} = -\nabla \times \vec{E} \quad \text{----- (2.36)}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_s + \dot{\vec{D}}) \quad \text{----- (2.37)}$$

และ $\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{----- (2.38)}$

ดังนั้น จากสมการ (2.35) และสมการของแมกซ์เวลล์ (2.36) ได้ว่า

$$\nabla \times \vec{J}_s = -\frac{n_s e^2}{m} \vec{B} \quad \text{----- (2.39)}$$

จากสมการของแมกซ์เวลล์ (2.37) และ (2.38) โดยการละทิ้งพจน์ของกระแสการกระจัด $\dot{\vec{D}}$ และกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนปกติ ทำให้ได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \nabla \times \vec{J}_s \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} &= \mu_0 \nabla \times \vec{J}_s \\ -\nabla^2 \vec{B} &= \frac{-\mu_0 n_s e^2}{m} \vec{B} \\ \nabla^2 \vec{B} &= \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \vec{B} \\ \nabla^2 \vec{B} &= \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B} \quad \text{----- (2.40)} \end{aligned}$$

สมการ (2.39) และ (2.40) เรียกว่า สมการของลอนดอน (London equation) เมื่อ λ_L คือ ระยะเจาะลึกของลอนดอน (London penetration depth) หรือ

$$\lambda_L(T) = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}} \quad \text{----- (2.41)}$$

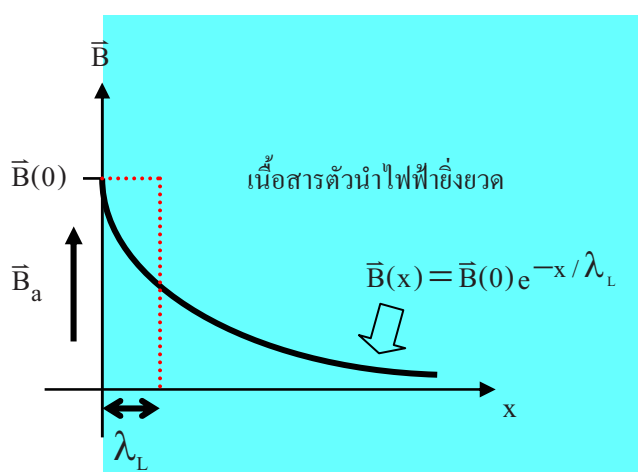
จากการคำนวณระยะเจาะลึกของลอนคอนมีค่าประมาณอยู่ในระดับ 300 อังสตรอม
จากสมการ (2.40) ได้ผลเฉลยคำตอบของสมการทั่วไปในหนึ่งมิติ คือ

$$\bar{B}(x) = \bar{A}e^{x/\lambda_L} + \bar{B}e^{-x/\lambda_L} \quad \text{-----} (2.42)$$

ที่ $x > 0$ โดยการกำหนดเงื่อนไข $\bar{B}(x) = \bar{B}(0)$ ที่ $x = 0$ และ $\bar{B}(x) = 0$ ที่ $x = \infty$ ได้ว่า

$$\bar{B}(x) = \bar{B}(0)e^{-x/\lambda_L} \quad \text{-----} (2.43)$$

สมการ (2.43) แสดงให้เห็นแล้วว่า สนามแม่เหล็กมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ภายในเนื้อสารตัวนำ
ยวดยิ่งที่มีความหนามาก ๆ ($x > 0$) ดังรูป 2.18 และสามารถหาระยะเจาะลึกของลอนคอน λ_L ได้
จากสมการ (2.44)



รูป 2.18 แสดงระยะเจาะลึกของลอนคอน λ_L เกิดจากสนามแม่เหล็ก
เจาะลึกเข้าไปในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความหนามาก ๆ

$$\int_0^{\infty} \bar{B}(x) dx = \lambda_L \bar{B}(0) \quad \text{-----} (2.44)$$

จากสมการ (2.41) เมื่อ $T \rightarrow T_c$ แล้ว $n_s \rightarrow 0$ และ $\lambda_L \rightarrow \infty$ ในขณะเดียวกัน เมื่อ $T \rightarrow 0$ แล้ว $n_s \rightarrow n$ ทำให้ได้ว่า

$$\lambda_L(0) = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n e^2}} \quad \text{----- (2.45)}$$

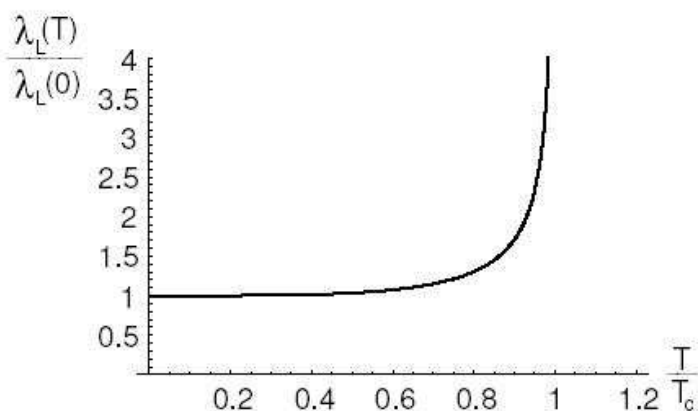
จากแบบจำลองการไหลคู่ของกอร์เทอร์และแคซิเมียร์ ได้ว่า

$$\frac{n_s}{n} = 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \quad \text{----- (2.46)}$$

จากสมการ (2.41) (2.45) และ (2.46) แทนค่า n_s และ n ได้ว่า

$$\lambda_L(T) = \frac{\lambda_L(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4}} \quad \text{----- (2.47)}$$

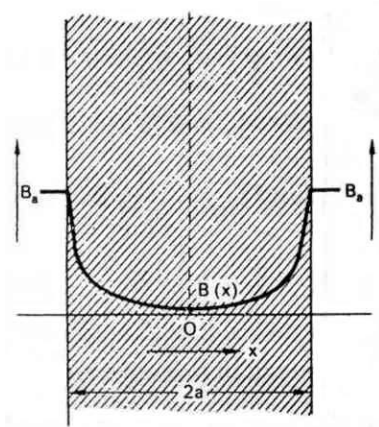
สมการ (2.47) สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเจาะลึกของลอนดอนกับอุณหภูมิได้ ดังรูป 2.19



รูป 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเจาะลึกของลอนดอนกับอุณหภูมิ

สมการ (2.47) แสดงให้เห็นแล้วว่า สนามแม่เหล็กจะไม่ถูกผลักออกจากสารตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิวิกฤต T_c และ $\lambda_L = \infty$ แต่อย่างไรก็ตาม รูป 2.19 แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T < T_c$) ระยะเจาะลึกของลอนดอน (λ_L) มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นคือสนามแม่เหล็กถูกผลักออกจากสารตัวนำยวดยิ่ง เกิดปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ขึ้น

ในการประยุกต์ใช้สมการของลอนดอนกับสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความหนาจำกัดนั้นสามารถทำได้ คือ จากสมการของลอนดอน (2.40) ได้ผลเฉลยคำตอบของสมการทั่วไปดังสมการ (2.42) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กสามารถซึมเข้าไปในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งได้อย่างเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังรูป 2.20



รูป 2.20 แสดงสนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความหนาจำกัด $2a$

จากรูป 2.20 เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B_a ให้ขนานกับผิวของตัวนำยวดยิ่งที่มีความหนา $2a$ และให้จุดกึ่งกลางของตัวนำยวดยิ่งเป็นจุดเริ่มต้น เนื่องจากการให้สนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอจะได้ว่า

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial y} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial z} = 0 \quad \text{----- (2.48)}$$

เขียนสมการ (2.40) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \vec{B}(x)}{\partial x^2} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B}(x) \quad \text{----- (2.49)}$$

ได้คำตอบของสมการทั่วไปเป็น

$$\bar{B}(x) = \bar{B}_1 e^{x/\lambda_L} + \bar{B}_2 e^{-x/\lambda_L} \quad \text{-----} \quad (2.50)$$

เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ให้กับตัวนำวยดัยมีความสม่ำเสมอและตัวนำวยดัยมีความสมมาตร ดังนั้น จะได้ว่า $\bar{B}_1 = \bar{B}_2$ และสมการ (2.50) สามารถเขียนได้ว่า

$$\bar{B}(x) = \bar{B}_1 (e^{x/\lambda_L} + e^{-x/\lambda_L}) \quad \text{-----} \quad (2.51)$$

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต เมื่อ $x = \pm a$ จะได้ว่า

$$\bar{B}(x=a) = \bar{B}_a = \bar{B}_1 (e^{a/\lambda_L} + e^{-a/\lambda_L}) \quad \text{-----} \quad (2.52)$$

และ

$$\bar{B}(x=-a) = \bar{B}_a = \bar{B}_1 (e^{-a/\lambda_L} + e^{a/\lambda_L}) \quad \text{-----} \quad (2.53)$$

จากสมการ (2.52) และ (2.53) จะได้ว่า

$$2\bar{B}_a = 2\bar{B}_1 (e^{a/\lambda_L} + e^{-a/\lambda_L}) \quad \text{-----} \quad (2.54)$$

หรือ

$$\bar{B}_1 = \frac{\bar{B}_a}{e^{a/\lambda_L} + e^{-a/\lambda_L}} \quad \text{-----} \quad (2.55)$$

แทนค่า $\bar{B}_1$ ในสมการ (2.51) จะได้ว่า

$$\bar{B}(x) = \bar{B}_a \left(\frac{e^{x/\lambda_L} + e^{-x/\lambda_L}}{e^{a/\lambda_L} + e^{-a/\lambda_L}} \right) \quad \text{-----} \quad (2.56)$$

หรือ

$$\bar{B}(x) = \bar{B}_a \left(\frac{\cosh(x/\lambda_L)}{\cosh(a/\lambda_L)} \right) \quad \text{-----} \quad (2.57)$$

จากสมการ (2.57) จะเห็นได้ว่า สนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปตามค่า $\cosh(x/\lambda_L)$ และถ้าสารตัวนำยวดยิ่งมีความหนาแน่นมากกว่าระยะเจาะลึกของลอนดอนมาก ๆ สนามแม่เหล็กจะซึมเข้าไปในเนื้อของสารตัวนำยวดยิ่งได้น้อยลง

2.4.3 ไฟฟ้าพลศาสตร์เคลื่อนที่ของปีปปาร์ด (Pippard non-local electrodynamics)

สมการของลอนดอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ใช้อธิบายปรากฏการณ์ไมสเนอร์ได้ดี แต่ในรายละเอียดบางส่วนให้ผลไม่สอดคล้องกับผลการทดลองของ A.B. Pippard ซึ่งเขาได้ทดลองทำการลดระยะเฉลี่ยปลอดการชน (Mean free path - ℓ) ของอิเล็กตรอน โดยการเพิ่มปริมาณสารเจือปนเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่ง แล้ววัดค่าระยะเจาะลึกของสาร พบว่า การทำเช่นนี้ทำให้สมบัติทางความร้อนของสาร คือ สนามแม่เหล็กวิกฤต H_c และอุณหภูมิวิกฤต T_c มีการเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก หากแต่ทำให้ระยะเจาะลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก Pippard จึงสรุปได้ว่าค่าระยะเจาะลึกของสารตัวนำยวดยิ่งนอกจากจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิแล้วยังขึ้นอยู่กับระยะเฉลี่ยปลอดการชนของอิเล็กตรอน ℓ ด้วย ตัวอย่างเช่น การทดลองหาระยะเจาะลึกของดีบุกเจือปนด้วยอินเดียม 3 % ระยะเจาะลึกจะมีค่ามากกว่าเป็นสองเท่าของดีบุกบริสุทธิ์ โดยที่สนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤตมีการเปลี่ยนแปลงในเปอร์เซ็นต์ที่น้อยมาก การที่สมบัติทางความร้อน H_c และ T_c ไม่เปลี่ยนแปลงไปนั้นย่อมแสดงว่าจำนวนอิเล็กตรอนนำยวดยิ่ง n_s ไม่เปลี่ยนแปลง และระยะเจาะลึกของลอนดอน λ_L ในสมการ (2.41) ก็ไม่ควรเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการของลอนดอนไม่สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้

ในการอธิบายผลการทดลองดังกล่าวในปี ค.ศ. 1953 Pippard ได้อาศัยแนวความคิดความสัมพันธ์ไฟฟ้าพลศาสตร์เฉพาะที่ (Local electrodynamics relation) ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านำยวดยิ่ง $\vec{J}_s$ กับศักย์เวกเตอร์ $\vec{A}$ ที่จุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}(\mathbf{r})$ ที่จุดนั้นเท่านั้น คือ จากสมการของลอนดอน (2.39) และสมการศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก $\vec{B}(\mathbf{r}) = \nabla \times \vec{A}(\mathbf{r})$ ทำให้ได้สมการทั่วไปของ Pippard

$$\vec{J}_s(\mathbf{r}) = -\frac{n_s e^2}{m} \vec{A}(\mathbf{r}) \quad \text{-----} \quad (2.58)$$

จากสมการ (2.58) นี้ Pippard ได้ขยายแนวความคิดต่อไปอีก โดยเสนอใช้ความสัมพันธ์ไฟฟ้าพลศาสตร์เคลื่อนที่ (Non-local electrodynamics relation) ของ Chambers สมการ (2.62) จากความจริงที่ว่าฟังก์ชันคลื่น (Wave function) ของอิเล็กตรอนในสถานะนำยวดยิ่งนั้นไม่ถูกประจำที่ (not localized) ทำให้ $\vec{J}_s$ ที่จุดจุดหนึ่งนั้นได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กรอบ ๆ จุดนั้นในรัศมี ξ ซึ่ง Pippard ได้ตั้งสมมติฐานไว้แล้วก่อนหน้านี้ว่า อิเล็กตรอนนำยวดยิ่งแต่ละตัวจะมีอันตรกิริยาอย่างแรง (Strong interaction) กระทำซึ่งกันและกันภายในระยะทาง ξ และเรียกระยะ ξ นี้ว่า “ระยะอาพันธ์ (Coherent length)” นั่นคือ อิเล็กตรอนนำยวดยิ่งแต่ละตัวอยู่ห่างกันเป็นระยะ ξ และภายในรัศมี ξ นี้ สมบัติของอิเล็กตรอนนำยวดยิ่งจะไม่มีเปลี่ยนแปลงในการหาค่าระยะอาพันธ์นี้ อาจหาได้จากหลักความไม่แน่นอน (Uncertainty Principle) โดยพิจารณาจากการที่อิเล็กตรอนนำยวดยิ่งมีพลังงานประมาณ $k_B T_c$ อยู่ในชั้นระดับพลังงานไม่เกิน

พลังงานเฟอร์มีและพลังงานอิเล็กตรอนอิสระมีค่าเป็น $\frac{p^2}{2m}$ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระนี้มีโมเมนตัมที่

เปลี่ยนแปลงไปเป็น $\Delta p \sim \frac{k_B T_c}{v_F}$ เมื่อ v_F คือ ความเร็วเฟอร์มีจากหลักความไม่แน่นอน

$\Delta x \sim \frac{\hbar}{\Delta p} \sim \frac{\hbar v_F}{k_B T_c}$ ดังนั้น ระยะลักษณะเฉพาะ Δx นี้จึงสามารถนิยามได้ว่า คือ ระยะอาพันธ์

ของ Pippard นั่นเอง ดังสมการ (2.59)

$$\xi_0 = \alpha \frac{\hbar v_F}{k_B T_c} \quad \text{-----} \quad (2.59)$$

เมื่อ α มีค่าเท่ากับ 1 (สำหรับทฤษฎี BCS แล้ว α มีค่าเท่ากับ 0.18)

จากความสัมพันธ์เคลื่อนที่ของ Chambers ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับสนามไฟฟ้าในโลหะปกติ พบว่า ความสัมพันธ์นี้เป็นคำตอบของสมการโบลต์ซมันน์กรณีที่มีการกระเจิงภายในระยะเฉลี่ยปลอดการชน ℓ อยู่ในรูปของสมการทั่วไปเป็นไปตามกฎของโอห์ม $\vec{J}(\mathbf{r}) = \sigma \vec{E}(\mathbf{r})$ คือ

$$\vec{J}(\mathbf{r}) = \frac{3\sigma}{4\pi\ell} \int \frac{\vec{R}(\vec{R} \cdot \vec{E}(\mathbf{r}')) e^{-R/\ell}}{R^4} d^3 \vec{r}' \quad \text{-----} \quad (2.60)$$

เมื่อ $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$

ถ้า $\vec{E}(r)$ เข้าใกล้ค่าคงที่ภายในปริมาตรที่มีรัศมี ℓ จะได้ว่า

$$\vec{E}(r) \cdot \vec{J}(r) = \frac{3\sigma}{4\pi\ell} |\vec{E}(r)|^2 \int \frac{\cos^2 \theta e^{-R/\ell}}{R^2} d^3 \vec{r}' = \sigma |\vec{E}(r)|^2 \text{-----} (2.61)$$

ซึ่งก็คือกฎของโอห์มนั่นเอง จากสมการทั่วไปของ Pippard (2.58) จะได้ว่า

$$\vec{J}(r) = -\frac{3\sigma}{4\pi\xi_0\Lambda} \int \frac{\vec{R}(\vec{R} \cdot \vec{A}(r')) e^{-R/\xi_0}}{R^4} d^3 \vec{r}' \text{-----} (2.62)$$

$$\text{เมื่อ } \Lambda = \frac{m}{n_s e^2} \text{ และ } \vec{A}(r) = \frac{3\sigma}{4\pi\xi_0} \int \frac{\vec{R}(\vec{R} \cdot \vec{A}(r')) e^{-R/\xi_0}}{R^4} d^3 \vec{r}'$$

นอกจากนี้ Pippard ยังคิดต่อไปอีกว่า ถ้าระยะอาพันธ์มีค่ามากกว่าระยะเจาะลึกของลอนดอน ($\xi > \lambda_L$) แล้ว สนามแม่เหล็กในบริเวณ ξ จะมีการเปลี่ยนแปลงมาก เพราะฉะนั้นในการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแนวดยิ่ง $\vec{J}_s$ ที่จุด ๆ หนึ่งนั้น จะต้องทำการอินทิเกรตอิทธิพลของสนามแม่เหล็กในระยะ ξ ทั้งหมด ดังสมการ (2.62) แต่ถ้าระยะอาพันธ์มีค่าน้อยกว่าระยะเจาะลึกของลอนดอนมาก ๆ ($\xi \ll \lambda_L$) สนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ในระยะ ξ รอบ ๆ จุด ทำให้สมการของลอนดอนใช้ได้เป็นอย่างดี ดังนั้น ระยะเจาะลึกที่แท้จริง λ จึงขึ้นอยู่กับทั้งระยะเจาะลึกของลอนดอน λ_L และระยะอาพันธ์ ξ ด้วย แบ่งออกได้ 3 กรณี คือ

2.4.3.1 สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งบริสุทธิ์ มีระยะอาพันธ์ ξ_0 (v_F มีค่ามาก ๆ หรือ T_c มีค่าน้อย ๆ) Pippard แสดงให้เห็นว่า

$$\lambda = 0.65 \lambda_L \sqrt[3]{\frac{\xi_0}{\lambda_L}} \text{-----} (2.63)$$

$$\text{เมื่อ } \xi^3 \gg \xi_0 \lambda_L^2$$

พบว่า ถ้า $\frac{\xi_0}{\lambda}$ มีค่ามาก ๆ แล้ว จะได้ว่า λ มีค่ามากกว่า λ_L

2.4.3.2 สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งไม่บริสุทธิ์ มีระยะเฉลี่ยปลอดการชน ℓ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระยะอาพันธ์บริสุทธิ์ ξ_0 มากๆ ทำให้ได้ค่า $\xi \approx \ell$ และ $\xi_0 \gg \xi$ ดังสมการ (2.63) ในกรณีนี้ Pippard แสดงให้เห็นว่า

$$\lambda = \lambda_L \sqrt{\frac{\xi_0}{\xi}} \approx \lambda_L \sqrt{\frac{\xi_0}{\ell}} \quad \text{----- (2.64)}$$

เมื่อ $\xi^3 \ll \xi_0 \lambda_L^2$

พบว่า λ ก็ยังคงมีค่ามากกว่า λ_L

โดยอาศัยแนวความคิดจากระยะเฉลี่ยปลอดการชนของอิเล็กตรอนในโลหะผสมปกติ Pippard ยังได้พิจารณาอีกว่า ระยะอาพันธ์ ξ ยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารเจือปน (Impurity scattering) อีกด้วย ถ้าให้ ξ_0 คือ ระยะอาพันธ์ในกรณีที่ไม่มีสารเจือปน และ ℓ คือ ระยะเฉลี่ยปลอดการชนของอิเล็กตรอน จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{\xi_0} + \frac{1}{\ell} \quad \text{----- (2.65)}$$

จากสมการ (2.63) โดยปกติ $\xi_0 > \ell$ เรียกว่า **ลิมิตบริสุทธิ์ (Clean limit)** แต่ถ้าเพิ่มปริมาณสารเจือปนเข้าไปในสารตัวนำยวดยิ่งแล้ว ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการชนและกระเจิงมากยิ่งขึ้น ทำให้ $\xi_0 \gg \ell$ ส่งผลทำให้ค่า $\xi \approx \ell$ เรียกว่า **ลิมิตปนเปื้อน (Dirty limit)**

2.4.4 ทฤษฎีกินซ์เบิร์ก-แลนดาว (The Ginzburg-Landau theory)

กินซ์เบิร์กและแลนดาว ได้ตีพิมพ์ทฤษฎีสถาพนำยวดยิ่งในปี ค.ศ. 1950 ก่อนหน้าที่จะมีการตีพิมพ์ทฤษฎี BCS ถึง 7 ปี (ค.ศ. 1957) เรียกว่า “**ทฤษฎีกินซ์เบิร์ก-แลนดาว**” ทฤษฎีนี้มีส่วนสำคัญในการขยายเพิ่มเติมทฤษฎีของลอนดอน โดยได้มีการกำหนดพารามิเตอร์ขึ้นมาใช้ในทฤษฎีนี้ คือ “**พารามิเตอร์ความเป็นระเบียบ (Order parameter)**” ใช้ฟังก์ชันคลื่นเชิงซ้อน (Complex wave function) ψ แทนพารามิเตอร์ความเป็นระเบียบ เพื่อใช้บรรยายอิเล็กตรอนนำยวดยิ่งที่มีความเป็นระเบียบในสถานะนำยวดยิ่ง มีค่าเป็นศูนย์ ($\psi = 0$) ที่อุณหภูมิ

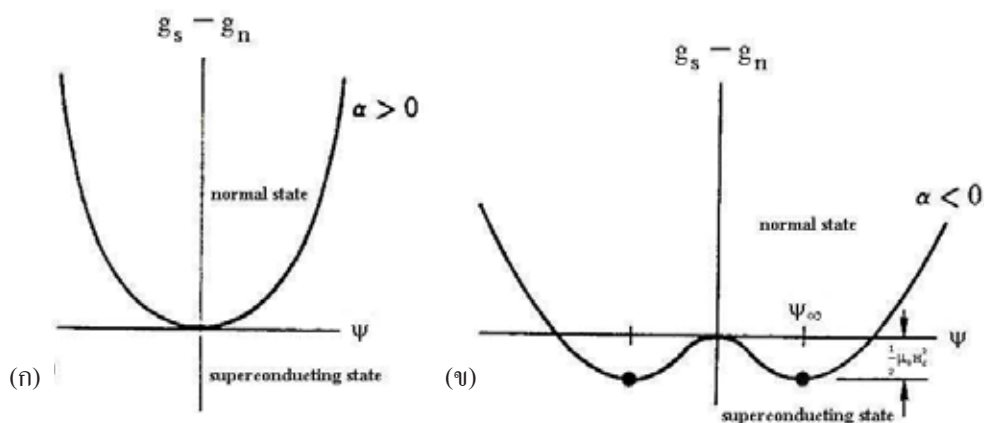
วิกฤต T_c และมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\psi = 1$) ที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ปริมาณ $|\psi(r)|^2$ คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนนำวยวดยิ่งประจำที่ (n_s) มีค่าเป็นบวก

$$n_s = \frac{N_s}{V} = |\psi(r)|^2 \quad \text{----- (2.66)}$$

เมื่อสารตัวนำวยวดยิ่งอยู่ในสถานะนำวยวดยิ่งที่ $T < T_c$ และ $T \rightarrow T_c$ แล้ว ค่า $|\psi(r)|^2 \rightarrow 0$ ทำให้ $\psi(r)$ มีค่าน้อย ๆ จากฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์ของสถานะนำวยวดยิ่ง g_s สามารถเขียนได้ในรูปการขยายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนนำวยวดยิ่ง $|\psi(r)|^2$ คือ

$$g_s = g_n + \alpha |\psi|^2 + \frac{1}{2} \beta |\psi|^4 + \dots \quad \text{----- (2.67)}$$

เมื่อ g_n เป็นความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์ในสถานะปกติ และ α, β เป็นพารามิเตอร์



รูป 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์กับพารามิเตอร์ความเป็นระเบียบ

(ก) เมื่อ α, β มีค่าเป็นบวกและจุดสมดุลมีพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ $\psi = 0$

(ข) เมื่อ α มีค่าเป็นลบ β มีค่าเป็นบวกและจุดสมดุลมีพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ $\psi = \psi_0$

ในการประมาณค่าฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์ สมการ (2.67) เมื่อ $T \rightarrow T_c$ นั้นสามารถละทิ้งตั้งแต่พจน์ที่สี่ด้านขวามือของสมการ (2.67) ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า $g_s = g_n$ เมื่อ $\psi = 0$

($T \geq T_c$) และ $g_s < g_n$ เมื่อ $\psi > 0$ ($T < T_c$) และ α, β ที่เป็นไปได้จะต้องมีค่าเป็นลบและบวกตามลำดับ ด้วยเหตุผลดังนี้ คือ

2.4.4.1 β มีค่าเป็นบวก เนื่องจากทำให้สมการ (2.67) สามารถหาค่าความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์น้อยที่สุดได้ที่จุดสมดุล

2.4.4.2 α มีค่าเป็นลบ เนื่องจากทำให้ g_s มีโอกาสที่จะมีค่าน้อยกว่า g_n ที่ $T < T_c$ ดังรูป 2.21 (ข)

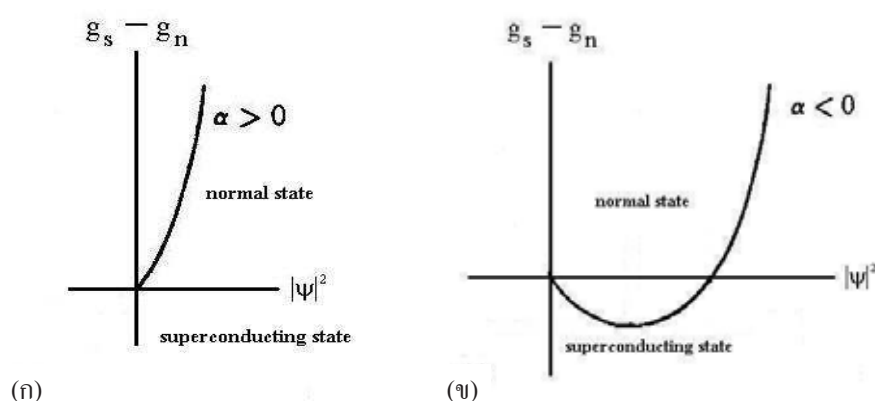
2.4.4.3 α มีค่าเป็นบวก เมื่อ $T > T_c$ และ $\psi = 0$ ดังรูป 2.21 (ก)
ดังนั้น พารามิเตอร์ α สามารถขยายให้อยู่ในรูปของอนุกรมเทเลอร์ของอุณหภูมิลดทอน

(Reduced temperature) $t = \frac{T}{T_c}$ และประมาณค่าได้ถึงพจน์ที่สอง เมื่อ $T \rightarrow T_c$

$$\alpha(T) = \alpha(0)(t - 1) \quad ; \quad \alpha(0) > 0 \quad \text{-----} \quad (2.68)$$

ส่วนพารามิเตอร์ β มีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

$$\beta(T) = \beta(0) \quad \text{-----} \quad (2.69)$$



รูป 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานอิสระกิบส์กับความหนาแน่น

อิเล็กตรอนนำวยิ่ง ($n_s = |\psi|^2$)

(ก) เมื่อ α มีค่าเป็นบวก พลังงานอิสระมีค่าต่ำสุดที่ $|\psi|^2 = 0$

(ข) เมื่อ α มีค่าเป็นลบ ณ จุดสมดุล พลังงานอิสระมีค่าต่ำสุดที่ $|\psi|^2 = |\psi_\infty|^2$

ในขั้นแรกของการพิจารณาทฤษฎีกินซ์เบิร์ก-แลนดาว เริ่มจากพิจารณากรณีอย่างง่าย ไม่มีสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง จากสมการ (2.67) จะได้ว่า

$$g_s - g_n = \alpha |\psi|^2 + \frac{1}{2} \beta |\psi|^4 = -\frac{1}{2} \mu_0 H_c^2 \quad \text{----- (2.70)}$$

เมื่อ $T \rightarrow T_c$

จากรูป 2.22 (ก) และสมการ (2.70) สำหรับ $\alpha > 0$ ในสถานะปกติ ($g_s \geq g_n$) พลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุดที่ $n_s = |\psi|^2 = 0$ แต่สำหรับ $\alpha < 0$ ในสถานะนำยวดยิ่ง ($g_s < g_n$) รูป 2.22 (ข) พลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุด ณ จุดสมดุล ที่ $n_s = |\psi|^2 = |\psi_\infty|^2$ หาได้จากอนุพันธ์เท่ากับศูนย์

$$\frac{\partial}{\partial |\psi|^2} (g_s - g_n) = 0 \quad \text{----- (2.71)}$$

$$\alpha + \beta |\psi_\infty|^2 = 0 \quad \text{----- (2.72)}$$

$$n_s = |\psi_\infty|^2 = -\frac{\alpha}{\beta} \quad \text{----- (2.73)}$$

เมื่อ $|\psi_\infty|$ คือ พารามิเตอร์ความเป็นระเบียบภายในสารตัวนำยวดยิ่ง แทนค่าสมการ (2.73) ลงในสมการ (2.70) จะได้ว่า

$$H_c^2 = \frac{1}{\mu_0} \frac{\alpha^2}{\beta} \quad \text{----- (2.74)}$$

จากสมการ (2.68) และ (2.69) จะเห็นได้ว่าค่า α แปรผันกับอุณหภูมิ ($\alpha \propto (t - 1)$) ส่วน β ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ (β คงที่) ดังนั้น จากสมการ (2.73) และ (2.74) ทำให้สังเกตเห็นว่า

$n_s \propto (1 - t)$ และ $H_c \propto (1 - t)$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นการประมาณค่าที่น่าเชื่อถือได้สำหรับ $T \rightarrow T_c$ ($T < T_c$) โดยหลักการการแปรผันตรงดังกล่าวทำให้สามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$n_s(T) = n_{s0}(1 - t) \quad \text{----- (2.75)}$$

และ $H_c(T) = H_{c0}(1 - t) \quad \text{----- (2.76)}$

จากสมการ (2.73) และ (2.74) หา α และ β ได้ คือ

$$\alpha = -\frac{\mu_0 H_c^2}{n_s} \quad \text{----- (2.77)}$$

$$\beta = \frac{\mu_0 H_c^2}{2n_s} \quad \text{----- (2.78)}$$

ขั้นที่สองพิจารณาทฤษฎีกินซ์เบิร์ก-แลนดาว กรณีที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง ในทำนองที่คล้ายคลึงกัน จากสมการ (2.67) มีส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในพจน์ของ $|\psi|^6$ และ β เป็นได้ทั้งบวกและลบ นั่นคือ

$$g_s = g_n + \alpha|\psi|^2 + \frac{1}{2}\beta|\psi|^4 + \frac{1}{2\mu_0}|\vec{B}_a - \vec{B}_i|^2 + \frac{1}{2m}\left|\left(-\frac{\hbar}{i}\vec{\nabla} - q\vec{A}\right)\psi\right|^2 \quad \text{----- (2.79)}$$

เมื่อ m และ q คือ มวลและประจุของอนุภาคที่บรรยายโดย ψ ตามลำดับ สำหรับอิเล็กตรอนคูเปอร์ (Cooper pair electrons) แล้ว $m = 2m_e$ และ $q = 2e$, $\vec{\nabla}$ คือ เกรเดียนกระทำบนฟังก์ชันคลื่น ψ

จากสมการ (2.79) พจน์แรก que เพิ่มเข้ามาเป็นพลังงานที่ต้องการในการเปลี่ยนสนามแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}_a$ เป็นสนามแม่เหล็กภายใน $\vec{B}_i$ ขณะที่เมื่อสารตัวนำยวดยิ่งมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่ง ($\vec{B}_i = 0$) ซึ่งก็คือพลังงานทั้งหมด

ที่ใช้ในการผลักดันแม่เหล็กออกจากสารตัวนำยวดยิ่งนั่นเอง พจน์ที่สองคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงลดลงของสนามแม่เหล็กภายใน B_i และการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นอิเล็กตรอนนำยวดยิ่ง $|\psi|^2$ ภายในสารตัวนำยวดยิ่ง ตลอดจนกระแสไฟฟ้านำยวดยิ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กด้วย นอกจากนี้ยังรวมไปถึงพลังงานต้องการในการสร้างความหนาแน่นคูเปอร์ ซึ่งมีส่วนช่วยในการทำให้เกิดความแข็งแรงของฟังก์ชันคลื่นและเพิ่มความสำคัญ ณ ขอบเขตของสถานะระหว่างสถานะนำยวดยิ่งและสถานะปกติ

ในทำนองคล้ายคลึงกันกับขั้นแรก พลังงานอิสระกิบส์ สมการ (2.79) มีค่าน้อยที่สุด ณ จุดสมดุล หาคำนุพันธ์เท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$\alpha + \beta|\psi|^2 + \frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{i} \vec{\nabla} - q\vec{A} \right)^2 = 0$$

หรือ

$$\alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi + \frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{i} \vec{\nabla} - q\vec{A} \right)^2 \psi = 0 \quad \text{----- (2.80)}$$

สมการ (2.80) มีรูปแบบเดียวกันกับสมการชเรอดิงเงอร์ (Schrodinger equation) ของพลังงานอนุภาคที่มีมวล m และประจุ q มีค่าเจาะจงพลังงาน (Energy eigenvalue) เป็น $-\alpha$ โดยมี

ตัวดำเนินการแฮมิลโทเนียน (Hamiltonian operator) $\hat{H} = \frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{i} \vec{\nabla} - q\vec{A} \right)^2 + \beta|\psi|^2$ และจาก

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) $\frac{\partial n_s}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_s = 0$ ด้วยวิธีการทางกลศาสตร์ควอนตัม

ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $\vec{J}_s$ คือ

$$\vec{J}_s = \frac{q\hbar}{2mi} (\psi^* \vec{\nabla} \psi - \psi \vec{\nabla} \psi^*) - \frac{q^2}{m} |\psi|^2 \vec{A} \quad \text{----- (2.81)}$$

เมื่อ ψ^* คือ สังยุคเชิงซ้อนฟังก์ชันคลื่น ψ

สมการ (2.80) และ (2.81) เรียกว่า สมการกินซ์เบิร์ก-แลนดาว (Ginzburg-Landau equations)

สมการกิ้นซ์เบอร์ก-แลนดาวทั้งสองสมการสามารถนำไปพิสูจน์สมการลอนดอน ระยะ
เจาะลึก λ_L และระยะอาพันธ์ ξ_{GL} ได้ โดยเริ่มจากพิจารณาสมการ (2.81) กำหนดให้

$$\Psi = \frac{\psi}{\psi_\infty} \text{ หรือ } \psi = \Psi\psi_\infty \text{ แทนค่าลงในสมการ (2.81) จะได้ว่า}$$

$$\vec{J}_s = \frac{q\hbar|\psi_\infty|^2}{2mi}(\Psi^*\vec{\nabla}\Psi - \Psi\vec{\nabla}\Psi^*) - \frac{q^2|\psi_\infty|^2}{m}|\Psi|^2\vec{A}$$

จากนิยามระยะเจาะลึกของลอนดอน $\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 q^2 n_s}}$ และ $n_s = |\psi_\infty|^2$ ได้ว่า

$$\vec{J}_s = \frac{\hbar}{2iq\mu_0\lambda_L^2}(\Psi^*\vec{\nabla}\Psi - \Psi\vec{\nabla}\Psi^*) - \frac{1}{\mu_0\lambda_L^2}|\Psi|^2\vec{A}$$

เมื่อ $\Psi = \Psi_0 e^{i\phi}$ และ $\nabla\Psi = e^{i\phi}\nabla\Psi_0 + \Psi_0 e^{i\phi} i\nabla\phi$ ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$$\vec{J}_s = \Psi_0^2 \frac{\hbar}{q\mu_0\lambda_L^2} \vec{\nabla}\phi - \frac{1}{\mu_0\lambda_L^2} \Psi_0^2 \vec{A} \quad \text{----- (2.82)}$$

ถ้าฟังก์ชัน Ψ มีค่าคงที่ แล้ว $\nabla\Psi, \nabla\phi$ มีค่าเป็นศูนย์ และ $|\Psi|=1$ สมการ (2.82) ลดรูป
ลงมาเป็นสมการลอนดอน คือ

$$\vec{J}_s = -\frac{1}{\mu_0\lambda_L^2} \vec{A}$$

ใส่เคิร์ลทั้งสองข้างของสมการข้างบน จะได้ว่า

$$\nabla \times \vec{J}_s = -\frac{1}{\mu_0\lambda_L^2} (\nabla \times \vec{A})$$

หรือ
$$\vec{B} = -\mu_0 \lambda_L^2 (\nabla \times \vec{J}_s)$$

เมื่อ $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$

ต่อไปเป็นการพิสูจน์หาระยะอาพันธ์ ξ_{GL} และระยะเจาะลึก λ_L โดยพิจารณาจากสมการกิ้นซ์เบิร์ก-แลนดาว สมการ (2.80) เมื่อ $\psi = \Psi \psi_\infty$ และ สมการ (2.72) $\beta |\psi_\infty|^2 = -\alpha$ แทนค่า จะได้ว่า

$$\frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{i} \vec{\nabla} - q \vec{A} \right)^2 \Psi + \alpha \Psi - \alpha |\Psi|^2 \Psi = 0$$

หรือ

$$\frac{\hbar^2}{2m\alpha} \left(\frac{1}{i} \vec{\nabla} - \frac{q}{\hbar} \vec{A} \right)^2 \Psi + \Psi - |\Psi|^2 \Psi = 0 \quad \text{----- (2.83)}$$

โดยการกำหนดนิยามระยะอาพันธ์กิ้นซ์เบิร์ก-แลนดาว (Ginzburg-Landau coherence length - ξ_{GL}) คือ

$$\xi_{GL}(T) = \sqrt{\frac{-\hbar^2}{2m\alpha(T)}} \quad \text{----- (2.84)}$$

เพราะฉะนั้น สมการ (2.83) จึงได้ว่า

$$-\xi_{GL}^2 \left(\frac{\vec{\nabla}}{i} - \frac{q}{\hbar} \vec{A} \right)^2 \Psi + \Psi - |\Psi|^2 \Psi = 0 \quad \text{----- (2.85)}$$

ด้วยเหตุผลที่ $\alpha(T)$ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T ตามสมการ (2.68) ดังนั้น ระยะอาพันธ์กิ้นซ์เบิร์ก-แลนดาว จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T ด้วย

$$\xi_{GL}(T) = \frac{\xi_{GL}(0)}{\sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}} \quad \text{----- (2.86)}$$

$$\text{เมื่อ } \xi_{\text{GL}}(0) = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m\alpha(0)}}$$

ในทำนองเดียวกันกับ ξ_{GL} สามารถหาระยะเจาะลึกของลอนดอน λ_L ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T ได้ด้วยเช่นกัน โดยพิจารณาจากนิยามระยะเจาะลึกของลอนดอน

$$\lambda_L(T) = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 q^2 n_s}}$$

$$\text{แทนค่า } n_s = -\frac{\alpha(T)}{\beta(T)} \text{ เมื่อ } \beta(T) \text{ มีค่าคงที่ จะได้ว่า}$$

$$\lambda_L(T) = \sqrt{\frac{-m\beta(T)}{\mu_0 q^2 \alpha(T)}}$$

เมื่อ $\alpha(T)$ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T ตามสมการ (2.68) ดังนั้น จึงได้ระยะเจาะลึกของลอนดอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T คือ

$$\lambda_L(T) = \frac{\lambda_L(0)}{\sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}} \quad \text{----- (2.87)}$$

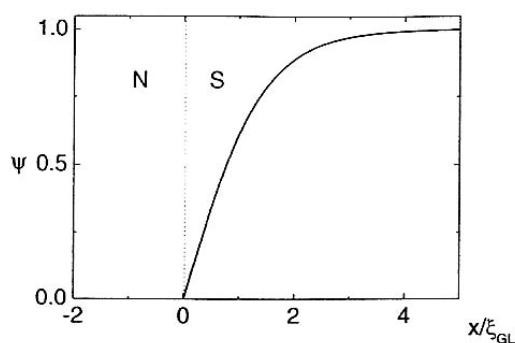
$$\text{เมื่อ } \lambda_L(0) = \sqrt{\frac{-m\beta(0)}{\mu_0 q^2 \alpha(0)}}$$

จากสมการ (2.86) และ (2.87) จะเห็นได้ว่า สำหรับที่ $T \rightarrow T_c$ แล้ว ปริมาณทั้งสอง ξ_{GL} และ λ_L มีค่าเข้าสู่นันต์ แต่อย่างไรก็ตาม สมการทั้งสองสามารถใช้ได้ดีเฉพาะเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ อุณหภูมิวิกฤตเท่านั้น แม้ว่าจะมี $\xi_{\text{GL}}(0)$ และ $\lambda_L(0)$ ปรากฏอยู่ในสมการดังกล่าวก็ตาม ดังจะเห็นได้จากในขณะที่ยุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ศูนย์สัมบูรณ์ไปจนถึงอุณหภูมิวิกฤต คาดหมายได้ว่า $H_c \propto (1 - t^2)$ (สมการ (2.28)) และ $n_s \propto (1 - t^4)$ (สมการ (2.46)) ตามแบบจำลองการไหลคู่ของกอร์เทอร์ - แลงมิเยร์และทฤษฎีลอนดอน ตามลำดับ ดังนั้น ทฤษฎี กิ้นซ์เบิร์ก-แลนดาว จึงใช้ได้ผลดีในขีดจำกัดเฉพาะอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิวิกฤตเท่านั้น

นอกจากนี้ ยังได้มีการกำหนดนิยามพารามิเตอร์ขึ้นมา เรียกว่า “พารามิเตอร์กินซ์เบิร์ก-แลนดาว (Ginzburg-Landau parameter - K)”

$$K = \frac{\lambda_L}{\xi_{GL}} \quad \text{----- (2.88)}$$

ภายใต้สมการกินซ์เบิร์ก-แลนดาว ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์กินซ์เบิร์ก-แลนดาว K ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสนามแม่เหล็ก



รูป 2.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน $\psi(x)$ ภายในสารตัวนำยวดยิ่ง

รูป 2.23 แสดงถึงสถานการณ์อย่างง่าย เมื่อสารตัวนำยวดยิ่งมีขนาดขยายออกไปในแนวแกน x จาก $x=0$ ไปจนถึง $x \rightarrow \infty$ ส่วนในแนวแกน y และแกน z มีขนาดขยายออกไปยาวมาก โดยมีเงื่อนไขขอบเขตสำหรับที่ $x=0$ แล้ว $|\psi|=0$ และ $\vec{A}=0$ ทำให้สามารถหาค่าจริงจากผลเฉลยของสมการ (2.89) ได้

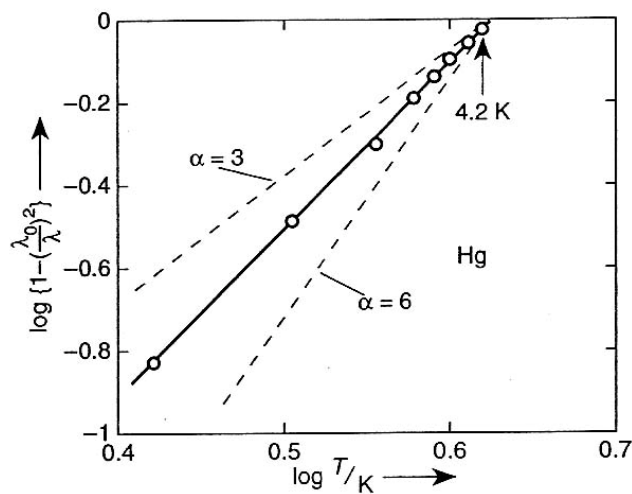
$$\xi_{GL}^2 \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \psi - \psi^3 = 0 \quad \text{----- (2.89)}$$

จากสมการ (2.89) เมื่อ $\psi(x)$ ขึ้นอยู่กับค่า x เพียงอย่างเดียว สำหรับ $x \geq 0$ แล้ว ได้ผลเฉลยของสมการ คือ

$$\psi(x) = \tanh\left(\frac{x}{\sqrt{2}\xi_{GL}}\right) \quad \text{----- (2.90)}$$

รูป 2.23 สอดคล้องกับสมการ (2.90) ซึ่งจะเห็นได้ว่า $\psi(x)$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า x ที่เพิ่ม จาก $\psi(0)=0$ เข้าสู่ค่าจำกัดเท่ากับ 1 เมื่อ x เข้าสู่ระยะอนันต์ภายในสารตัวนำยวดยิ่ง

ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ กรณีที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่งในยุคแรก ๆ ระยะเจาะลึก $\lambda_L(T)$ ที่มีค่าต่างจาก $\lambda_L(0)$ โดยผลต่างระหว่างค่าทั้งสองมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียล เมื่ออุณหภูมิลดลง ในขณะที่กรณีที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่งในยุคหลังผลต่างระยะเจาะลึก $\Delta\lambda = \lambda_L(T) - \lambda_L(0)$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเป็นไปตามกฎของการยกกำลังของอุณหภูมิ T เช่น กรณีของสมมาตร $d_{x^2-y^2}$ $\Delta\lambda$ แปรผันตรงกับ T ถ้าสารตัวอย่างมีความบริสุทธิ์สูง แต่ถ้าสารตัวอย่างมีสารเจือปนแล้ว $\Delta\lambda$ แปรผันตรงกับ T^2



รูป 2.24 แสดงระยะเจาะลึกของปรอทขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เส้นทึบและเส้นประสัมพันธ์กับเลขชี้กำลัง $\alpha = 4$, $\alpha = 3$ และ $\alpha = 6$ ตามลำดับ ในความสัมพันธ์ (2.91)

รูป 2.24 แสดงผลการทดลองระยะเจาะลึกของปรอทขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยหา $\lambda_L(T)$ ได้จากแมกนีไทเซชันของคอลลอยด์ปรอท นอกจากนี้แล้วสำหรับสารตัวนำยวดยิ่งอื่น ๆ ระยะเจาะลึกที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสามารถประมาณได้ในช่วงของอุณหภูมิที่ขยายกว้างออกไปโดยความสัมพันธ์ (2.91) ด้วยเช่นกัน

$$\frac{\lambda_L(T)}{\lambda_L(0)} \propto \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^\alpha}} \quad \text{----- (2.91)}$$

รูป 2.24 แสดงให้เห็นว่าเส้นตรงที่พบได้จากความสัมพันธ์ (2.91) และจุดโปร่งที่ได้จากการทดลอง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้วถือได้ว่าเป็นที่ยอมรับ ดังนั้น ข้ออธิบายทางทฤษฎีและผลการทดลองจึงสอดคล้องกันได้อย่างดีเยี่ยม

2.4.5 ทฤษฎี BCS (The BCS theory)

เกือบครึ่งศตวรรษหลังจากได้มีการค้นพบสภาพนำยวดยิ่งกันอย่างกว้างขวาง จึงได้มีการเสนอทฤษฎีจุลภาคโดย Bardeen, Cooper และ Schrieffer ในปี ค.ศ. 1957 เรียกว่า “ทฤษฎี BCS” ทฤษฎีดังกล่าวนี้สร้างขึ้นมาเพื่อพยายามอธิบายสมบัติของสารตัวนำยวดยิ่ง คือ

(1) การเปลี่ยนสถานะอันดับสอง (Second-order phase transition) ที่อุณหภูมิวิกฤต T_c ทำให้เกิดการกระโดดของค่าความจุความร้อนจำเพาะและไม่มีความร้อนแฝงในขณะที่กำลังมีการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่ง

(2) การเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนตามค่าของ $e^{-T_0/T}$ เมื่ออุณหภูมิมียุคเข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์ แสดงให้เห็นถึงการมีช่องว่างพลังงานเกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

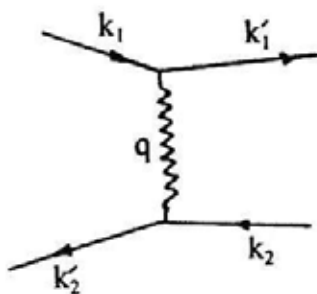
(3) ปฏิกิริยาแม่เหล็กไมสส์เนอร์-โอเชอร์ฟีลด์ ($\vec{B}=0$)

(4) สภาพนำไฟฟ้าที่มีค่าเป็นอนันต์ ($\vec{E}=0$)

(5) การขึ้นอยู่กั่มวลไอโซโทปของอุณหภูมิวิกฤต ($T_c \sqrt{M} = \text{คงที่}$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตต่ำที่ปรากฏผลได้อย่างชัดเจน แต่สำหรับสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูงปรากฏผลน้อยมาก

ผลของการสร้างทฤษฎี BCS ทำให้สามารถอธิบายสมบัติทั้ง 5 ข้อ ของสารตัวนำยวดยิ่งได้และสอดคล้องกับผลการทดลองได้เป็นอย่างดี ทำให้ทั้ง Bardeen, Cooper และ Schrieffer ได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 1972

โดยรากฐานของทฤษฎี BCS แล้ว เกิดจากการเข้าคู่กันของอิเล็กตรอนเป็นคู่อุปเปอร์ ซึ่งเสนอโดย Cooper ในปี ค.ศ. 1956 และการประยุกต์ทางควอนตัม โดยอาศัยเทคนิคทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย ย้อนกลับไปในปี ค.ศ. 1950 เมื่อ Frohlich ได้พยายามอธิบายสภาพนำยวดยิ่งที่เกิดจากอันตรกิริยาแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน-อิเล็กตรอนเนื่องจากการบิดตัวเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงผลึกบริเวณผิวเฟอร์มี (Fermi surface) ในรูปแบบที่เรียกว่า “อันตรกิริยาสื่อกลางโฟนอน (Phonon-mediated interaction)” ซึ่งมีความเป็นไปได้เมื่ออันตรกิริยาแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน-อิเล็กตรอนนั้น เกิดขึ้นโดยอาศัยไอออนบวกของโครงผลึกเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย กล่าวคือ เมื่อมีอิเล็กตรอนตัวแรกเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของไอออนบวกที่เป็นโครงผลึกในของแข็งอิเล็กตรอนจะออกแรงดึงดูดไอออนบวกที่อยู่รอบ ๆ เคลื่อนที่เข้ามาล้อมรอบอิเล็กตรอนทำให้โครงผลึกเกิดการบิดตัวเปลี่ยนแปลงรูปร่างเข้าหากัน ส่งผลถึงค่าประจุยังผลของอิเล็กตรอนมีค่าลดลงจนมีค่าประจุสุทธิเป็นบวกแล้วเกิดแรงดึงดูดซึ่งมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างอิเล็กตรอนกระทำต่ออิเล็กตรอนตัวที่สอง ทำให้อิเล็กตรอนตัวที่สองมีพลังงานเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนตัวที่สองจึงต้องลดพลังงานลงให้เหลือได้ไม่เกิน $\hbar\omega_c$ โดยการเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังโครงผลึกที่บิดตัวเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเนื่องจากอิเล็กตรอนตัวแรก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า การบิดตัวเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงผลึกก่อให้เกิดอันตรกิริยาแรงดึงดูดอย่างอ่อน ๆ ระหว่างอิเล็กตรอน-อิเล็กตรอน นั่นเอง



รูป 2.25 แสดงการแลกเปลี่ยนโฟนอนระหว่างอิเล็กตรอน 2 ตัว ในทฤษฎีสถาน

ทางด้านทฤษฎีสถาน (Field theory) อันตรกิริยาดังกล่าวข้างต้น อาจกล่าวได้ว่าเป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนโฟนอนระหว่างอิเล็กตรอน 2 ตัว ดังรูป 2.25 เมื่อเส้นตรงแทนทางเดินของอิเล็กตรอนและเส้นคลื่นแทนโฟนอน ในช่วงระหว่างที่เกิดกระบวนการปลดปล่อยโฟนอนนั้น มีการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังนั้น สำหรับอิเล็กตรอนตัวแรกที่ปลดปล่อยโฟนอน สามารถเขียนได้ว่า

$$\vec{k}_1 - \vec{q} = \vec{k}'_1 \quad \text{-----} \quad (2.92)$$

เมื่อ $\vec{k}_1$ และ $\vec{k}'_1$ คือ เวกเตอร์คลื่น (Wave vectors) ก่อนและหลังที่มีการกระเจิง (Scattering) ตามลำดับ, $\vec{q}$ คือ เวกเตอร์คลื่นของโฟนอน มีขนาดเท่ากับ $\frac{\omega_D}{s}$ เมื่อ ω_D คือ ความถี่ของโฟนอน สัมพันธ์กับความถี่เดบาย (Debye frequency), s คือ ความเร็วเสียง เมื่อโฟนอนถูกดูดกลืนโดย อิเล็กตรอนตัวที่สอง โมเมนตัมหรือเวกเตอร์คลื่นของอิเล็กตรอนตัวที่สองมีการเปลี่ยนแปลงไปจาก $\vec{k}_2$ ไปเป็น $\vec{k}'_2$ คือ

$$\vec{k}_2 + \vec{q} = \vec{k}'_2 \quad \text{-----} \quad (2.93)$$

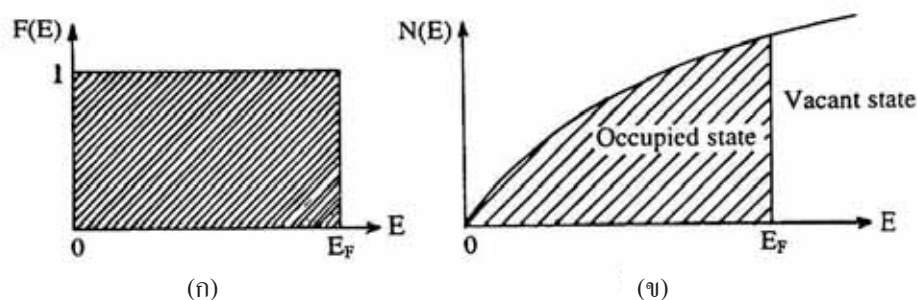
จากสมการ (2.92) และ (2.93) อันตรกิริยาดังคู่ระหว่างอิเล็กตรอน-อิเล็กตรอน ดังรูป 2.25 สามารถเขียนได้ในพจน์ของเวกเตอร์คลื่นอิเล็กตรอนได้ คือ

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}'_1 + \vec{k}'_2 = \vec{K} \quad \text{-----} \quad (2.94)$$

สมการ (2.94) แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์คลื่นสุทธิของคู่อิเล็กตรอนนั้นเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์ โมเมนตัมหรือมีการถ่ายทอดโมเมนตัมระหว่างอิเล็กตรอนทั้งสองนั่นเอง

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าขอบเขตระหว่างสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่งนั้นไม่ ชัดเจน ซึ่งเกิดจากการมีช่องว่างพลังงานที่มีค่าประมาณ $10^{-4} - 10^{-3}$ eV คั่นกลางอยู่ระหว่างสถานะ ทั้งสอง ทั้งนี้จะได้ทำความเข้าใจถึงกลไกของการเกิดคูเปอร์ต่อไป โดยพิจารณาจากการกระจาย ของอิเล็กตรอนในโลหะที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ เป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) คือ

$$F(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} \quad \text{-----} \quad (2.95)$$

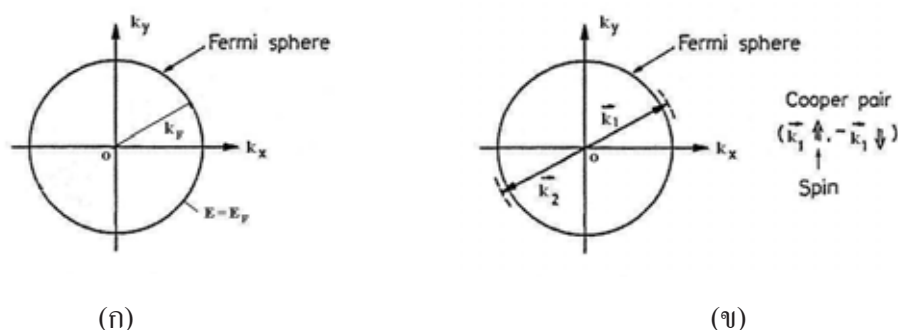


รูป 2.26 (ก) แสดงฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก $F(E)$ ที่ $T = 0 \text{ K}$

(ข) แสดงความหนาแน่นของสถานะ $N(E)$ ที่ $T = 0 \text{ K}$

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า ที่สถานะพื้น (Ground state) ของแก๊สเฟอร์มี (Fermi Gas) ณ อุณหภูมิ ศูนย์สัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) อิเล็กตรอนแก๊สเฟอร์มีจะไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกันในบ่อศักย์ (Potential well) ทุก ๆ สถานะทางควอนตัมที่อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี E_F มีอิเล็กตรอนยึดครองอยู่เต็มสถานะพอดี และทุก ๆ สถานะทางควอนตัมที่อยู่เหนือระดับพลังงานเฟอร์มี E_F จะไม่มีอิเล็กตรอนยึดครองอยู่เลย ดังรูป 2.26 ในทำนองเดียวกัน การกระจายโมเมนตัมของอิเล็กตรอนในทรงกลม สถานะถูกยึดครองปริภูมิ k เรียกว่า **ทรงกลมเฟอร์มี (Fermi sphere)** มีรัศมีเป็น k_F ดังรูป 2.27 (ก) เมื่อ

$$k_F = \sqrt{\frac{2mE_F}{\hbar^2}} \quad \text{----- (2.96)}$$

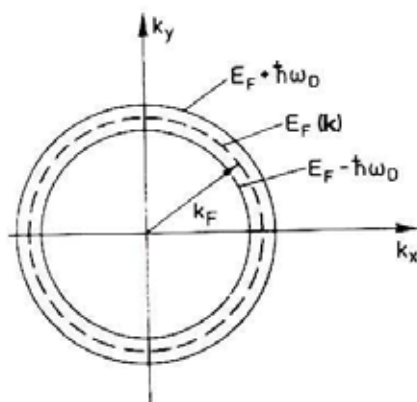


รูป 2.27 (ก) แสดงทรงกลมเฟอร์มีรัศมี k_F

(ข) แสดงคู่อิเล็กตรอนที่มีโมเมนตัมและสปินทิศตรงข้ามกันเพิ่มเข้ามาในทรงกลมเฟอร์มี ที่ $T = 0 \text{ K}$

ต่อมาเมื่อมีอิเล็กตรอน 2 ตัว คือ อิเล็กตรอน $\{\vec{k}_1 \uparrow, E(\vec{k}_1)\}$ และ อิเล็กตรอน $\{\vec{k}_2 \downarrow, E(\vec{k}_2)\}$ เพิ่มเข้ามายังโลหะที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์นี้ ในขณะที่เดิมทุก ๆ สถานะทางควอนตัมที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานเฟอร์มี ($E \leq E_F$) หรือมีโมเมนตัมน้อยกว่าระดับเฟอร์มี ($k \leq k_F$) มีอิเล็กตรอนยึดครองอยู่เต็มพอดี จากหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli's exclusion principle) อิเล็กตรอนทั้งสองจะถูกบังคับให้ต้องอยู่ในสถานะยึดครองที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานเฟอร์มี ($E \geq E_F$) หรือมีโมเมนตัมมากกว่าที่ระดับเฟอร์มี ($k \geq k_F$) อยู่เหนือระดับพลังงานเฟอร์มีเล็กน้อย ดังรูป 2.27 (ข) ทำให้เกิดอันตรกิริยาดึงดูดอย่างอ่อน ๆ ระหว่างอิเล็กตรอนทั้งสองที่เพิ่มเข้ามาในรูปแบบของการแลกเปลี่ยนโฟนอน และมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ ด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ แรงดึงดูดสุทธิระหว่างอิเล็กตรอนทั้งสองจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนทั้งสองมีพลังงานได้ไม่เกิน $\hbar\omega_c$ ที่ระดับพลังงานเฟอร์มี E_F ส่วนอิเล็กตรอนอื่น ๆ ที่อยู่ภายในทรงกลมเฟอร์มี ($E \leq E_F$) ไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน ด้วยเหตุนี้ Cooper จึงได้แสดงให้เห็นว่า ถ้ามีแรงดึงดูดอย่างอ่อน ๆ ระหว่างอิเล็กตรอนทั้งสอง อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสามารถก่อตัวขึ้นมาเป็นสถานะขอบ (bounded state) และมีพลังงานรวมทั้งหมดน้อยกว่า $2E_F$ อิเล็กตรอนทั้งสองจึงเข้าคู่กันก่อตัวขึ้นเกิดเป็นระบบเดี่ยว และมีการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันเป็นอย่างมาก เรียกว่า “คูคูเปอร์” การเข้าคู่กันระหว่างอิเล็กตรอนสองตัวนั้น สามารถทำลายได้โดยใช้พลังงานที่มีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยว Δ ระหว่างอิเล็กตรอนใส่เข้าไปยังระบบและพลังงานยึดเหนี่ยวนี้จะมีค่ามากที่สุดเมื่ออิเล็กตรอนที่เข้าคู่กันมีโมเมนตัมและสปินตรงข้ามกันพอดี นั่นคือ $\vec{k} \uparrow, -\vec{k} \downarrow$ เพราะฉะนั้น ด้วยเหตุนี้ ถ้ามีแรงดึงดูดระหว่างคู่อิเล็กตรอนใด ๆ ซึ่งอยู่ในบริเวณรอบ ๆ ผิวเฟอร์มีแล้วคู่อิเล็กตรอนอื่น ๆ เหล่านี้ทั้งหมดที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวจึงจะก่อตัวขึ้นมาเป็นคูคูเปอร์ ซึ่งคูของอิเล็กตรอนเหล่านี้จริง ๆ แล้วก็คือ อิเล็กตรอนนำยวดยิ่ง (Superelectrons) ซึ่งมีผลต่อสภาพนำยวดยิ่งของสารตัวนำยวดยิ่งนั่นเอง

จากทฤษฎี BCS พบว่า อิเล็กตรอนที่มีพลังงานใกล้เคียงกับพลังงานเฟอร์มีจะเกิดอันตรกิริยาดึงดูดระหว่างกัน ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ $-V_0$ ขอบเขตพลังงานกระจายในช่วง $\pm \hbar\omega_D$ รอบ ๆ พลังงานเฟอร์มี ดังรูป 2.28 นอกนั้นถือว่าพลังงานมีค่าเป็นศูนย์ ($V=0$)



รูป 2.28 แสดงอันตรกิริยาดึงดูดระหว่างคู่อิเล็กตรอน - V_0 ในช่วง $\pm \hbar\omega_D$ รอบผิวเฟอร์มี

สมมติให้ $N(E)$ คือ ความหนาแน่นสถานะที่มีพลังงาน E หรือจำนวนสถานะในช่วงพลังงานระหว่าง E กับ $E + dE$ สำหรับคู่อิเล็กตรอนใด ๆ โดยการเขียนฟังก์ชันคลื่น (Wave function) ของอิเล็กตรอนคูใด ๆ $\psi(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2)$ ตามแนวคิดของคูคูเปอร์ ประกอบด้วยคลื่นระนาบสองคลื่น¹ คือ

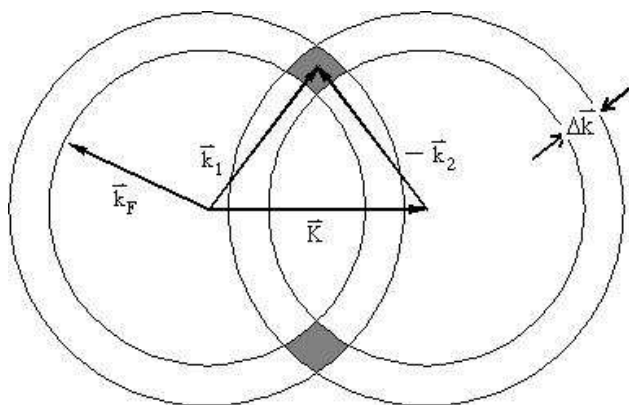
$$\psi(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2) = \varphi(\vec{k}_1, \vec{r}_1) \varphi(\vec{k}_2, \vec{r}_2)$$

หรือ

$$\psi(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2) = \left(\frac{1}{\sqrt{L^3}} e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{L^3}} e^{i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2} \right) \text{-----} (2.97)$$

จากทรงกลมเฟอร์มีในปริภูมิ k อันตรกิริยาดึงดูดเกิดขึ้นภายในเซลหนา Δk สัมพันธ์กับพลังงาน $\hbar\omega_D$ เหนือพลังงานเฟอร์มี E_F สถานะ k ที่เป็นไปได้ในการเกิดคูคูเปอร์ คือ ส่วนของปริมาตร

¹ ถ้าใช้ฟังก์ชันคลื่นบลอช (Bloch wave functions) จะให้ความละเอียดถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รูป 2.29 แสดงเขตทรงกลม 2 เขต มีรัศมี k_F และหนา Δk

วงแหวนหมุนรอบเวกเตอร์คลื่นผลลัพธ์ $\vec{K}$ โดยมีภาคตัดขวางคือส่วนที่แรเงา ดังรูป 2.29 จำนวนคู่คูเปอร์แปรผันตรงกับปริมาตรของวงแหวน ขนาดของอันตรกิริยาแรงดึงดูดมีค่ามากที่สุดเมื่อคู่อิเล็กตรอนมีขนาดโมเมนตัมเท่ากันแต่ทิศตรงกันข้าม นั่นคือ $\vec{k}_1 = -\vec{k}_2 = \vec{k}$ หรือ $\vec{K} = 0$ หรือมีพลังงานของสถานะต่ำสุดนั่นเอง จากสมการ (2.97) จะได้ว่า

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{1}{L^3} e^{i\vec{k} \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)} \quad \text{----- (2.98)}$$

สมการ (2.98) นี้อาจเขียนในรูปสมการทั่วไปสำหรับสถานะคู่อิเล็กตรอนในกรณีที่ $v \neq 0$ ได้ คือ

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{1}{L^3} \sum_{\vec{k}} g(\vec{k}) e^{i\vec{k} \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)} \quad \text{----- (2.99)}$$

เมื่อ $|g(\vec{k})|^2$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในสถานะปริภูมิ $\vec{k}$ และ $g(\vec{k}) = 0$ สำหรับ $k < k_F$ และ $k > \sqrt{\frac{2m(E_F + \hbar\omega_D)}{\hbar^2}}$, $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ ในสมการ (2.99) คือ สถานะเจาะจง (Eigenstate) ซึ่งเป็นไปตามสมการชเรอดิงเงอร์ (Schrodinger equation) ดังสมการ (2.100)

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}(\nabla_1 + \nabla_2) + V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \right] \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = (\mathcal{E} + 2E_F) \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$$

----- (2.100)

$\mathcal{E}$ คือ พลังงานของคู่อิเล็กตรอนสัมพันธ์กับสถานะอิสระ ($V = 0$) และ E_F คือ พลังงานของอิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ระดับเฟอร์มี

ทฤษฎี BCS สามารถแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนสถานะอันดับสองไปยังสถานะอิเล็กตรอนสถานะใหม่สัมพันธ์กับอุณหภูมิวิกฤต คือ

$$k_B T_c = 1.14 \hbar \omega_D e^{-1/N(E_F)V_0}$$

----- (2.101)

เมื่อ $N(E_F)$ คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสถานะปกติที่ระดับพลังงานเฟอร์มี พลังงานโฟนอนคัทออฟ $\hbar \omega_c$ สัมพันธ์กับพลังงานเดบาย $\hbar \omega_D$ ซึ่ง $\omega_D \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$ เมื่อ M คือ มวลอะตอม เป็นปรากฏการณ์ไอโซโทป (Isotope effect) ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ได้ว่า $T_c \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$ ซึ่งเสนอโดย Frohlich และเป็นที่ยอมรับอย่างดีเชื่อมสอดคล้องกับผลการทดลองไอโซโทปของปรอทในปี ค.ศ. 1950

นอกจากนี้ทฤษฎี BCS ยังได้อธิบายถึงช่องว่างพลังงานรอบ ๆ พลังงานเฟอร์มี E_F ซึ่งหลาย ๆ การทดลองได้แสดงให้เห็นแล้วว่าช่องว่างพลังงานเกิดขึ้นในระดับ $k_B T_c$ โดยการคำนวณจากทฤษฎี BCS ที่ 0 K ช่องว่างพลังงาน $2\Delta(0)$ หาได้จาก

$$2\Delta(0) = \frac{\hbar \omega_D}{\sinh[1/N(E_F)V_0]}$$

หรือ

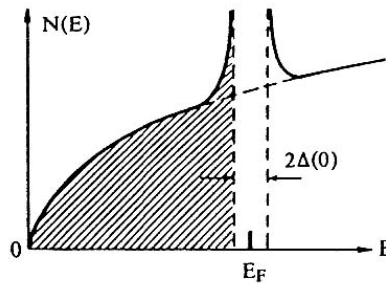
$$2\Delta(0) \approx 4 \hbar \omega_D e^{-1/N(E_F)V_0}$$

----- (2.102)

จากสมการ (2.101) และ (2.102) จะได้ว่า

$$2\Delta(0) = 3.52 k_B T_c \quad \text{----- (2.103)}$$

ช่องว่างพลังงานที่ 0 K แสดงดังรูป 2.30 จะเห็นได้ว่า ระดับพลังงานเฟอร์มี E_F อยู่กึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ซึ่ง $E_F \sim 5 \text{ eV}$ และ $2\Delta(0) \sim 2.6 \text{ meV}$ ($\sim 30 \text{ K}$)



รูป 2.30 แสดงช่องว่างพลังงาน $2\Delta(0)$ ของสารตัวนำยวดยิ่ง

บริเวณรอบ ๆ ผิวทรงกลมเฟอร์มี คู่อิเล็กตรอนทำให้เกิดสถานะที่แปลกมาก ภายในบริเวณรอบ ๆ พลังงานเฟอร์มี E_F สถานะคู่ $\{\vec{k} \uparrow, -\vec{k} \downarrow\}$ ไม่ถูกยึดครอง มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $|u_k|^2$ และสถานะคู่ $\{\vec{k} \uparrow, -\vec{k} \downarrow\}$ ถูกยึดครอง มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $|v_k|^2$ โดยทั่วไปแล้ว u_k และ v_k เป็นจำนวนเชิงซ้อน ขึ้นอยู่กับเวกเตอร์คลื่น $\vec{k}$ และ $|u_k|^2 + |v_k|^2 = 1$ ดังนั้น ความน่าจะเป็นทั้งสอง $|u_k|^2$ และ $|v_k|^2$ สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1 ได้ ในการหาค่าพารามิเตอร์ u_k และ v_k นั้นทำได้โดยการแทนฟังก์ชันคลื่นของคู่อิเล็กตรอนลงในสมการชเรอดิงเงอร์ แล้วคำนวณหาพลังงานของระบบที่เป็นฟังก์ชันของ u_k และ v_k ได้คือ

$$|u_k|^2 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\epsilon_k - E_F}{\sqrt{|\Delta|^2 + (\epsilon_k - E_F)^2}} \right] \quad \text{----- (2.104)}$$

และ $|v_k|^2 = 1 - |u_k|^2$

หรือ
$$|v_k|^2 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\epsilon_k - E_F}{\sqrt{|\Delta|^2 + (\epsilon_k - E_F)^2}} \right] \quad \text{----- (2.105)}$$

ฟังก์ชันคลื่น u_k และ v_k แสดงดังรูป 2.31 เมื่อ ϵ_k คือ พลังงานของอิเล็กตรอนโคตเดี่ยวในกรณี

ที่ $V=0$ ($\epsilon_k = \frac{\hbar^2}{2m}(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$) และ $\Delta = -V \sum_k u_k v_k$ ปริมาณ Δ นี้มีความสำคัญมาก

โดยทั่วไปแล้วเป็นจำนวนเชิงซ้อน สามารถเขียนได้ว่า $\Delta = \Delta_0 e^{i\Phi}$ มีขนาดเท่ากับ Δ_0 และ

$|\Delta|^2 = \Delta_0^2$ ในที่นี้สมมติว่า E_F มีค่าเท่ากับ 1 eV และ Δ_0 มีค่าเท่ากับ 1 meV ซึ่งเป็นสาร

ตัวนำยิ่งยวดโลหะ ลึกลงไปภายในทรงกลมเฟอร์มี $\epsilon_k \ll E_F$ ความน่าจะเป็น $|v_k|^2$ ที่จะพบ

คู่อิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนโคตเดี่ยวในสถานะยึดครอง k มีค่าเข้าใกล้ 1 ในทำนองตรงข้ามกัน

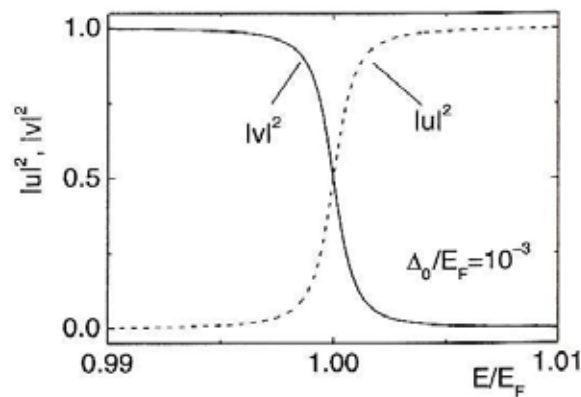
$\epsilon_k \gg E_F$ ความน่าจะเป็น $|u_k|^2$ ที่จะพบสถานะที่ไม่ถูกยึดครองมีค่าเข้าใกล้ 1 ด้วย ดังรูป 2.31

อย่างไรก็ตาม ภายในช่วงประมาณ $\pm \Delta_0$ รอบ ๆ พลังงานเฟอร์มี ฟังก์ชัน $|u_k|^2$ และ $|v_k|^2$ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอัตราส่วน $\frac{\Delta_0}{E_F}$ มีค่าเท่ากับ 10^{-3} เพราะฉะนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า

คู่อิเล็กตรอนมีประมาณ 0.1% ของอิเล็กตรอนทั้งหมดเท่านั้น ปริมาณ Δ ขึ้นอยู่กับผลคูณของ $u_k v_k$

ในทุก ๆ สถานะ k แสดงให้เห็นถึงการเกี่ยวโยงกันของทุก ๆ คู่อิเล็กตรอนกับสถานะที่ไม่ถูกยึดครอง

ซึ่งตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนอิสระที่ไม่เกี่ยวโยงกันเลย Δ จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ u_k หรือ v_k เป็นศูนย์



รูป 2.31 แสดงฟังก์ชัน $|u_k|^2$ และ $|v_k|^2$

ในสถานะที่อธิบายโดยทฤษฎี BCS ทุก ๆ คู่คูเปอร์แสดงให้เห็นถึงปริมาณทางกายภาพทุก ๆ ค่าที่เหมือนกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลื่อนที่ของศูนย์กลางมวลที่เหมือนกันของทุก ๆ คู่คูเปอร์ ดังนั้น สมบัติของสารตัวนำวยวดยิ่งในระดับมหภาค (Macroscopic) ต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตั้งแต่ต้น สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีจุลภาค (Microscopic theory) นี้ได้ ขั้นแรกทฤษฎีจุลภาคนี้สามารถคำนวณหาพลังงานการเข้าคู่คูเปอร์หรือพลังงานการควบแน่น หาได้จาก $-N(E_F)\Delta_0^2/2$ เมื่อ $N(E_F)$ คือ ความหนาแน่นสถานะที่พลังงานเฟอร์มี นอกจาก $N(E_F)$ แล้วพลังงานการควบแน่นยังขึ้นอยู่กับ V หรือ Δ_0^2 ด้วย พลังงานการควบแน่นจะส่งผลต่อสภาพนำวยวดยิ่งได้อย่างชัดเจน ถ้าทั้งปริมาณ $N(E_F)$ และ Δ_0 หรือ V มีค่ามาก การกระตุ้นที่สถานะพื้น เป็นการทำลายแยกคู่คูเปอร์ออกจากกันได้อิเล็กตรอนโคตเดี่ยวขึ้นมา 2 ตัว สามารถหาพลังงานของอิเล็กตรอนเดี่ยวแต่ละตัวซึ่งเป็นอนุภาคกึ่ง (Quasiparticle) ได้ คือ

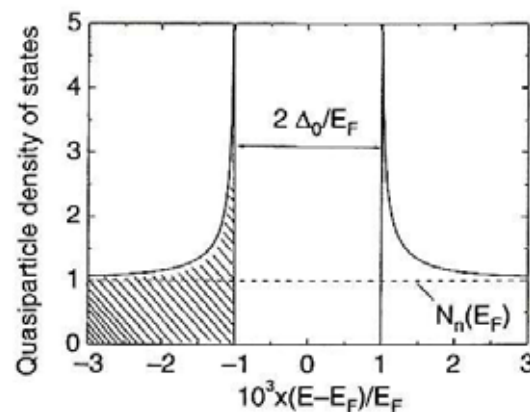
$$E_k = \sqrt{(\epsilon_k - E_F)^2 + \Delta_0^2} \quad \text{----- (2.106)}$$

สมการ (2.106) ถ้า Δ_0 เป็นศูนย์ จะได้ว่า $E_k = \pm(\epsilon_k - E_F)$ นั่นก็คือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่ไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกันภายในทรงกลมเฟอร์มีนั่นเอง อย่างไรก็ตาม สำหรับ $\Delta_0 \neq 0$ แล้ว E_k จะมีค่าต่ำสุดเป็น Δ_0 ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานเข้าไปอย่างน้อยเท่ากับ 2 เท่าของ Δ_0 พลังงานที่ให้เข้าไปนี้สามารถเข้าไปทำลายคู่คูเปอร์และให้อนุภาคกึ่งจำนวน 2 อนุภาคออกมาด้วย

อิทธิพลของคู่คูเปอร์ที่มีผลต่อความหนาแน่นสถานะอิเล็กตรอนโคตเดี่ยว โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นสถานะ $N_n(E)$ เป็นฟังก์ชันที่มีความสลับซับซ้อนมาก ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโครงผลึก อย่างไรก็ตาม ในที่นี้จะสนใจ $N_n(E)$ เฉพาะในช่วงเล็ก ๆ $\pm\Delta_0$ ใกล้เคียงกับพลังงานเฟอร์มีเท่านั้น ในช่วง $\pm\Delta_0$ นี้ ถือว่าความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอนที่ไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกันนั้นมีค่าคงที่ นั่นคือ $N_n(E) \approx N_n(E_F)$ กรณีนี้ทำให้มีสถานะที่ใกล้เคียงกับสถานะที่พลังงานเฟอร์มีมาก ทำให้คู่คูเปอร์สามารถถูกกระตุ้นได้ ซึ่งเป็นไปไม่ได้สำหรับอนุภาคกึ่ง โดยจากสมการ (2.106) จะเห็นได้ว่า พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นคู่คูเปอร์นั้นอย่างน้อยที่สุดต้องเท่ากับ Δ_0 นั่นหมายความว่า สำหรับความหนาแน่นสถานะของอนุภาคกึ่งมีช่องว่างพลังงานเกิดขึ้นในช่วง $\pm\Delta_0$ ที่พลังงานเฟอร์มี โดยภายในช่องว่างพลังงานนี้จะไม่มีความหนาแน่นสถานะใด ๆ อยู่เลย สมการสำหรับความหนาแน่นสถานะของอนุภาคกึ่ง $N_s(E)$ ได้มาจากทฤษฎี BCS คือ

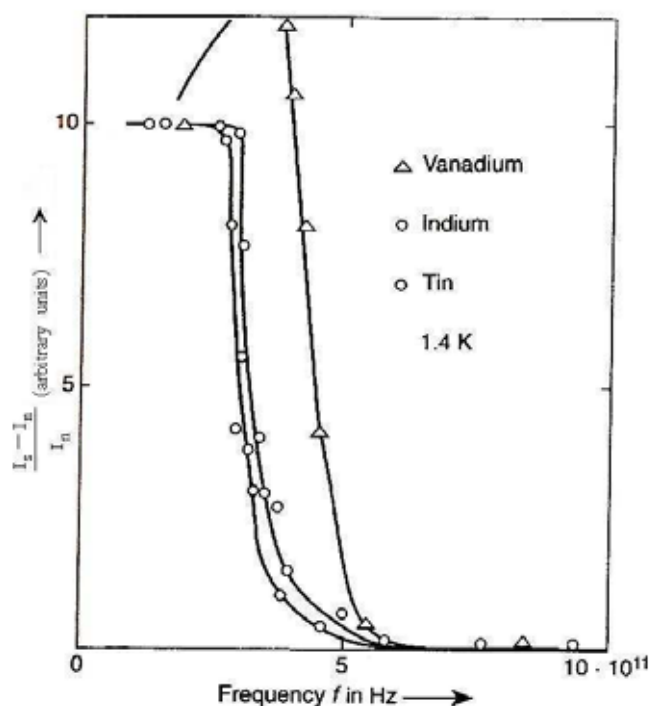
$$N_s(E) = N_n(E_F) \frac{|E - E_F|}{\sqrt{(E - E_F)^2 - \Delta_0^2}} \quad (2.107)$$

เมื่อพลังงาน $|E - E_F| \geq \Delta_0$ แต่ถ้า $|E - E_F| < \Delta_0$ แล้วฟังก์ชัน $N_s(E)$ มีค่าเป็นศูนย์ ถ้าพลังงาน $E = E_F \pm \Delta_0$ แล้ว $N_s(E)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ และสำหรับค่าของ $|E|$ ที่มีค่ามาก ๆ แล้ว $N_s(E)$ มีค่าลดลงเข้าใกล้ $N_n(E_F)$ ดังรูป 2.32 จะเห็นได้ว่าภายในช่วงพลังงาน $E_F \pm \Delta_0$ จะไม่มีความหนาแน่นสถานะอยู่เลย เพราะฉะนั้น $2\Delta_0$ จึงอาจกล่าวได้ว่าเป็น “ช่องว่างพลังงาน” ของสารตัวนำยวดยิ่งนั่นเอง



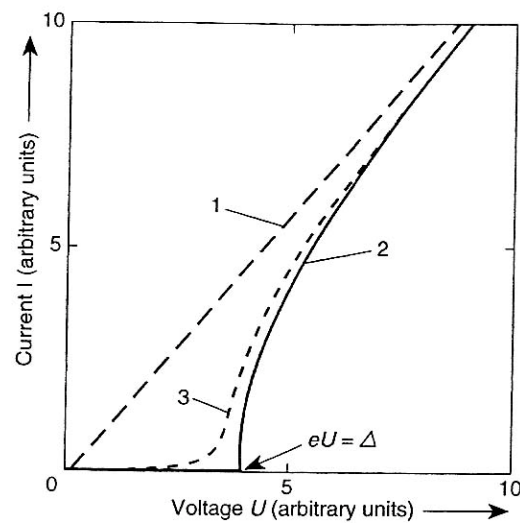
รูป 2.32 แสดงความหนาแน่นสถานะของอนุภาคกึ่งในสารตัวนำยวดยิ่งที่ได้จากทฤษฎี BCS

ช่องว่างพลังงานของสารตัวนำยวดยิ่งสามารถวัดได้จากการทดลองการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและการทะลุผ่านอุโมงค์รอยต่อระหว่างสารตัวนำยวดยิ่งกับตัวนำปกติ นั่นคือ รังสีอินฟราเรดที่ส่องผ่านเข้าไปยังสารตัวนำยวดยิ่งฟิล์มบาง ซึ่งเสนอโดย Glover และ Tinkham ในปี ค.ศ. 1957 ดังรูป 2.33 พบว่า ที่ $T < T_c$ ต้องใช้อินฟราเรดที่มีความถี่ 2.4×10^{11} เฮิรตซ์ (240 GHz) มีความยาวคลื่นประมาณ 1 mm ทำให้ได้ช่องว่างพลังงาน $2\Delta_0$ มีค่าประมาณ 10^{-3} eV



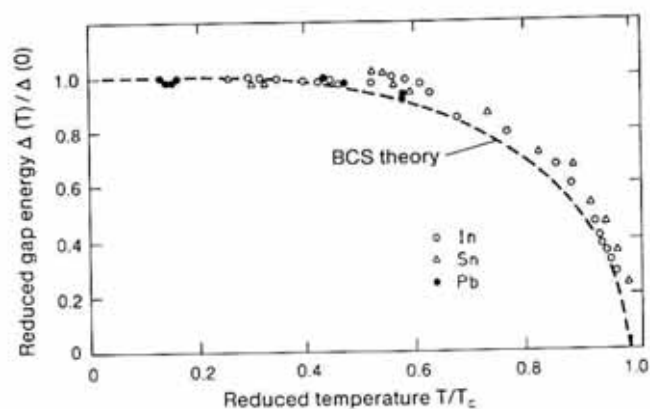
รูป 2.33 แสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารตัวนำยวดยิ่ง Vanadium, Indium และ Tin

ส่วนการทะลุผ่านอุโมงค์รอยต่อระหว่างสารตัวนำยวดยิ่งกับตัวนำปกตินั้น เสนอโดย Giaever ในปี ค.ศ. 1961 ดังรูป 2.34 กราฟเส้นที่ 2 เมื่อ $V < \frac{\Delta_0}{e}$ จะไม่มีกระแสทะลุผ่านอุโมงค์ เนื่องจากอิเล็กตรอนในตัวนำปกติมองไม่เห็นว่ามีสถานะใด ๆ เกิดขึ้นในสารตัวนำยวดยิ่ง จนกระทั่งเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นไปจนถึง $V = \frac{\Delta_0}{e}$ จึงเกิดมีกระแสทะลุผ่านอุโมงค์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีความหนาแน่นสถานะไม่ถูกยึดครองสูงมากในสารตัวนำยวดยิ่ง และเมื่อ $V > \frac{\Delta_0}{e}$ กราฟมีแนวโน้มเข้าสู่กราฟเส้นที่ 1 ซึ่งเป็นกราฟที่ได้จากการทะลุผ่านอุโมงค์รอยต่อระหว่างตัวนำปกติกับตัวนำปกติ



รูป 2.34 แสดงกระแสผ่านอุโมงค์รอยต่อระหว่างสารตัวนำยิ่งยวดกับตัวนำปกติ (เส้นที่ 2) และรอยต่อระหว่างตัวนำปกติกับตัวนำปกติ (เส้นที่ 1)

สมบัติของสารตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ $T > 0$ คู่คูเปอร์บางคู่จะถูกทำลายด้วยความร้อนเนื่องจากความร้อนไปกระตุ้นให้เกิดอนุภาคกึ่ง เรียกว่า “อนุภาคเฟอร์มิออน (Fermion)” ซึ่งก็คืออิเล็กตรอนในตัวนำปกติ ความน่าจะเป็นที่พบอนุภาคกึ่งในสถานะที่มีพลังงานตามที่กำหนดหาได้โดยฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก อนุภาคกึ่งในสถานะ k นี้จะไปกีดขวางไม่ให้เกิดการควบแน่นของคูคูเปอร์ ดังนั้น การลดจำนวนของคูคูเปอร์ลงจึงเป็นการลดพลังงานยึดเหนี่ยวและเป็นการลดช่องว่างพลังงาน Δ_0 ด้วยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือเมื่อ $T \rightarrow T_c$ แล้ว $\Delta_0 \rightarrow 0$ ดังรูป 2.35



รูป 2.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงช่องว่างพลังงานตามอุณหภูมิของ In, Sn และ Pb ที่ได้จากการทดลองการทะลุผ่านอุโมงค์และทฤษฎี BCS

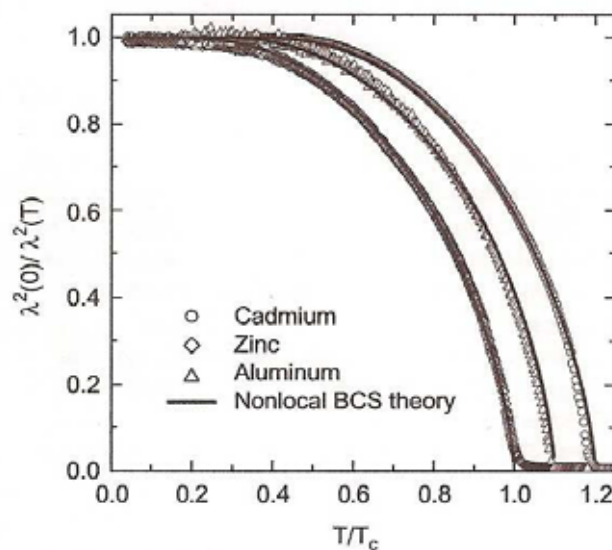
ช่องว่างพลังงานดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับระยะเจาะลึก โดยการประยุกต์จากความหนาแน่นกระแสในหัวข้อไฟฟ้าพลศาสตร์เคลื่อนที่ของ Pippard ทำให้ได้ระยะเจาะลึกเป็นไปตามสมการ (2.108) คือ

$$\frac{\lambda^2(0)}{\lambda^2(T)} = \left[\frac{\Delta(T)}{\Delta_0} \tanh \frac{\Delta(T)}{2k_B T} \right]^{\frac{2}{3}} \quad \text{----- (2.108)}$$

เมื่อ Δ_0 คือ ช่องว่างพลังงานที่ $T = 0 \text{ K}$ และ $\Delta(T)$ เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

$$\Delta(T) = \Delta_0 \tanh \left(\frac{\pi k_B T_c}{\Delta_0} \sqrt{a \left(\frac{T_c}{T} - 1 \right)} \right) \quad \text{----- (2.109)}$$

เมื่อ $a \approx 0.953$ และ $\Delta_0 = 1.76 k_B T_c$ สมการ (2.108) สอดคล้องกับผลการทดลอง ดังรูป 2.36



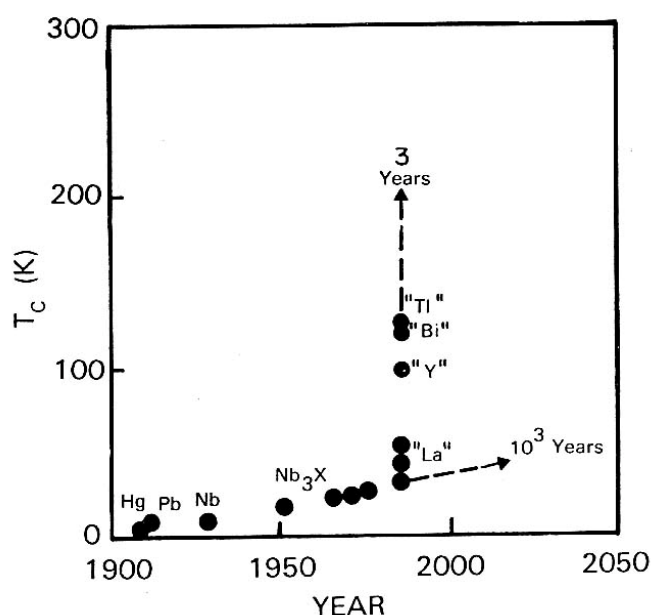
รูป 2.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะเจาะลึกตามอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี BCS ของ Al, Cd และ Zn

2.5 ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูง (High temperature superconductors)

เมื่อวันที่ 17 เมษายน ค.ศ. 1986 ได้มีการตีพิมพ์บทความเรื่อง “Possible High Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System,” เขียนโดย Johannes Georg Bednorz และ Karl Alexander Muller ลงในวารสาร Zeitschrift Fur Physik ของเยอรมันตะวันตก ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นแห่งยุคของสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิวิกฤตสูง หลังจากตลอดระยะเวลาในช่วง 19 ปีก่อนหน้านี้ (1954 – 1973) นักฟิสิกส์ทั้งสองท่านนี้ได้รวบรวมตัวเลขค่าของอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำยวดยิ่งจากบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารต่าง ๆ พบว่า อุณหภูมิวิกฤตได้เพิ่มสูงขึ้นจาก 18.1 ถึง 23.2 K เมื่อเทียบกับค่าตัวเลขอุณหภูมิวิกฤตที่ได้บันทึกไว้ก่อนหน้านี้ ถือได้ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 50 % จึงเป็นที่น่าสนใจมากของนักฟิสิกส์ในขณะนั้น (1986) ต่อมานักฟิสิกส์คนอื่น ๆ ได้เร่งดำเนินการวิจัยเพื่อค้นหาสารตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงที่สุด โดยในตอนต้นปี ค.ศ. 1987 ได้มีการค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งในระบบ La-Sr-Cu-O มีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 35 – 40 K ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (Cavaz, Taka5, Tara1) และเพิ่มขึ้นไปจนถึง 52 K ที่ความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ (Chuzz) หลังจากนั้นได้ค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งในระบบ Y-Ba-Cu-O มีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 90 – 95 K (Wuzzz, Zhaoz) และค้นพบสารในระบบ Bi และ Tl มีอุณหภูมิวิกฤตสูงมากประมาณ 110 – 120 K (Chuz5, Maeda, Gaoz2, Haze1, Sheng, Shen1)

ตาราง 2.1 ค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำยวดยิ่งชนิดต่าง ๆ และปีที่ค้นพบ

Material	Type	T_c (K)	Year of Discovery
Hg	Element	4.1	1911
Pb	Element	7.2	1913
Nb	Element	9.3	1930
Nb ₃ Sn	Intermetallic	18.1	1954
Nb ₃ (Al _{0.75} Ge _{0.25})	Intermetallic	20–21	1966
Nb ₃ Ga	Intermetallic	20.3	1971
Nb ₃ Ge	Intermetallic	23.2	1973
Ba _x La _{5-x} Cu ₅ O _{5(3-y)}	Ceramic	30–35	1986
(La _{0.9} Ba _{0.1}) ₂ CuO _{4-δ} , at 1 GPa	Ceramic	52.5	1986
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	Ceramic	90–95	1987
BiSrCaCuO	Ceramic	105–120	1988
TlBaCaCuO	Ceramic	110–125	1988



รูป 2.37 แสดงการค้นพบสารตัวนำยิ่งยวดชนิดต่าง ๆ และอุณหภูมิวิกฤต

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูงซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกออกไซด์และการหาอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูง

2.5.1 สารตัวนำยิ่งยวดจำพวกออกไซด์ (Oxide-type Superconductors)

ได้มีการแบ่งสารตัวนำยิ่งยวดชนิดต่าง ๆ ที่เป็นสารประกอบจำพวกออกไซด์ตามค่าของอุณหภูมิวิกฤตได้ ดังนี้

2.5.1.1 สารตัวนำยิ่งยวดจำพวกออกไซด์ที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำ ได้แก่ SrTiO_3 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) มีอุณหภูมิวิกฤต T_c ประมาณ 0.3 K , LiTi_2O_4 โครงสร้างแบบสไปเนล (Spinel) มีอุณหภูมิวิกฤต T_c ประมาณ 13.7 K

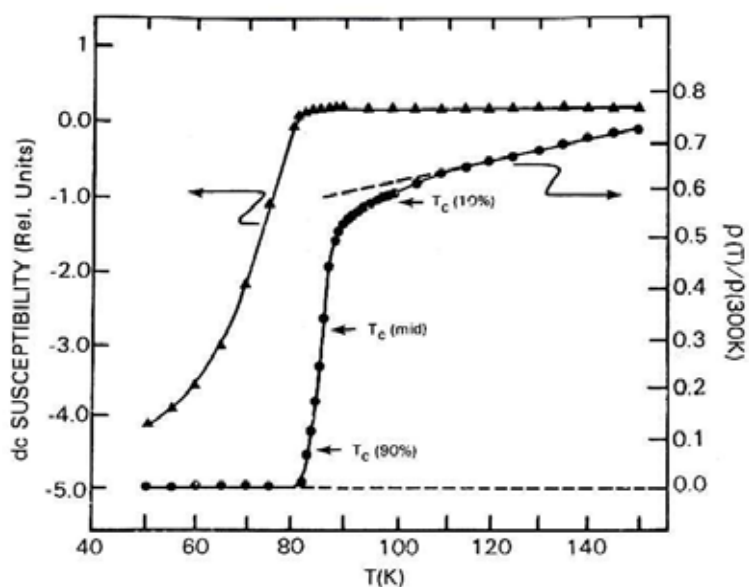
2.5.1.2 สารตัวนำยิ่งยวดจำพวกออกไซด์ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูง ได้แก่ สารประกอบของ LaSrCuO โครงสร้าง 21 มีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ในช่วงประมาณ 35 – 40 K ซึ่งถือว่าเป็นสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิวิกฤตสูงชนิดแรก มีสูตรทั่วไป คือ $(\text{La}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{CuO}_{4-\delta}$ ปกติแล้ว M ในสูตรทั่วไป อาจเป็น Sr หรือ Ba เมื่อ x มีค่าน้อยๆ และ $\delta = 0$, สารประกอบของ YBaCuO โครงสร้าง 123 มีสูตรทั่วไป คือ $\text{Y}_{1-x}\text{Ba}_{2-y}\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ มีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 90 – 95

K ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว (77 K) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารประกอบที่สำคัญ คือ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ที่มีค่า $x = y = 0$ และ $\delta = 0$, สารประกอบของ BiSrCaCuO และ TlBaCaCuO ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้มีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันมาก มีอุณหภูมิวิกฤตสูงประมาณ 110 – 120 K

2.5.2 อุณหภูมิวิกฤต

ในการให้นิยามของอุณหภูมิวิกฤตนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งที่มีความกว้างอยู่ค่าหนึ่งหรือมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ กรณีเช่นนี้จึงมีการให้นิยามของอุณหภูมิวิกฤต ($T_{c(\text{inflect})}$) คือ จุดที่มีการเปลี่ยนสถานะเดิมไปยังสถานะใหม่อย่างรวดเร็วที่สุดถือว่าเป็นอุณหภูมิวิกฤต โดยหาได้จากอุณหภูมิที่อยู่รอบ ๆ อุณหภูมิวิกฤตในขณะที่กำลังมีการเปลี่ยนสถานะ โดยปกติทั่วไปแล้วนักวิจัยจะไม่ค่อยให้ความสนใจมากนัก แต่จะให้ความสนใจกับตำแหน่งจุดที่กำลังค่อย ๆ เริ่มมีการเปลี่ยนสถานะ ($T_{c(\text{onset})}$) หรือในขณะที่กำลังเข้าสู่จุดสุดท้ายของการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะใหม่ ($T_{c(\text{zero})}$) ในการเปลี่ยนสถานะของสารตัวนำยวดยิ่งนี้นักวิจัยได้ให้ความสำคัญเป็นพิเศษกับตำแหน่งที่กำลังเริ่มมีการเปลี่ยนสถานะหรืออุณหภูมิสูงสุดที่สารเริ่มแสดงสมบัติการนำยวดยิ่งปรากฏออกมาให้เห็น และให้ความสำคัญกับจุดที่มีค่าความต้านทานเป็นศูนย์

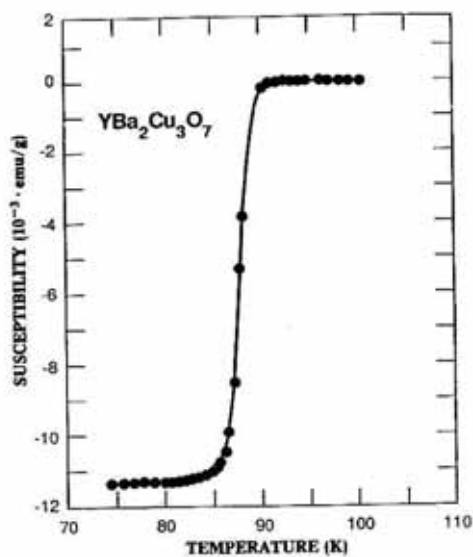
ในการอธิบายกราฟสภาพต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้น มีนักวิจัยหลาย ๆ ท่านมักจะกล่าวถึงจุดที่กำลังเริ่มเปลี่ยนสถานะ (Onset), จุดลดค่าสภาพต้านทานลง 5 %, จุดลดค่าสภาพต้านทานลง 10 %, จุดกึ่งกลาง (Midpoint), จุดลดค่าสภาพต้านทานลง 90 %, จุดลดค่าสภาพต้านทานลง 95 % และจุดที่มีค่าสภาพต้านทานเป็นศูนย์ (Zero resistivity points) ดังรูป 2.38 ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ได้เริ่มต้นกำหนดขึ้นมาโดยการเลือกเอาจุดที่กำลังเริ่มเปลี่ยนสถานะหรือจุดลดค่าสภาพต้านทานลง 0 % ซึ่งอยู่ตรงตำแหน่งที่เมื่อกราฟที่ได้จากการทดลองเริ่มปรากฏแสดงให้เห็นว่ามีการลดต่ำลงจากแนวเส้นประของค่าสภาพต้านทาน ดังรูป 2.38 ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{mid})}$ ที่ได้จากข้อมูลการทดลอง ปกติโดยทั่วไปแล้ว คือ ค่าตรงตำแหน่งจุดกึ่งกลาง ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของสภาพต้านทานไฟฟ้า $\rho(T)/\rho_0$ เท่ากับ 1/2 แต่สำหรับค่าอุณหภูมิที่จุด ลดค่าสภาพต้านทานลง 0 % นั้น ก่อนข้างกำหนดหาได้ยาก ในการรายงานอุณหภูมิวิกฤตนั้น ส่วนใหญ่แล้วจะรายงานค่าอุณหภูมิของสารในขณะที่กำลังเริ่มเปลี่ยนสถานะ ($T_{c(\text{onset})}$)



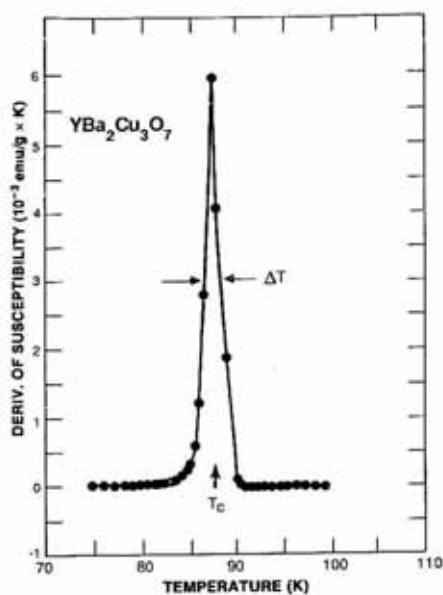
รูป 2.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันและสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ในช่วง 50 – 150 K ของสาร $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Kuzzzz)

ส่วนในการอธิบายและการหาค่าอุณหภูมิวิกฤตจากกราฟอนุพันธ์ของสภาพต้านทาน หรือซัสเซปทิบิลิตี (Susceptibility) นั้นก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง นั่นคือ ถ้านำข้อมูลค่าซัสเซปทิบิลิตี $\chi(T)$ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสาร $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_2$ มาเขียนกราฟดังรูป 2.39 แล้วคำนวณหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอนุพันธ์อันดับสองของข้อมูลเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง นำมาเขียนกราฟได้ดังรูป 2.40 และรูป 2.41 ตามลำดับ (Almas, Babic, Datta, Datt2, Gurv1, Pool3, Purcu) จากกราฟดังรูป 2.40 อุณหภูมิตรงตำแหน่งจุดที่อนุพันธ์อันดับหนึ่งมีค่ามากที่สุด คือ อุณหภูมิวิกฤต ($T_{c(\text{inflect})}$) นั่นคือ เป็นจุดเปลี่ยนแปลง (Inflection point) หรือจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าซัสเซปทิบิลิตีอย่างรวดเร็วที่สุด โดยมีความกว้างของการเปลี่ยนสถานะเป็น ΔT อยู่ระหว่างจุด 2 จุด ที่มีค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของค่ามากที่สุด ดังรูป 2.40 ส่วนกราฟรูป 2.41 นั้น สามารถหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ($T_{c(\text{inflect})}$) ได้ถูกต้องแม่นยำกว่ากราฟอื่นๆ โดยหาได้จากอุณหภูมิที่เมื่อเส้นกราฟตัดผ่านค่าอนุพันธ์อันดับสองเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ยังสามารถหาความกว้างของการเปลี่ยนสถานะพีคถึงพีค ΔT_{pp} หาอัตราส่วนความกว้าง $\Delta T/\Delta T_{pp}$ และตัวแปรอสมมาตร (Asymmetry parameter) $(A - B)/(A + B)$ ได้ โดยกำหนดให้ A เป็นระยะจากเส้นฐานถึงจุดยอดของกราฟและ B เป็นระยะจากเส้นฐานถึงจุดต่ำสุดของกราฟ ซึ่งค่าต่างๆ ที่ได้จาก

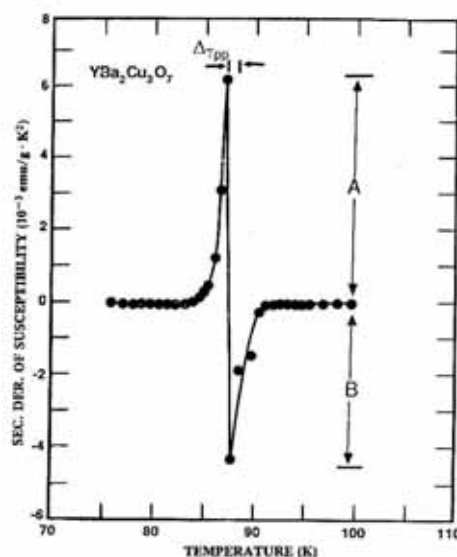
กราฟรูป 2.41 นี้ เป็นองค์ประกอบของการวัดค่าเพื่อใช้ในการอธิบายรูปแบบลักษณะของข้อมูลและกราฟรูป 2.39



รูป 2.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างซัสเซปทิบิลิตี $\chi(T)$ กับอุณหภูมิของสารตัวอย่าง $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ อยู่ในสนามแม่เหล็ก 0.1 mT (C.Almasan)



รูป 2.40 แสดงกราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งของซัสเซปทิบิลิตีเทียบกับอุณหภูมิในรูป 2.39 และพีคอยู่ที่ตำแหน่ง $T_c = 87.65 \pm 0.15$ K ความกว้าง $\Delta T = 0.95 \pm 0.15$ K (C.Almasan, J.Estrada)



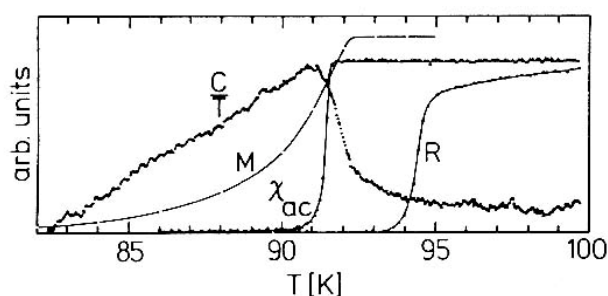
รูป 2.41 แสดงกราฟอนุพันธ์อันดับสองของซัสเซปทิบิลิตีเทียบกับอุณหภูมิในรูป 2.39

และความกว้างพีคถึงพีค $\Delta T_{pp} = 0.5$ K (C.Almasan, J.Estrada)

ในกรณีกราฟของซัสเซปทิบิลิตีหรือของสภาพต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมีรูปแบบลักษณะเป็นแอนติสมมาตร (Antisymmetric) รอบจุดกึ่งกลาง ทำให้กราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งสมมาตร (Symmetric) และกราฟอนุพันธ์อันดับสองแอนติสมมาตร ในกรณีเช่นนี้จุดเปลี่ยนแปลงของกราฟระหว่าง $\chi(T)$ กับ T จะอยู่ที่จุดกึ่งกลาง ทำให้ได้ว่ากราฟทั้งสามให้ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ และอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{mid})}$ ค่าเดียวกัน แต่ถ้ากราฟซัสเซปทิบิลิตีหรือสภาพต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและกราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่สมมาตร (Unsymmetrical) ทำให้จุดเปลี่ยนแปลงและจุดกึ่งกลางอยู่คนละจุดกัน กราฟรูป 2.39 – 2.41 จึงให้ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ และอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{mid})}$ คนละค่ากัน

ในการพิจารณาอธิบายสภาพนำยวดยิ่งนั้น สามารถพิจารณาได้จากสมบัติความต้านทานเป็นศูนย์และความเป็นไดอาแมกเนติกที่สมบูรณ์ สำหรับตัวนำยวดยิ่งเนื้อเดียวในอุดมคติแล้ว ในการวัดค่าความต้านทานและซัสเซปทิบิลิตีเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้น ควรให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตค่าเดียวกัน จากหลาย ๆ บทความที่ได้รายงานข้อมูลผลการวัดค่าสภาพต้านทานและซัสเซปทิบิลิตีที่วัดได้จากสารตัวอย่างชิ้นเดียวกัน ส่วนมากแล้วจะได้กราฟของสภาพต้านทานชันกว่ากราฟของซัสเซปทิบิลิตีที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ (Akimi, Grant, Kuzzz, Maple, Sampa, Takag, Yoshi) นอกจากนี้ บางครั้งอุณหภูมิจุดที่กำลังเริ่มเปลี่ยนสถานะของกราฟสภาพต้านทานยังสูงกว่าอุณหภูมิจุดที่กำลังเริ่มเปลี่ยนสถานะของกราฟซัสเซปทิบิลิตี (Grant, Odazz, Sampa) และในบางครั้ง

อุณหภูมิจุดที่กำลังเริ่มเปลี่ยนสถานะของกราฟทั้งสองก็มีค่าใกล้เคียงกัน (Maple, Takag, Yoshi) โดยปกติทั่วไปแล้ว อุณหภูมิวิกฤตถูกกำหนดนิยามจากจุดกึ่งกลางของกราฟสภาพต้านทาน ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากกราฟ susceptibility บิลิตีจากสารตัวอย่างขึ้นเดียวกัน รูป 2.42 แสดงกราฟของสภาพต้านทาน ความจุความร้อนจำเพาะ แมกนีไทเซชัน และเอชชีสเซบทิบิลิตีของสารตัวอย่าง YBaCuO (Juno1) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟของสภาพต้านทานขยับมาทางที่มีอุณหภูมิสูงกว่า



รูป 2.42 แสดงกราฟของสภาพต้านทาน ความจุความร้อนจำเพาะ แมกนีไทเซชัน และเอชชีสเซบทิบิลิตีของสารตัวอย่าง YBaCuO

ค่า susceptibility บิลิตีที่ได้จากการวัดเป็นตัวกำหนดสถานะทางแม่เหล็กภายในสารตัวนำยวดยิ่งและยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงบริเวณที่อยู่ในสถานะนำยวดยิ่งของสารตัวอย่างได้ดีกว่าค่าสภาพต้านทานที่ได้จากการวัดของสารตัวอย่าง หากแต่เพียงค่าสภาพต้านทานที่ได้จากการวัดของสารตัวอย่างจะแสดงให้เห็นถึงความต่อเนื่องของเนื้อสารที่อยู่ในสถานะนำยวดยิ่งเท่านั้น ค่า susceptibility บิลิตีหรือความเป็นแม่เหล็ก (Magnetism) ที่ได้จากการวัดจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงสถานะนำยวดยิ่งตลอดทั่วทั้งก้อนในการทดลองได้ดีกว่าค่าสภาพต้านทาน ในขณะที่ค่าสภาพต้านทานที่ได้จากการวัดนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ใช้ได้ดีกว่า

2.6 แผนภาพเฟสสมดุล (Phase equilibrium diagram)

เฟส (Phase) คือ บริเวณที่มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบแตกต่างจากบริเวณอื่น โดยมีขอบเขตเฟส (Phase boundary) ที่แน่นอน เช่น น้ำกับน้ำแข็งมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างแตกต่างกัน (น้ำเป็นของเหลวที่ไม่มีโครงสร้างผลึก แต่น้ำแข็งเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล) ดังนั้น น้ำและน้ำแข็งจะมีเฟสที่ต่างกัน

โลหะผสม (Alloy) หรือสารละลาย (Solution) จะมีเฟสเดียว เพราะโลหะหรือสารประกอบที่นำมาผสมกันสามารถรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Homogeneous) จึงไม่มีการแยกเฟสเกิดขึ้น แต่ถ้าไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) จะแยกเฟสให้เห็นเกิดเป็นของผสม (Mixture) เช่น ของผสมระหว่างทรายกับน้ำจะมี 2 เฟส คือ เฟสที่เป็นของแข็ง (ทราย) และของเหลว (น้ำ)

แผนภาพเฟส (Phase diagrams) คือ แผนภาพที่แสดงให้รู้ว่าวัสดุนั้นมีเฟสอะไรเกิดขึ้นบ้างที่อุณหภูมิ, ความดัน, และองค์ประกอบต่าง ๆ กัน และทุกเฟสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่มีปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของเฟสกับสิ่งแวดล้อมและสมบัติของสารที่กำลังพิจารณาจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จึงอาจเรียกว่า “**แผนภาพเฟสสมดุล (Phase equilibrium diagram)**”

การศึกษาแผนภาพเฟส มีประโยชน์คือ

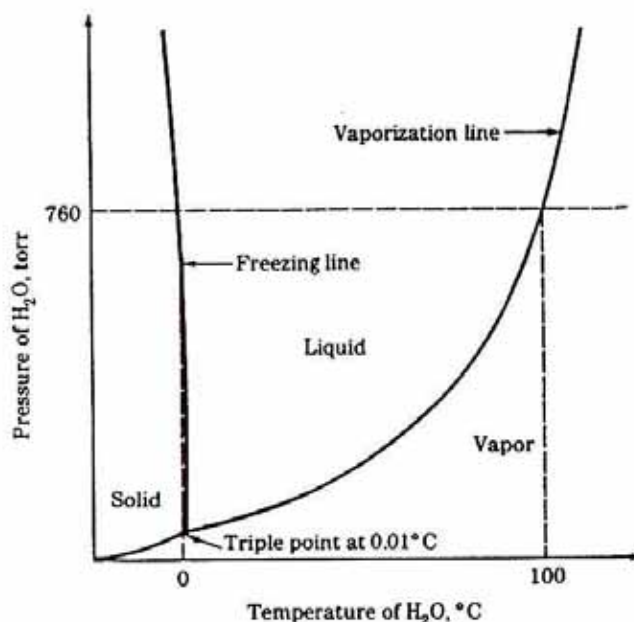
- 1) ทำนายได้ว่าของผสมที่มีองค์ประกอบหนึ่ง ๆ ที่อุณหภูมิใด ๆ จะเกิดเฟสอะไรบ้างในภาวะสมดุล
- 2) บอกองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นได้
- 3) คำนวณปริมาณของแต่ละเฟสที่มีอยู่ได้

2.6.1 แผนภาพเฟสของธาตุเดี่ยว (Element) หรือสารบริสุทธิ์ (pure substance)

สารบริสุทธิ์ เช่น น้ำ จะเกิดอยู่ในเฟสที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน ตัวอย่างสารบริสุทธิ์ที่มี 2 เฟส ได้แก่ น้ำกับน้ำแข็งในถ้วยแก้วหรือน้ำกับไอน้ำขณะที่น้ำเดือด

การที่น้ำจะอยู่ในสถานะใด (ของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส) แบบมีเฟสเดียว สองเฟส หรือสามเฟส อยู่ด้วยกันอย่างสมดุลจะขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน ดังแสดงในรูป 2.43 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำบริสุทธิ์มีจำนวนเฟสมากที่สุด 3 เฟส (ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส) ไม่ว่าอุณหภูมิและความดันจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม เส้นกราฟระหว่างเฟส เรียกว่า “**เส้นสมดุล (Equilibrium line)**” และทุกจุดบนเส้นสมดุลเป็นอุณหภูมิและความดันซึ่งเฟส 2 เฟส (ด้านบนและด้านล่างของเส้น) จะอยู่ด้วยกันอย่างสมดุล โดยน้ำและไอน้ำอยู่ด้วยกันอย่างสมดุลบนเส้นการกลายเป็นไอ (Vaporization line) และน้ำกับน้ำแข็งอยู่ด้วยกันอย่างสมดุลบนเส้นเยือกแข็ง (Freezing line) ส่วนน้ำแข็งกับไอน้ำอยู่ด้วยกันอย่างสมดุลบนเส้นการระเหิด (Sublimation line)

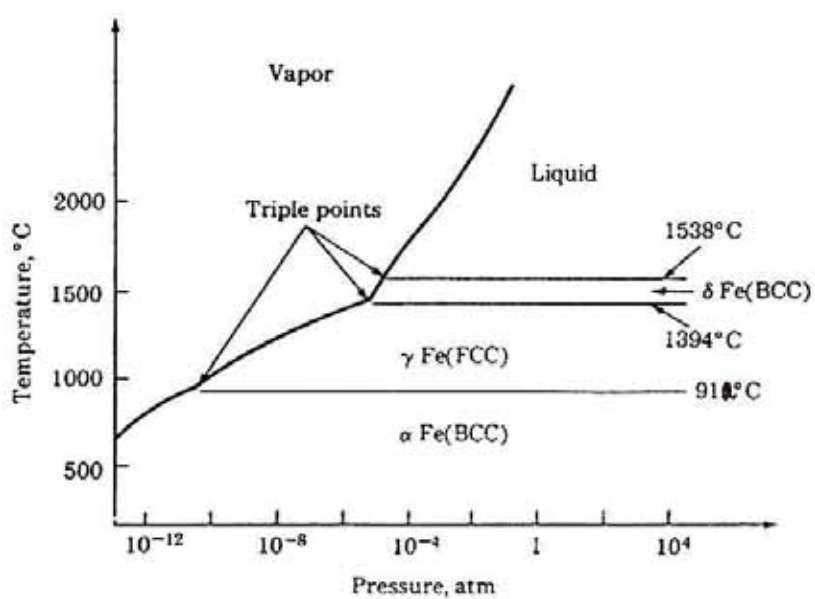
เส้นเหล่านี้เป็นเส้นสมดุลของ 2 เฟส นอกจากนี้ยังมีจุดร่วมสาม (Triple point) ซึ่งมี 3 เฟส อยู่ด้วยกันอย่างสมดุล (น้ำ น้ำแข็ง และไอน้ำ) ที่ความดันต่ำ 4.579 ทอร์และอุณหภูมิต่ำ 0.0098 °C



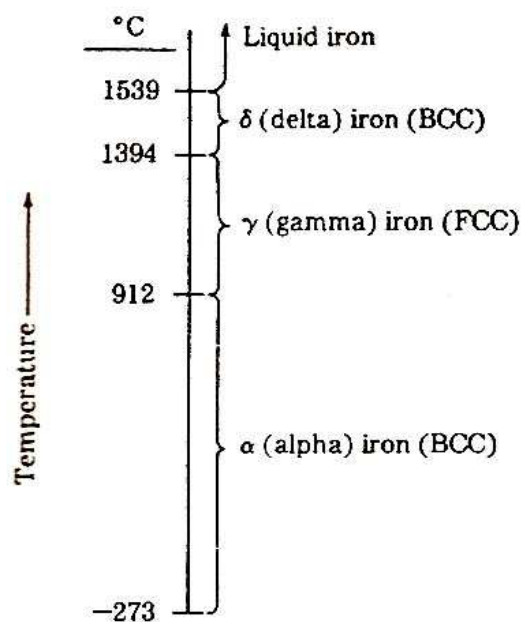
รูป 2.43 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของน้ำบริสุทธิ์

แผนภาพเฟสสมดุลระหว่างความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์อื่น เช่น เหล็ก แสดงไว้ในรูป 2.44 ซึ่งมีทั้งหมด 5 เฟส โดยเป็นเฟสของเหลวและไออย่างละ 1 เฟส และเฟสของแข็งที่มีโครงสร้างต่างกัน 3 เฟส ทั้งนี้เนื่องจากการมีอัญรูป (Allotropy) ของเหล็ก นั่นคือเหล็กแอลฟา (α Fe (bcc)), เหล็กแกมมา (γ Fe (fcc)) และเหล็กเดลตา (δ Fe (bcc)) ซึ่งจะเกิดเฟสเหล่านี้ได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ดังรูป 2.45 จะเห็นได้ว่าขอบเขตระหว่างเฟสของแข็งจะมีสมบัติเหมือนขอบเขตเฟสระหว่างของเหลวและของแข็ง เช่น α Fe และ γ Fe จะอยู่ด้วยกันอย่างสมดุลที่อุณหภูมิ 912 °C ความดัน 1 บรรยากาศ และที่เหนือ 912 °C จะมีแต่ γ Fe เท่านั้น และที่ต่ำกว่า 912 °C จะมีแต่ α Fe เฟสเดียวเช่นกัน นอกจากนี้ในแผนภาพอุณหภูมิและความดันของเหล็ก รูป 2.44 มีจุดร่วมสามอยู่ 3 แห่ง (มี 3 เฟสอยู่ร่วมกัน) ดังนี้

- 1) ไอ γ Fe และ α Fe ที่อุณหภูมิ 912 °C
- 2) ไอ δ Fe และ γ Fe ที่อุณหภูมิ 1400 °C
- 3) ของเหลว ไอ และ δ Fe ที่อุณหภูมิ 1539 °C



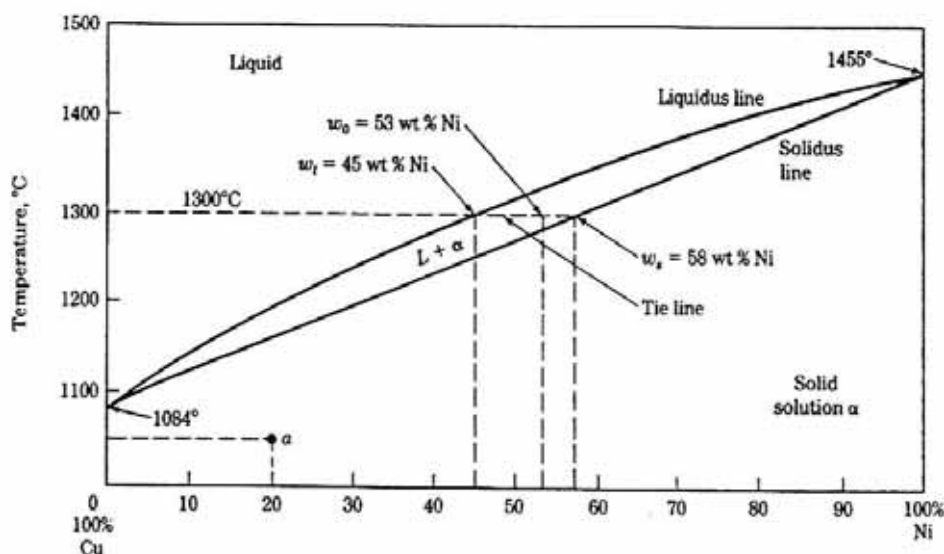
รูป 2.44 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของเหล็กบริสุทธิ์



รูป 2.45 แสดงอัญรูปของเหล็กที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ

2.6.2 แผนภาพเฟสของระบบสารคู่ (Binary system)

ระบบที่ประกอบด้วยโลหะสองชนิดที่เป็นพวกอัลลอยส์ (Alloy) หรือระบบที่ประกอบด้วยสารประกอบ (Compound) สองชนิด มีลักษณะดังรูป 2.46

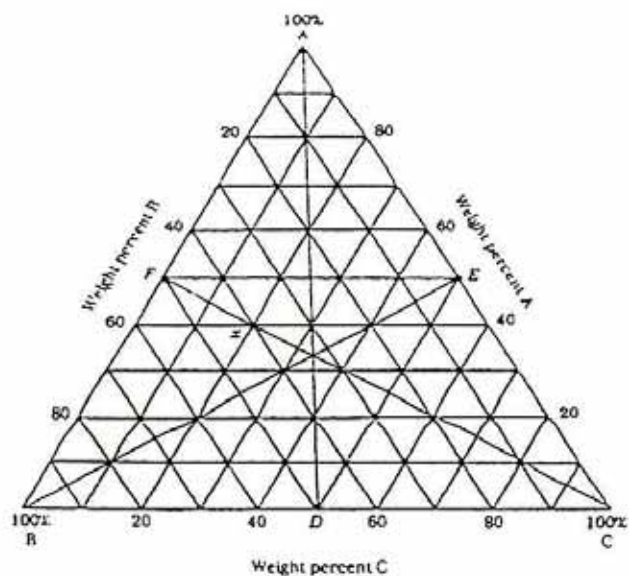


รูป 2.46 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของทองแดง-นิกเกิล

บริเวณที่อยู่เหนือเส้นบนเป็นบริเวณที่เป็นของเหลว จะมีบริเวณที่แสดงให้เห็นว่าระบบมีแต่เฟสของของเหลว ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้เส้นล่างเป็นบริเวณของของแข็งจะเป็นบริเวณที่แสดงให้เห็นว่าระบบมีเฟสของของแข็งเพียงเฟสเดียว ส่วนบริเวณที่อยู่ระหว่างบริเวณของของเหลวและบริเวณของของแข็งนั้น ระบบจะมีสองเฟส คือ เฟสของของเหลวและเฟสของของแข็ง ปริมาณของแต่ละเฟสที่มีอยู่ในระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิ

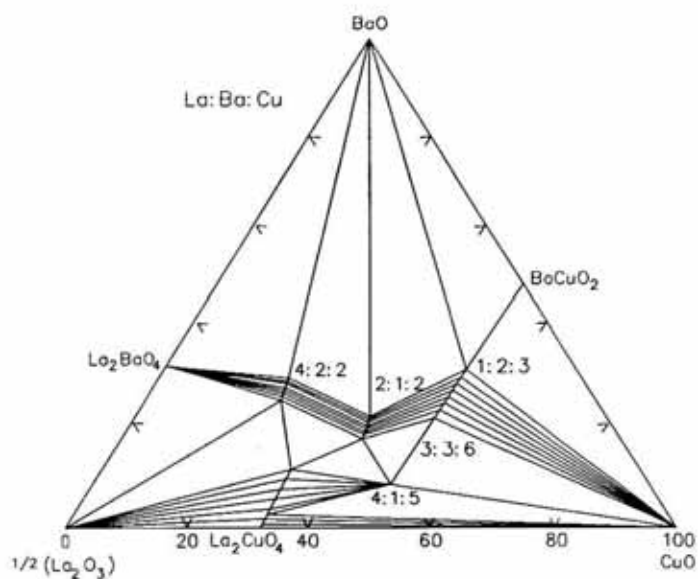
2.6.3 แผนภาพเฟสของระบบสามตัว (Ternary system)

ประกอบด้วยสาร 3 ชนิด มักจะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าและองค์ประกอบของระบบแสดงบนรูปสามเหลี่ยมด้านเท่านี้ ซึ่งสารบริสุทธิ์หรือธาตุเดี่ยวที่เป็นองค์ประกอบทั้ง 3 ชนิด จะอยู่ที่มุมของสามเหลี่ยมด้านเท่านี้ แผนภาพเฟสประกอบด้วยสาร A, B, C ดังรูป 2.47

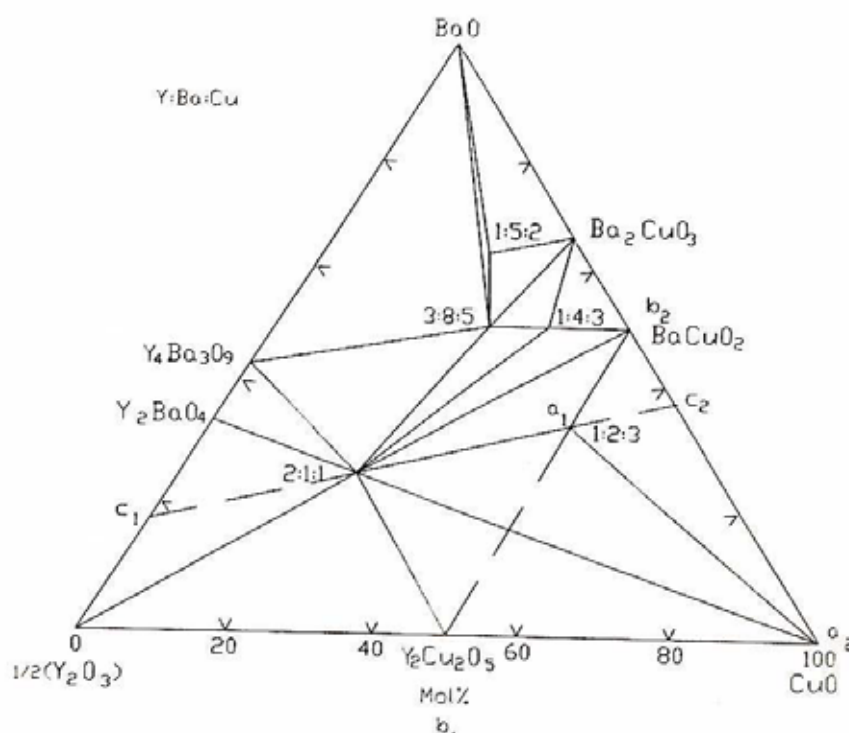


รูป 2.47 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบสามตัวที่ประกอบด้วยโลหะบริสุทธิ์ A, B, C

จากการศึกษาพบว่า Deleeuw และคณะ ได้ทำแผนภาพเฟสสมดุลระหว่างสารพวก $\frac{1}{2}(\text{La}_2\text{O}_3) - \text{BaO} - \text{CuO}$ หรือ $\frac{1}{2}(\text{Y}_2\text{O}_3) - \text{BaO} - \text{CuO}$ เผาในอากาศที่อุณหภูมิ 950 °C ขึ้น ดังรูป 2.48 และ 2.49



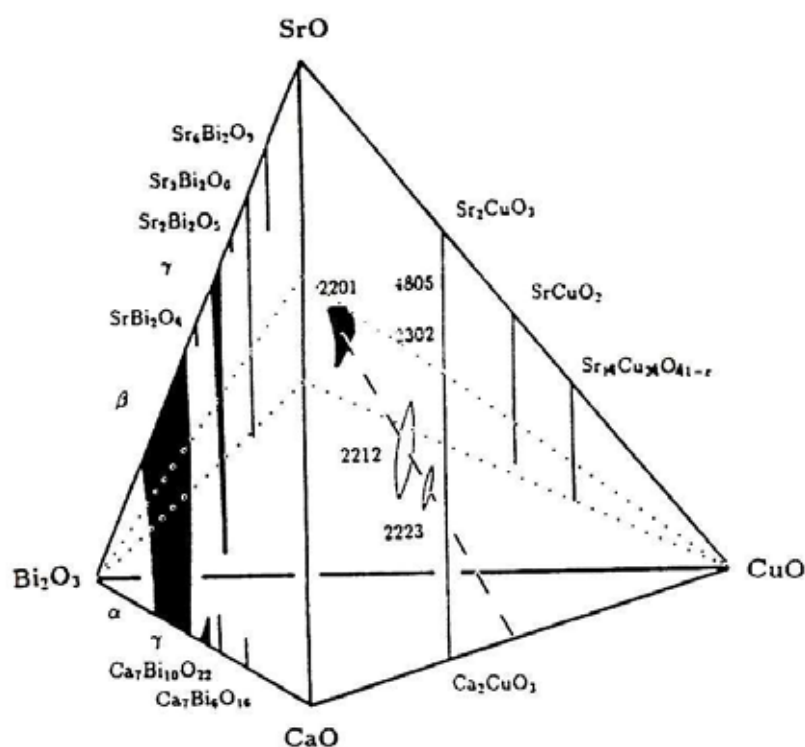
รูป 2.48 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบ $\frac{1}{2}(\text{La}_2\text{O}_3) - \text{BaO} - \text{CuO}$



รูป 2.49 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบ $\frac{1}{2}(\text{Y}_2\text{O}_3) - \text{BaO} - \text{CuO}$ ที่อุณหภูมิ 950 °C

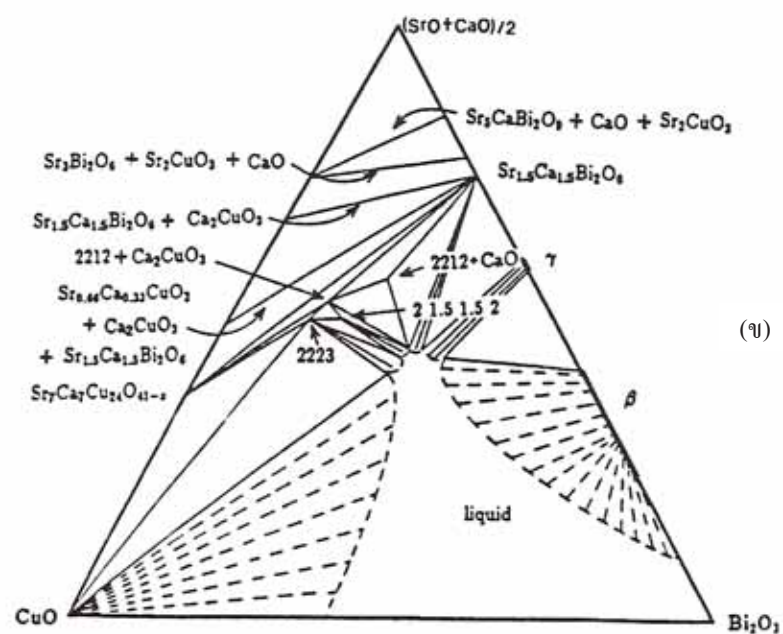
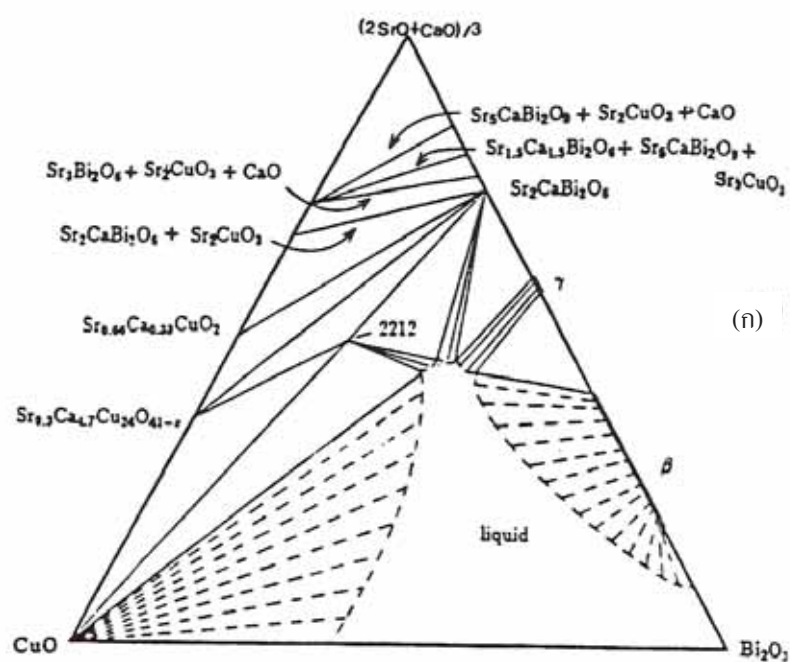
2.6.4 แผนภาพเฟสของระบบสี่ตัว (Quaternary system)

ประกอบด้วยสารสี่ตัว โดยมีสารบริสุทธิ์หรือธาตุเดี่ยวสี่สารอยู่ที่มุมของพีระมิด และแบ่งออกเป็น 10 ระนาบ แต่ละระนาบแบ่งออกเป็นด้านละ 10 ช่องเท่า ๆ กัน ซึ่งแต่ละช่องจะเป็นตัวบอกถึงสัดส่วนองค์ประกอบของสารที่ต้องการ จากการศึกษาพบว่า มีนักวิทยาศาสตร์ได้ทำแผนภาพเฟสสมดุลในระบบสี่ คือ Schulze และคณะ ได้ทำแผนภาพสมดุลระหว่างสารพวก $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{SrO} - \text{CaO} - \text{CuO}$ เฝ้าในอากาศที่อุณหภูมิ 850 °C โดยมีเพียงรายละเอียดในระนาบ $\text{Bi}_2\text{O}_3 - (2\text{SrO} + \text{CaO})/3 - \text{CuO}$ กับระนาบของ $\text{Bi}_2\text{O}_3 - (\text{SrO} + \text{CaO})/2 - \text{CuO}$ ดังรูป 2.50, 2.51 (ก) และ 2.51 (ข)



รูป 2.50 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบ $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{SrO} - \text{CaO} - \text{CuO}$
 เฝ้าในอากาศที่อุณหภูมิ 850°C

จากรูป 2.50 สารประกอบในระบบสี่ตัว $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{SrO} - \text{CaO} - \text{CuO}$ เฝ้าในอากาศที่อุณหภูมิ 850°C พบสารประกอบกลุ่มแรก คือ กลุ่มของ Ca และ Sr ได้แก่ $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_9$, $\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6$, $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$, SrBi_2O_4 และ $\text{Ca}_7\text{Bi}_{10}\text{O}_{22}$, $\text{Ca}_7\text{Bi}_6\text{O}_{16}$ กลุ่มที่สอง คือ Ca และ Sr ได้แก่ SrCuO_3 , SrCuO_2 , $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{34}\text{O}_{41-x}$ และ Ca_2CuO_3 กลุ่มที่สาม คือ สารที่อยู่ในกลุ่มของ $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{SrO} - \text{CaO} - \text{CuO}$ ได้แก่ Bi_{2201} , $\text{Bi}_4\text{Sr}_8\text{Cu}_5\text{O}_{19}$ และ $\text{Bi}_2\text{Sr}_3\text{Cu}_2\text{O}_7$ ส่วนในรายละเอียดได้แสดงในรูป 2.51 ซึ่งแสดงเฟสที่เกิดขึ้นในการเผาที่อุณหภูมิ 850°C ประกอบด้วยเฟส Bi_{2223} และ Bi_{2212}



รูป 2.51 แสดงแผนภาพเฟสสมดุลของระบบสี่ตัวเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 850 °C

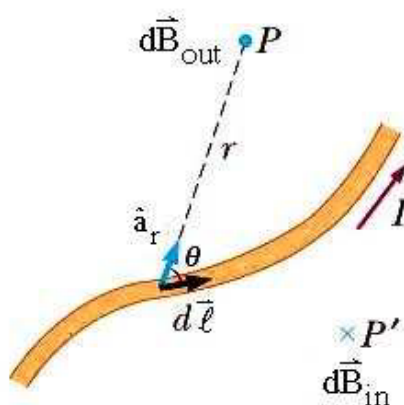
(ก) ระบบ Bi_2O_3 -($2\text{SrO}+\text{CaO}$)/3-CuO

(ข) ระบบ Bi_2O_3 -($\text{SrO}+\text{CaO}$)/2-CuO

2.7 ขดลวดโซลินอยด์ (The Solenoids)

2.7.1 กฎบีโตร์-ซาวาร์ต (The Biot-Savart Law)

ในปี ค.ศ. 1819 เออร์สเตด (Oersted) พบว่า ปลายเข็มทิศชี้เบี่ยงเบนไปจากแนวเดิมเมื่อนำมาวางไว้ในบริเวณใกล้ ๆ ตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ต่อมา Jean-Baptiste Biot (1774 – 1862) และ Felix Savart (1791 – 1841) ได้ทำการทดลองแรงที่กระทำต่อแท่งแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ จากการทดลอง พบว่า สนามแม่เหล็ก ณ จุดใด ๆ ในปริภูมิเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ นั่นคือ สนามแม่เหล็กย่อย $d\vec{B}$ ที่จุด P สัมพันธ์กับความยาวส่วนย่อยของลวดตัวนำ $d\vec{\ell}$ ที่มีกระแสไฟฟ้าสม่ำเสมอไหลผ่าน I ดังรูป 2.52



รูป 2.52 แสดงสนามแม่เหล็กที่จุด P เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ

จากรูป 2.52 สนามแม่เหล็กย่อย $d\vec{B}$ ตั้งฉากกับความยาวส่วนย่อย $d\vec{\ell}$ และเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{a}_r$ โดยที่ขนาดของสนามแม่เหล็กย่อย dB แปรผันตรงกับผลคูณของ $I d\ell \sin \theta$ และแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง r^2 เขียนเป็นสมการ ซึ่งเรียกว่า “กฎบีโตร์-ซาวาร์ต” ได้ดังนี้

$$dB \propto \frac{I d\ell \sin \theta}{r^2} \quad \text{-----} \quad (2.110)$$

หรือ

$$dB = k \frac{I d\ell \sin \theta}{r^2} \quad \text{-----} \quad (2.111)$$

หรือ
$$dB = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\ell \sin \theta}{r^2} \quad \text{----- (2.112)}$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างความยาวส่วนย่อยของลวดตัวนำ $d\vec{\ell}$ กับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{a}_r$

r คือ เป็นระยะทางระหว่างจุด P กับส่วนย่อยของลวดตัวนำ $d\vec{\ell}$

k คือ ค่าคงที่ของตัวกลาง มีค่าเท่ากับ $\mu/4\pi$

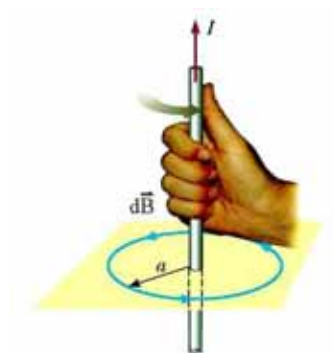
สมการ (2.112) จัดให้อยู่ในรูปสมการเวกเตอร์ได้ คือ

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \hat{a}_r}{r^2} \quad \text{----- (2.113)}$$

หรือ

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3} \quad \text{----- (2.114)}$$

เมื่อ $r = |\vec{r}|$ และ $\hat{a}_r = \frac{\vec{r}}{r}$ โดยทิศของสนามแม่เหล็กย่อย $d\vec{B}$ มีทิศตามกฎมือขวา (Right-Hand Rule) ดังรูป 2.53



รูป 2.53 แสดงทิศของสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา

จากสมการ (2.114) สนามแม่เหล็กย่อย $d\vec{B}$ เป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านส่วนย่อยของลวดตัวนำ $d\vec{\ell}$ เท่านั้น ถ้าหากจะหาสนามแม่เหล็กทั้งหมด $\vec{B}$ ณ จุด P ที่เกิดจาก

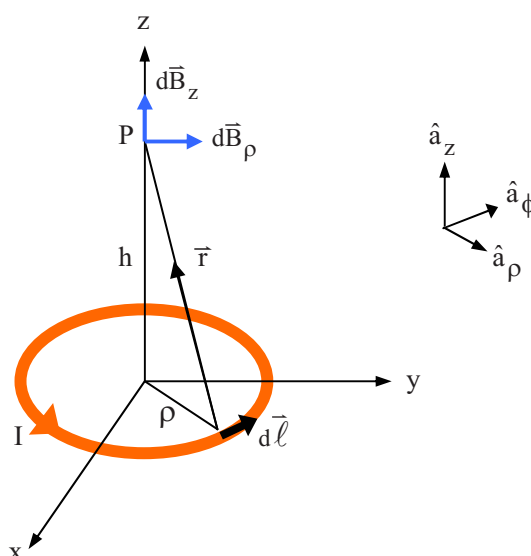
กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตลอดความยาวของลวดตัวนำ สามารถทำได้โดยการรวมเอาสนามแม่เหล็กย่อยทั้งหมดมารวมกันด้วยการอินทิเกรตสมการ (2.114) ได้เป็นสมการ (2.115)

$$\vec{B} = \frac{\mu I}{4\pi} \int \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3} \quad \text{----- (2.115)}$$

2.7.2 สนามแม่เหล็กจากขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหล

(The Magnetic Field of a Current Loop)

พิจารณาลวดวงกลมรัศมี ρ วางอยู่ในระนาบ xy และมีกระแสไฟฟ้าสม่ำเสมอ I ไหลในลวดวงกลม จุด P อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของลวดวงกลมเป็นระยะ h และอยู่บนแกนซึ่งตั้งฉากกับระนาบของลวดวงกลม (แกน z) ดังรูป 2.54



รูป 2.54 แสดงสนามแม่เหล็กที่จุด P บนแกน z ห่างจากลวดวงกลมเป็นระยะ h

ดังนั้น สนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่จุด P ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้า I ไหลในลวดวงกลม หาได้จากกฎบีโอด์-ซาวาร์ต สมการ (2.114) เมื่อ $d\vec{\ell} = \rho d\phi \hat{a}_\phi$ และ $\vec{r} = -\rho \hat{a}_\rho + h \hat{a}_z$ จะได้ว่า

$$d\vec{\ell} \times \vec{r} = \begin{vmatrix} \hat{a}_\rho & \hat{a}_\phi & \hat{a}_z \\ 0 & \rho d\phi & 0 \\ -\rho & 0 & h \end{vmatrix} = \rho h d\phi \hat{a}_\rho + \rho^2 d\phi \hat{a}_z$$

แทนค่า r และ $d\vec{\ell} \times \vec{r}$ ในสมการ (2.114) จะได้ว่า

$$d\vec{B} = \frac{\mu I}{4\pi} \frac{(\rho h d\phi \hat{a}_\rho + \rho^2 d\phi \hat{a}_z)}{(\rho^2 + h^2)^{3/2}} = dB_\rho \hat{a}_\rho + dB_z \hat{a}_z$$

เนื่องจากลวดวงกลมมีลักษณะสมมาตรรอบแกน z จึงทำให้สนามแม่เหล็กย่อย $d\vec{B}_\rho$ ในทิศทาง $\hat{a}_\rho$ หักล้างกันเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\vec{B} = \int (dB_\rho \hat{a}_\rho + dB_z \hat{a}_z) = \int dB_z \hat{a}_z$$

หรือ

$$\vec{B} = \frac{\mu I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\rho^2 d\phi \hat{a}_z}{(\rho^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{\mu I}{4\pi} \frac{\rho^2 2\pi \hat{a}_z}{(\rho^2 + h^2)^{3/2}}$$

หรือ

$$\vec{B} = \frac{\mu I}{2} \frac{\rho^2}{(\rho^2 + h^2)^{3/2}} \hat{a}_z \quad \text{----- (2.116)}$$

ถ้าระยะ $h = 0$ จากสมการ (2.116) จะได้ว่า สนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่จุดศูนย์กลางของลวดวงกลมสามารถหาได้จาก

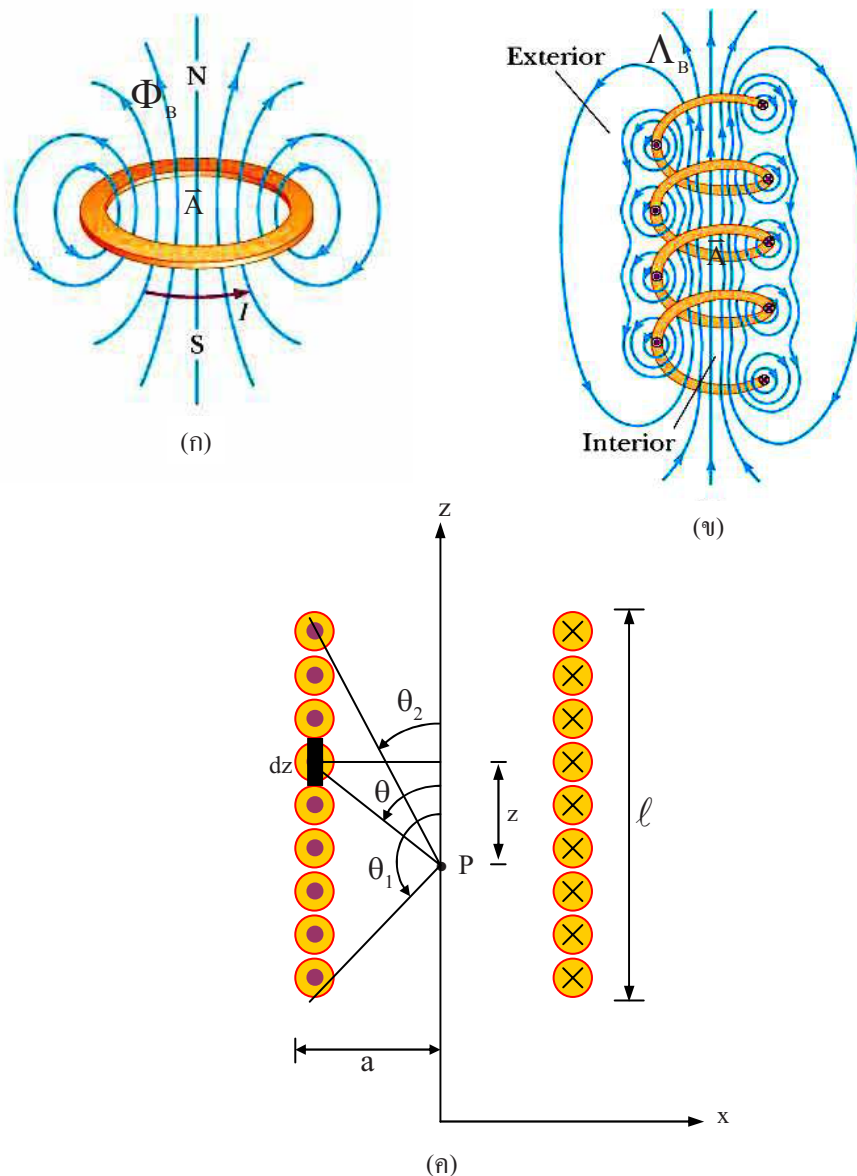
$$\vec{B} = \frac{\mu I}{2\rho} \hat{a}_z \quad \text{----- (2.117)}$$

ถ้าจุด P อยู่ห่างไกลจากลวดวงกลมมาก ๆ นั่นคือ $h \gg \rho$ จากสมการ (2.116) จะได้ว่า สนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่จุด P สามารถหาได้จาก

$$\vec{B} = \frac{\mu I \rho^2}{2h^3} \hat{a}_z \quad \text{----- (2.118)}$$

2.7.3 สนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์ (The Magnetic Field of a Solenoid)

พิจารณาจากรูป 2.55 (ก) ขดลวดโซลินอยด์มีความยาว ℓ รัศมี a ประกอบด้วยขดลวดวงกลมสม่ำเสมอ N รอบ ซึ่งแต่ละวงรอบมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน I สนามแม่เหล็กที่เกิดจากทุก ๆ หนึ่งวงรอบตามแนวแกนของขดลวดโซลินอยด์เป็นไปตามสมการ (2.116) ดังนั้นสนามแม่เหล็กสุทธิ $\vec{B}$ ที่จุด P บนแกนของขดลวดโซลินอยด์ จึงได้จากการรวมเอาสนามแม่เหล็ก



รูป 2.55 (ก) แสดงเส้นสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดวงกลม 1 รอบ

(ข) แสดงเส้นสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดโซลินอยด์

(ค) แสดงภาคตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์

ทั้งหมดที่เกิดจากขดลวดตัวนำในแต่ละวงรอบ โดยกำหนดให้ส่วนย่อยของขดลวดโซลินอยด์ที่มีความยาว dz มีจำนวนรอบของขดลวดเป็น $dl = ndz = (N/\ell)dz$ และมีกระแสไฟฟ้าเป็น $NI dz/\ell$ เพราะฉะนั้น จะได้ว่าสนามแม่เหล็กสุทธิ $\vec{B}$ ที่จุด P สามารถหาได้จากสมการ (2.116) คือ

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 NI dz}{2\ell} \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \hat{a}_z$$

แทนค่า $n = N/\ell$ (จำนวนรอบต่อหน่วยความยาวของขดลวดโซลินอยด์)

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 n I}{2} \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}} dz \hat{a}_z \quad \text{----- (2.119)}$$

จากรูป 2.55 (ก) ได้ว่า $\tan \theta = a/z$ ทำให้ได้

$$dz = -a \csc^2 \theta d\theta = -\frac{(a^2 + z^2)^{3/2}}{a^2} \sin \theta d\theta$$

แทนค่า dz ในสมการ (2.119) จะได้ว่า

$$d\vec{B} = -\frac{\mu_0 n I}{2} \sin \theta d\theta \hat{a}_z$$

อินทิเกรตจาก θ_1 ถึง θ_2 จะได้

$$\vec{B} = -\frac{\mu_0 n I}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta \hat{a}_z$$

ดังนั้น

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \hat{a}_z \quad \text{----- (2.120)}$$

จากรูป 2.55 (ค) และสมการ (2.120) ถ้า P อยู่ที่อยู่ศูนย์กลางของขดลวดโซลินอยด์ จะได้ว่า

$$\cos \theta_2 = \frac{\ell/2}{\sqrt{a^2 + \ell^2/4}} = -\cos \theta_1$$

และ

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{\ell}{\sqrt{a^2 + \ell^2/4}} \hat{a}_z \quad \text{-----} (2.121)$$

ถ้า P อยู่ตรงปลายของขดลวดโซลินอยด์ จะได้ว่า $\theta_1 = 90^\circ$ และ $\theta_2 = 0^\circ$ ดังนั้น

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2} \hat{a}_z \quad \text{-----} (2.122)$$

ถ้าขดลวดโซลินอยด์มีความยาวมาก ๆ จะได้ว่า $\ell \gg a$ หรือ $\theta_1 = 180^\circ$ และ $\theta_2 = 0^\circ$ ดังนั้น

$$\vec{B} = \mu_0 I \hat{a}_z \quad \text{-----} (2.123)$$

2.7.4 ความเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดโซลินอยด์

(The Self-Inductance of a Solenoid)

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านขดลวดวงกลม ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ซึ่งมีฟลักซ์แม่เหล็กเป็น $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ ตัดผ่านระนาบขดลวดวงกลมที่มีพื้นที่ผิวเป็น $\vec{A}$ ดังรูป 2.55 (ก) แต่ถ้าเป็นกรณีของขดลวดโซลินอยด์ที่มีจำนวนรอบ N รอบ โดยแต่ละรอบมีลักษณะเหมือนกันและมีขนาดเท่ากันแล้ว จะเกิดฟลักซ์สุทธิทั้งหมด เรียกว่า “ฟลักซ์คัลลิง (Flux Linkage ; Λ_B)” ดังรูป 2.55 (ข) หาได้จาก

$$\Lambda_B = N\Phi_B \quad \text{-----} (2.124)$$

ถ้าตัวกลางที่อยู่ล้อมรอบขดลวดโซลินอยด์มีลักษณะเป็นเชิงเส้นแล้ว ฟลักซ์คัลลิงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า I ที่สร้างฟลักซ์คัลลิงนั้น นั่นคือ

$$\Lambda_B \propto I$$

หรือ
$$\Lambda_B = LI \quad \text{-----} \quad (2.125)$$

เมื่อ L คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน เรียกว่า “ความเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดโซลินอยด์”
จากสมการ (2.124) และ (2.125) จะได้ว่า

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} \quad \text{-----} \quad (2.126)$$

ความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (H) หรือ เวเบอร์ต่อแอมแปร์ (Wb/A) แต่เนื่องจากเฮนรีเป็นหน่วยที่ใหญ่มาก ความเหนี่ยวนำโดยทั่วไปจึงมักมีหน่วยเป็นมิลลิเฮนรี (mH)

ถ้าขดลวดโซลินอยด์มีความยาวมาก ๆ ($\ell \gg a$) สนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์เป็นไปตามสมการ (2.123) ดังนั้น ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ผิวหน้าตัด $\vec{A}$ ของขดลวดโซลินอยด์คือ

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA = \mu n IA \quad \text{-----} \quad (2.127)$$

จากสมการ (2.126) แทนค่า Φ_B จะได้ความเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดโซลินอยด์เป็น

$$L = \frac{N(\mu n IA)}{I}$$

หรือ

$$L = (n\ell)\mu n A$$

ดังนั้น

$$L = \mu n^2 \ell A = \mu n^2 V \quad \text{-----} \quad (2.128)$$

เมื่อ $N = n\ell$ และ $V = \ell A$ (ปริมาตรภายในขดลวดโซลินอยด์)

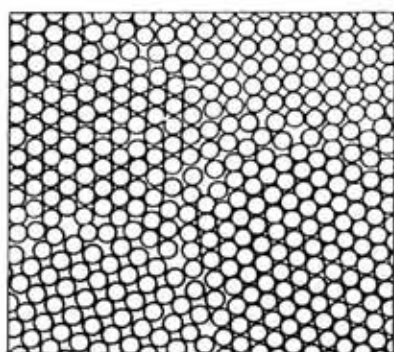
ในกรณีที่เมื่อนำแท่งวัสดุใด ๆ สอดเข้าไปภายในขดลวดโซลินอยด์ อาจจะส่งผลต่อค่าความเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดโซลินอยด์ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่สอดเข้าไปนั้นอาจมีผลทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแมกนีไทเซชันของวัสดุที่สอดเข้าไปนั้นว่ามีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงกว่าเดิม

2.8 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ (Microstructure of Materials)

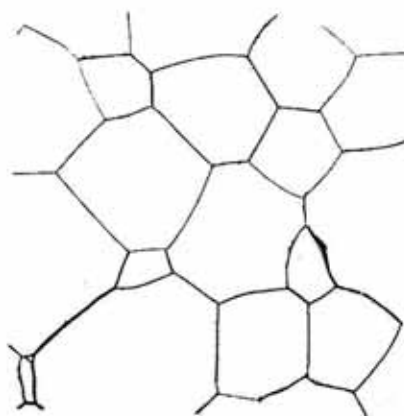
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างจุลภาคการจัดเรียงตัวของเกรนในวัสดุ ซึ่งแตกต่างกันไปตามปริมาณ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของเกรน การศึกษาโครงสร้างจุลภาคต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical microscope) ที่มีกำลังขยาย 2000 เท่า ใช้กับโครงสร้างระดับไมโครเมตรหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) ที่มีกำลังขยายถึง 50,000 เท่า ใช้กับโครงสร้างระดับนาโนเมตร

2.8.1 เกรนและขอบของเกรน (Grain and Grain boundaries)

วัสดุหรือสารต่าง ๆ ประกอบด้วยกลุ่มผลึกที่มีการจัดเรียงตัวในแนวต่าง ๆ กัน โดยแต่ละกลุ่มผลึกจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกไปในทิศทางเดียวกัน กลุ่มผลึกแต่ละกลุ่มเหล่านี้เรียกว่า “เกรน” และมี “ขอบของเกรน” อยู่ตามรอยต่อระหว่างเกรน แต่ละเกรนจะมีรูปร่างและขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งถูกควบคุมโดยเกรนที่อยู่รอบ ๆ นอกจากนี้อะตอมที่อยู่บริเวณขอบของเกรนจะไม่อยู่ในเกรนใดเกรนหนึ่ง ดังรูป 2.56 (ก) จะเห็นได้ว่าตามบริเวณขอบของเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างหลวม ๆ ค่อนข้างไม่มีความเป็นระเบียบ เกรนมีรูปร่างและขนาดไม่คงที่แน่นอน อะตอมซึ่งอยู่ตามบริเวณขอบของเกรนจะสามารถเคลื่อนย้ายจากเกรนหนึ่งไปยังอีกเกรนหนึ่งได้ง่ายกว่าอะตอมที่อยู่ภายในเกรน



(ก)



(ข)

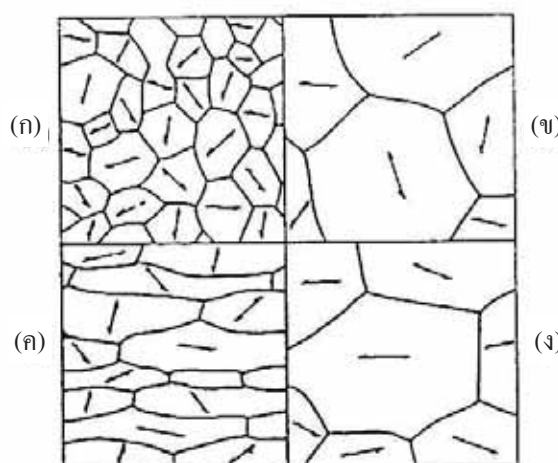
รูป 2.56 แสดงเกรนและขอบของเกรน

เราสามารถมองเห็นขอบของเกรนภายใต้กล้องจุลทรรศน์ได้ ถ้านำวัสดุนั้นไปผ่านการกัดกร่อน (Etching) โดยเริ่มจากการขัดผิวหน้าวัสดุให้เรียบเป็นเงามันคล้ายกระจก แล้วใช้สารเคมีกัดกร่อนผิวหน้าในระยะเวลาสั้น ๆ ผลของการกัดกร่อนด้วยสารเคมีทำให้อะตอมที่อยู่ตามขอบของเกรนละลายได้เร็วกว่าอะตอมที่อยู่ภายในเกรน เนื่องจากอะตอมที่อยู่ตามขอบของเกรนจะมีพลังงานมากกว่าอะตอมที่อยู่ภายในเกรน จึงทำให้ถูกกัดกร่อนด้วยสารเคมีได้เร็วกว่า นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างหลวม ๆ ทำให้มีการแพร่ซึมผ่าน (Diffuse) บริเวณขอบของเกรนนี้ได้ง่ายกว่าด้วย จึงทิ้งแนวขอบไว้ให้มองเห็นภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ดังรูป 2.56 (ข) ทั้งนี้เนื่องจากขอบของเกรนที่ถูกกัดกร่อนด้วยสารเคมีจะไม่สะท้อนแสงเหมือนกับส่วนที่ยังไม่ถูกกัดกร่อน จึงปรากฏให้เห็นเป็นเส้นสีดำหรือขอบของเกรนในภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์

2.8.2 ขนาดและการเติบโตของเกรน (Grain size and Grain growth)

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาด รูปร่างและการจัดเรียงตัวของเกรน ดังรูป 2.57 ทั้งขนาดและรูปร่างเป็นผลมาจากการเติบโตของเกรน นอกจากนี้ รูปร่างของเกรนยังขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของผลึกในขณะที่เกรนกำลังขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้น

ถึงแม้ว่าจะบอกขนาดของเกรนด้วยความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่เกรนส่วนใหญ่ไม่เป็นรูปทรงกลม แต่จะมีรูปร่างเป็น “equiaxed” ดังรูป 2.57 (ก) เพราะมีขนาดใกล้เคียงกันทั้ง 3 มิติ หรืออาจมีรูปร่างเป็นแผ่น (Plate-like) ดังรูป 2.57 (ค) หรือเป็นท่อน (Columnar) หรือเป็น Dendritic (tree-like)



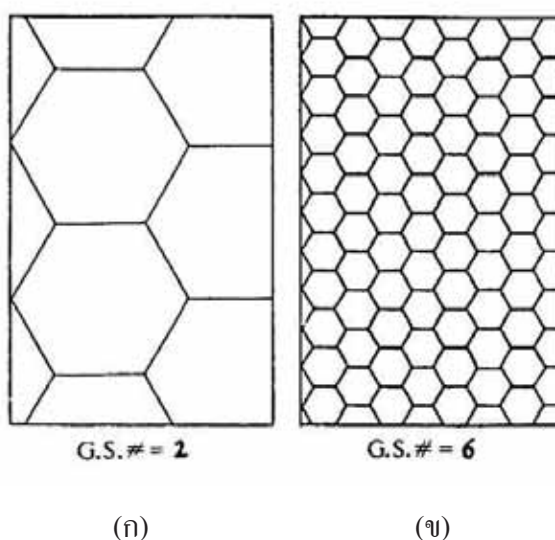
รูป 2.57 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของเกรน

วิธีหาจำนวนขนาดของเกรน (Grain size number) เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM (American Society for Testing and Materials) ดังนี้

$$N_{(0.01 \text{ in.})^2} = N_{(0.0645 \text{ mm}^2)} = 2^{n-1} \quad \text{----- (2.129)}$$

เมื่อ N คือ จำนวนเกรนที่นับได้ในพื้นที่ 0.0645 mm^2 ($0.01 \text{ in} \times 0.01 \text{ in}$)

n คือ จำนวนขนาดของเกรน (G.S.#)

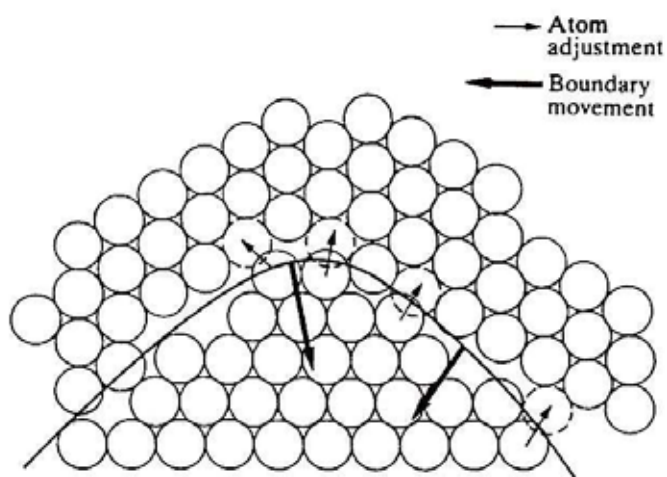


รูป 2.58 แสดงเกรนและจำนวนขนาดของเกรน (G.S.#)

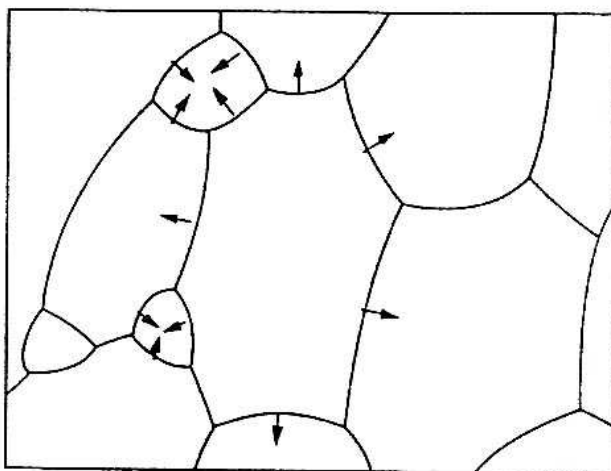
รูป 2.58 แสดงตัวอย่างจำนวนขนาดของเกรน (G.S.#) ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนขนาดของเกรน (G.S.#) ยิ่งมาก ยิ่งจะมีจำนวนเกรนและพื้นที่ขอบของเกรนในหนึ่งหน่วยปริมาตรมากขึ้น เกรนมีขนาดเล็กลงและแข็งแรงกว่าเกรนที่มีขนาดใหญ่

การเติบโตของเกรน ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ถ้าอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้มีการเคลื่อนที่ของอะตอม แรงผลักดัน (Driving force) ที่ทำให้เกรนมีการเติบโต คือ พลังงาน จะถูกปล่อยออกมาในขณะที่อะตอมเคลื่อนที่ข้ามขอบเกรน จากเกรนที่มีผิวโค้งนูน (Convex surface) ไปยังเกรนที่มีผิวโค้งเว้า (Concave surface) มีผลทำให้ขอบเกรนเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอะตอม โดยจะเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางความโค้ง ดังรูป 2.59 ทำให้เกรนที่มีขนาดเล็กค่อย ๆ หายไป เนื่องจากอะตอมเคลื่อนที่เข้าไปป้อน

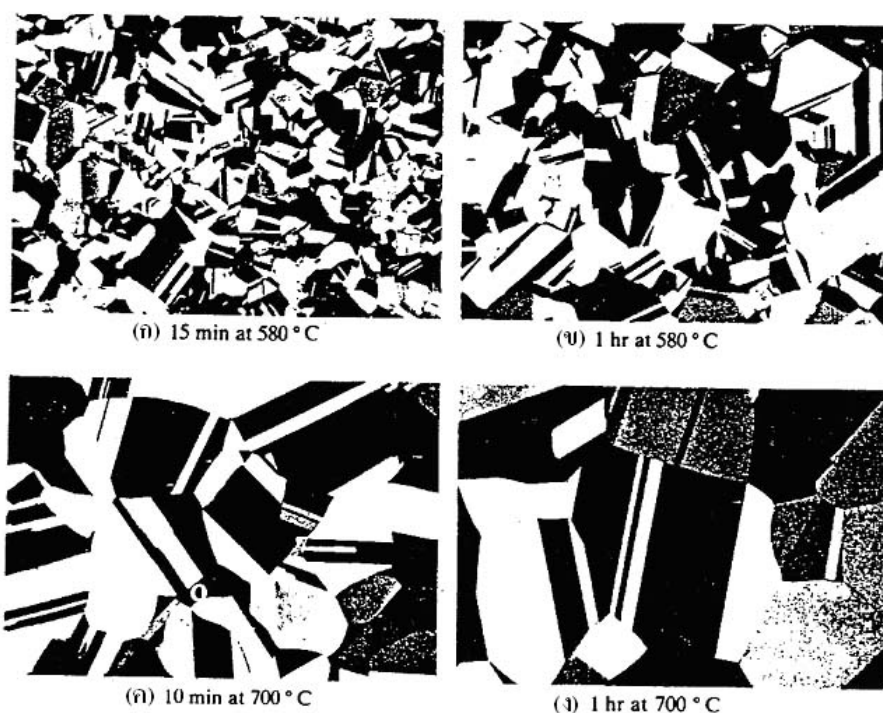
ให้กับเกรนที่มีขนาดใหญ่ จึงเกิดการเติบโตและการขยายขนาดของเกรนเกิดขึ้น ดังรูป 2.60 และ 2.61



รูป 2.59 แสดงการเคลื่อนที่ของอะตอมและขอบของเกรน



รูป 2.60 แสดงเกรนขนาดเล็กหายไปและเกรนขนาดใหญ่มีขนาดใหญ่ขึ้น



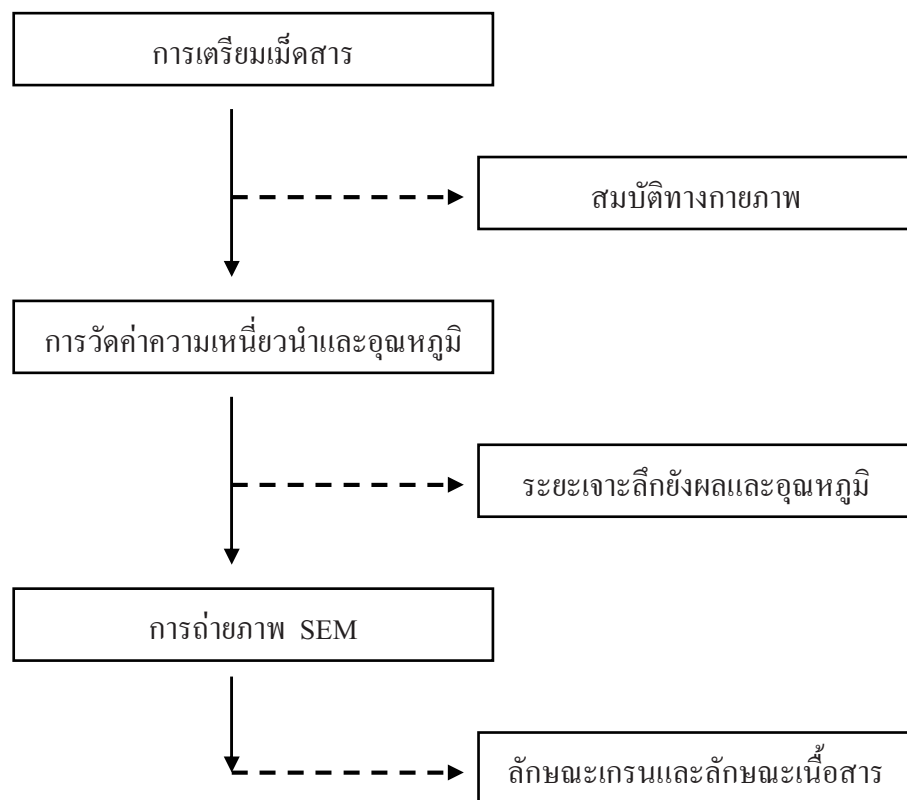
รูป 2.61 แสดงการเติบโตของเกรนเมื่อเวลาผ่านไป

สารตัวนำยวดยิ่งจำพวกเซรามิกออกไซด์มีโครงสร้างจุลภาคการจัดเรียงตัวเป็นเกรนที่มีขนาดประมาณ 0.3 ถึง 3 μm แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีความรู้ทางโลหวิทยาและอื่นๆ ที่น่าได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ความรู้ทางโลหวิทยาและอื่นๆ ศึกษาหาขนาดของเกรน พบว่าขนาดของเกรนมีขนาดต่างๆ กัน เช่น ขนาดของเกรนมิตีเซิงเส้น (1 มิตี) มีขนาด 0.01 μm (Tsue1), $\approx 0.5 \mu\text{m}$ (YBa, Ourma, Ourm1), $\approx 1.0 \mu\text{m}$ (LaSr, Larba), 1 – 2 μm (Farre), 1.3 – 2.0 μm (LaSr, Finne) และ 33 – 170 μm (LaSr, Suena), ขนาดของเกรน 3 มิตี มีขนาด $10 \times 10 \times 35 \mu\text{m}$ และ $10 \times 10 \times 125 \mu\text{m}$ (YBa, Suena), แบบแท่งมีขนาด $10 \times 2 - 4 \mu\text{m}$ (Ventu), แบบทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 4 μm ที่เกาะกลุ่มกันมีขนาดประมาณ 100 – 500 μm (Farre) เคยมีการรายงานเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มเนื้อสารตัวนำยวดยิ่ง LaSrCuO ที่มีขนาดเท่ากับ 1 μm เมื่อเทียบกับขนาดของเกรนที่มีขนาดเท่ากับ 10 – 20 μm (Larba) ถือว่ามีขนาดเล็กกว่าขนาดของเกรนมาก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมสารตัวนำยวดยิ่งที่ไม่เจือและเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามแผนภาพ ดังนี้



รูป 3.1 แสดงแผนภาพขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย มีดังนี้

3.1.1 สารประกอบตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดสารตัวอย่าง ใช้ผงสารประกอบตั้งต้น คือ Y_2O_3 , BaO, CuO และ Ag_2O ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 % มีสมบัติดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แสดงสมบัติของสารตั้งต้น

สารประกอบตั้งต้น	สี	จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	มวลโมเลกุล
Y_2O_3	ขาว	2410	225.81
BaO	ขาวขุ่น	1918	153.34
CuO	ดำ	1326	79.54
Ag_2O	ดำ		231.74

ที่มา : Robert C. Weast and Melvin J. Astle, **Handbook of Chemistry and Physics**, 59th ed (Boca Raton : CRC, 1978-1979),...

3.1.2 ในโตรเจนเหลว ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 77 เคลวิน ใช้ในการลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างและเปลี่ยนสถานะสารตัวอย่างจากสถานะปกติเป็นสถานะนำยวดยิ่ง

3.1.3 ถังเก็บไนโตรเจนเหลวและถังแช่เม็ดสารตัวอย่างในขณะที่ทำการทดลองลดอุณหภูมิ

3.1.4 ครกหินอ่อน ใช้บดผงสารประกอบตั้งต้นและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

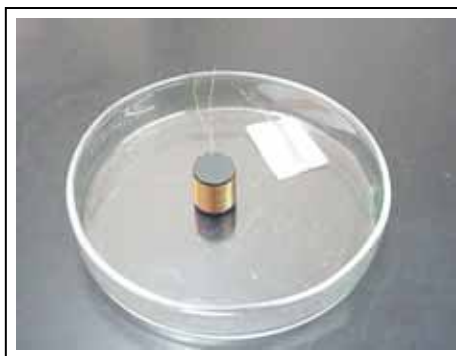
3.1.5 แม่พิมพ์ ใช้ช่วยในการอัดเม็ดสารตัวอย่างให้เป็นแท่งทรงกระบอก

3.1.6 แท่งแม่เหล็กขนาดเล็ก ๆ ใช้ทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์

3.1.7 ภาชนะใส่สารประกอบตั้งต้นและภาชนะทนความร้อน ใช้วางสารตัวอย่างขณะเผา

3.1.8 ลวดทองแดงเคลือบฉนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.14 มิลลิเมตร

3.1.9 สารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกพันด้วยลวดทองแดงจำนวน 80 รอบ เท่ากันทุกเม็ด ดังรูป 3.2



รูป 3.2 แสดงสารตัวอย่างที่พื้นด้วยหลอดทองแดง

3.1.10 กระดาษชำระ กระดาษรองซังสาร กรรไกร เทปกาว กาวและถุงพลาสติกขนาด เล็กใส่เมล็ดสารตัวอย่าง

3.1.11 ซ้อนดักสารเคมี ใช้ดักผงสารประกอบตั้งต้น

3.1.12 คีมจับและถุงมือ ใช้จับสารตัวอย่าง

3.1.13 หน้ากากปิดปากและจมูก

3.1.14 อะซิโตน ใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมเมล็ดสารตัวอย่าง

3.1.15 จานเพาะเชื้อ ใช้รองเมล็ดสารตัวอย่างในขณะทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ และเป่าเมล็ดสารตัวอย่างให้แห้งด้วยเครื่องเป่าผมหลังการทดลอง

3.1.16 ภาชนะเก็บสารตัวอย่างซึ่งมีเมล็ดดูความชื้นบรรจุอยู่ภายใน

3.1.17 นาฬิกาจับเวลา

3.1.18 ฆ้อนทุบสารตัวอย่าง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย มีดังนี้

3.2.1 เครื่องชั่ง Digital ยี่ห้อ SARTORIUS ที่อ่านค่าได้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใช้ชั่งมวลสารประกอบตั้งต้น

3.2.2 เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ ยี่ห้อ ROSTEFREI GEHARTET ที่อ่านค่าได้ละเอียด 0.02 มิลลิเมตร ใช้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของเมล็ดสารตัวอย่าง

3.2.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก ใช้อัดเมล็ดสารตัวอย่าง

3.2.4 เตาเผา ยี่ห้อ VECSTAR FURNACES รุ่น VF2 ใช้เผาเมล็ดสารตัวอย่าง

3.2.5 เครื่องเป่าลม ยี่ห้อ ESCON รุ่น TD-32 ใช้เป่าเมล็ดสารตัวอย่างให้แห้งหลังจากแช่ในไนโตรเจนเหลว

3.2.6 เครื่องคอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.7 เครื่องพิมพ์เอกสาร

3.2.8 เครื่องวัด Precision LRC ยี่ห้อ HEWLETT PACKARD รุ่น 4284A ใช้วัดค่าความเหนี่ยวนำตนเองและค่าความต้านทาน

3.2.9 เทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมิ

3.2.10 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ พร้อมสายไฟและขั้วไฟฟ้า

3.2.11 เครื่องวัดความต่างศักย์ พร้อมสายไฟและขั้วไฟฟ้า

3.2.12 เครื่องตัดสารตัวอย่างความเร็วต่ำ

3.2.13 เครื่องเคลือบโลหะ

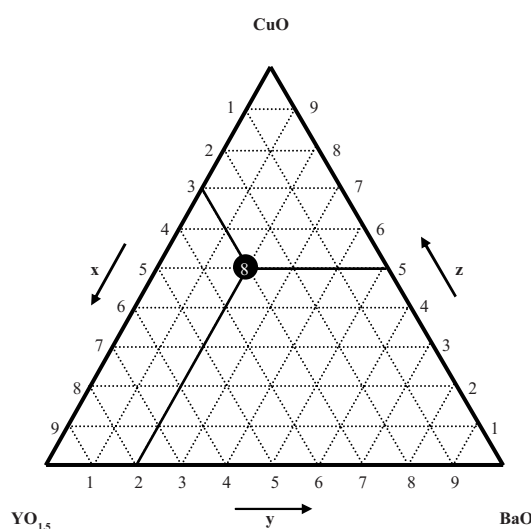
3.2.14 กล้องถ่ายภาพ SEM ยี่ห้อ camscan รุ่น MX2000

3.3 การเตรียมเมล็ดสารตัวอย่าง

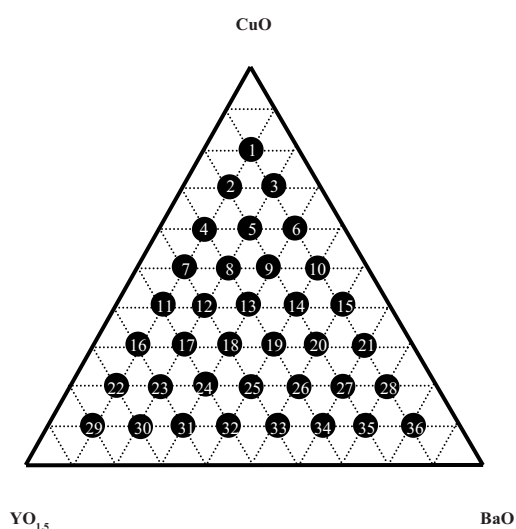
การเตรียมเมล็ดสารตัวอย่าง มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 การอ่านค่าโมลของสารในแผนภาพสมดุล

เมื่อ x , y และ z เป็นจำนวนโมลของสาร $YO_{1.5}$, BaO และ CuO ตามลำดับ ที่เปลี่ยนค่าตามตำแหน่งบนแผนภาพสมดุล ดังรูป 3.4



รูป 3.3 แสดงการหาค่า x , y และ z



รูป 3.4 แสดงสารตัวอย่าง 36 เม็ด

ตัวอย่างการอ่านค่า x , y และ z จากสูตร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ จากรูป 3.3 ๘ แสดงตำแหน่งเม็ดสารที่ 8 โดย $x=3$, $y=2$, $z=5$ จะได้สารมีสูตรเป็น $(YO_{1.5})_3(BaO)_2(CuO)_5$ ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมสารตัวอย่างตามสูตร ดังนี้

- 1) $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ โดยมีค่า x , y , z เป็นไปตามเงื่อนไข คือ $1 \leq x \leq 3$, $2 \leq y \leq 4$ และ $4 \leq z \leq 6$ ยกเว้น $x=3$, $y=2$, $z=5$
- 2) $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z + (Ag_2O)_{0.1}$ โดยมีค่า x , y , z เป็นไปตามเงื่อนไข คือ $1 \leq x \leq 3$, $2 \leq y \leq 4$ และ $4 \leq z \leq 7$
- 3) $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z + (Ag_2O)_{0.2}$ โดยมีค่า x , y , z เป็นไปตามเงื่อนไข คือ $1 \leq x \leq 4$, $2 \leq y \leq 5$ และ $3 \leq z \leq 7$

ขั้นที่ 2 คำนวณมวลสารประกอบตั้งต้นจากมวลโมเลกุลของสาร ซึ่งมวลโมเลกุลของสารแสดงค่าดังตาราง 3.1

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณมวลของสาร $(YO_{1.5})_2(BaO)_2(CuO)_6$

$$\text{มวลสาร } YO_{1.5} = (225.81 \times 2) / 2 = 225.81 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } BaO = 153.34 \times 2 = 306.68 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } CuO = 79.54 \times 6 = 477.24 \text{ กรัม}$$

มวลรวมของสารประกอบตั้งต้นทั้งหมด = $225.81 + 306.68 + 477.24 = 1009.73$ กรัม
ในการวิจัยนี้ทำการเตรียมสาร $(YO_{1.5})_2(BaO)_2(CuO)_6$ มวล 6.5 กรัม ดังนั้น มวลสารประกอบตั้งต้นหาได้จากการเทียบบัญญัติโดยตรง

$$\text{มวลสาร } YO_{1.5} = (6.5 \times 225.81) / 1009.73 = 1.4536 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } BaO = (6.5 \times 306.68) / 1009.73 = 1.9742 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } CuO = (6.5 \times 477.24) / 1009.73 = 3.0722 \text{ กรัม}$$

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณมวลของสาร $(YO_{1.5})_2(BaO)_2(CuO)_6 + (Ag_2O)_{0.2}$

$$\text{มวลสาร } YO_{1.5} = (225.81 \times 2) / 2 = 225.81 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } BaO = 153.34 \times 2 = 306.68 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } CuO = 79.54 \times 6 = 477.24 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } Ag_2O = 231.74 \times 0.2 = 46.348 \text{ กรัม}$$

มวลรวมของสารประกอบตั้งต้นทั้งหมด = $225.81 + 306.68 + 477.24 + 46.348 = 1056.078$ กรัม

ในการวิจัยนี้ทำการเตรียมสาร $(\text{YO}_{1.5})_2(\text{BaO})_2(\text{CuO})_6 + (\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ มวล 6.5 กรัม ดังนั้นมวลสารประกอบตั้งต้นหาได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางศ์

$$\text{มวลสาร } \text{YO}_{1.5} = (6.5 \times 225.81) / 1056.078 = 1.3898 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } \text{BaO} = (6.5 \times 306.68) / 1056.078 = 1.8876 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } \text{CuO} = (6.5 \times 477.24) / 1056.078 = 2.9373 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลสาร } \text{Ag}_2\text{O} = (6.5 \times 46.348) / 1056.078 = 0.2853 \text{ กรัม}$$

มวลสารประกอบตั้งต้นที่ใช้ในการวิจัยแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 3.2 แสดงมวลสารประกอบตั้งต้นในการเตรียมสาร $(\text{YO}_{1.5})_x(\text{BaO})_y(\text{CuO})_z$

เมล็ดสารที่	สัดส่วน xyz	Y_2O_3 (กรัม)	BaO (กรัม)	CuO (กรัม)	Ag_2O (กรัม)
5	226	1.4536	1.9742	3.0722	-
6	136	0.6988	2.8473	2.9539	-
9	235	1.3546	2.7596	2.3858	-
10	145	0.6530	3.5471	2.2999	-
13	334	1.9712	2.6772	1.8516	-
14	244	1.2682	3.4449	1.7869	-

ตาราง 3.3 แสดงมวลสารประกอบตั้งต้นในการเตรียมสาร $(\text{YO}_{1.5})_x(\text{BaO})_y(\text{CuO})_z + (\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

เมล็ดสารที่	สัดส่วน xyz	Y_2O_3 (กรัม)	BaO (กรัม)	CuO (กรัม)	Ag_2O (กรัม)
3	127	0.7342	1.9944	3.6207	0.1507
5	226	1.4210	1.9299	3.0033	0.1458
6	136	0.6837	2.7858	2.8901	0.1404
8	325	2.0648	1.8695	2.4244	0.1413
9	235	1.3236	2.7018	2.3358	0.1316
10	145	0.6397	3.4755	2.2535	0.1313
13	334	1.9311	2.6228	1.8140	0.1321
14	244	1.2434	3.3772	1.7518	0.1276

ตาราง 3.4 แสดงมวลสารประกอบตั้งต้นในการเตรียมสาร $(\text{YO}_{1.5})_x(\text{BaO})_y(\text{CuO})_z + (\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

เม็ดสารที่	สัดส่วน xyz	Y_2O_3 (กรัม)	BaO (กรัม)	CuO (กรัม)	Ag_2O (กรัม)
3	127	0.7176	1.9491	3.5387	0.2946
5	226	1.3898	1.8876	2.9373	0.2853
6	136	0.6693	2.7269	2.8290	0.2748
8	325	2.0209	1.8298	2.3728	0.2765
9	235	1.2991	2.6464	2.2879	0.2666
10	145	0.6271	3.4066	2.2089	0.2574
13	334	1.8927	2.5705	1.7778	0.2590
14	244	1.2194	3.3122	1.7181	0.2503
15	154	0.5899	4.0057	1.6623	0.2421
18	433	2.4532	2.4988	1.2962	0.2518
19	343	1.7798	3.2229	1.2538	0.2435

ขั้นที่ 3 เมื่อได้ค่ามวลสารประกอบตั้งต้นจากการคำนวณแล้วนำสารประกอบตั้งต้นไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง Digital ยี่ห้อ SARTORIUS ที่อ่านค่าได้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง หลังจากนั้นนำผงสารมาผสมเข้าด้วยกันแล้วทำการบดคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดีจนเห็นเป็นเนื้อเดียวกันในครกหินอ่อน



รูป 3.5 แสดงผงสารประกอบตั้งต้นที่บดคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดีในครกหินอ่อน

ขั้นที่ 4 เมื่อได้ผงสารที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว นำผงสารเทลงในแม่พิมพ์แล้วทำการอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรงดัน 2 ตัน เป็นเวลา 3 นาที นำเม็ดสารที่ได้จากการอัดมาบันทึกลักษณะเม็ดสาร สี วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และชั่งมวลสาร



รูป 3.6 แสดงแม่พิมพ์อัดเม็ดสารและกิมจับ



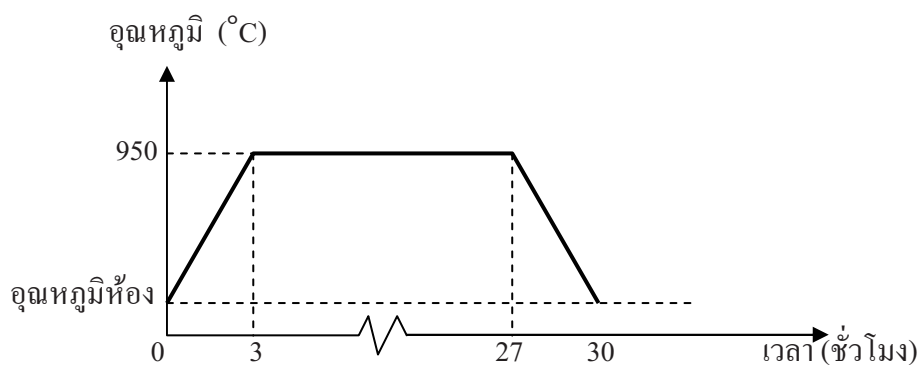
รูป 3.7 แสดงการอัดเม็ดสาร

ขั้นที่ 5 นำเม็ดสารวางบนภาชนะทนความร้อน นำเข้าเตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ทำการเผาตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ดังนี้

ตอนที่ 1 เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องทดลองขึ้นในอัตรา 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

ตอนที่ 2 เผาเม็ดสารที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตอนที่ 3 ลดอุณหภูมิจาก 950 องศาเซลเซียส ลงในอัตรา 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที จนถึงอุณหภูมิห้อง



รูป 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเผาเม็ดสาร



รูป 3.9 แสดงเตาเผาเม็ดสารขณะเผาที่ 950 °C

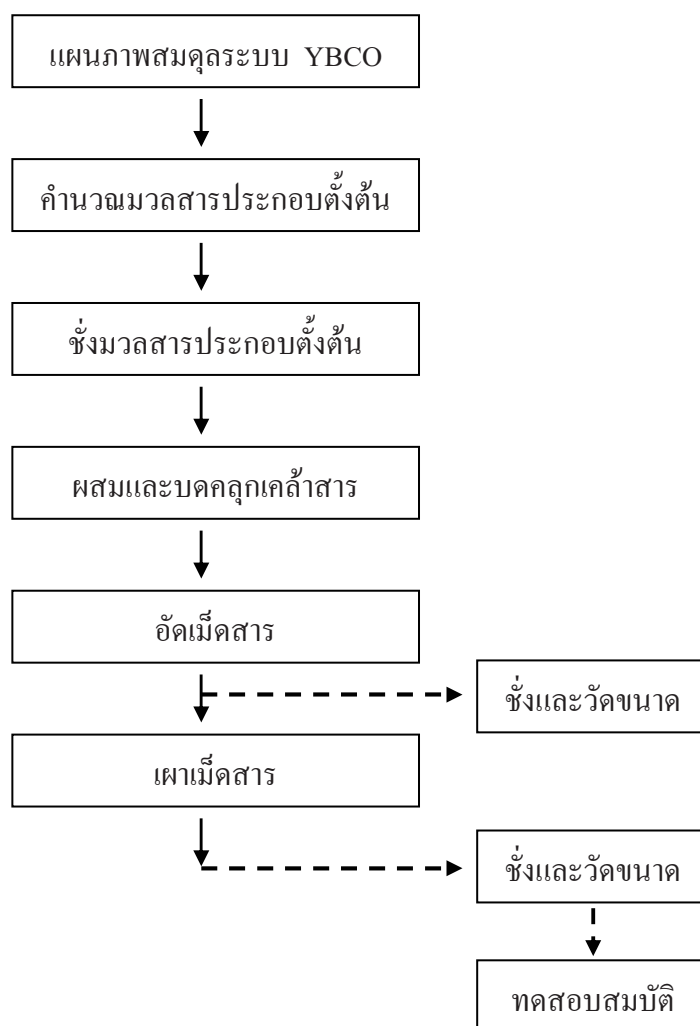
ขั้นที่ 6 นำเม็ดสารที่ผ่านการเผามาบันทึกลักษณะเม็ดสาร สี วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา และชั่งมวลสาร

ขั้นที่ 7 ทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์

นำเม็ดสารที่ผ่านการเผามาทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ โดยแช่เม็ดสารลงในไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิประมาณ 77 เคลวิน แล้วนำแท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ วางบนเม็ดสาร ตัวอย่าง ถ้าแท่งแม่เหล็กถูกยกขึ้นแสดงว่าเกิดปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ และสารตัวอย่างเป็นสารตัวนำยวดยิ่ง ดังรูป 3.10



รูป 3.10 แสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของสารตัวนำยวดยิ่ง



รูป 3.11 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมเม็ดสารตัวอย่าง YBCO

3.4 การทดลองเพื่อศึกษาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่งและ ระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

หลังจากที่ได้มีการเตรียมเม็ดสารตัวอย่าง YBCO เสร็จแล้วจึงได้มีการเตรียมการและวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างพร้อมทั้งวัดอุณหภูมิของเม็ดสารในขณะเดียวกันด้วย จากนั้นนำค่าความเหนี่ยวนำที่วัดได้มาคำนวณหาระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่าง นำข้อมูลที่ได้จากการวัดและคำนวณมาเขียนกราฟกับอุณหภูมิพร้อมทั้งวิเคราะห์สรุปและอภิปรายผลการทำวิจัย ดังมีรายละเอียดขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 นำสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมาพันด้วยลวดทองแดงรอบสารตัวอย่างจำนวน 80 รอบ เท่ากันทุกเม็ด โดยให้เหลือปลายทั้งสองของลวดทองแดงไว้นาวประมาณ 1 เมตร

ขั้นที่ 2 นำเม็ดสารตัวอย่างใส่ลงไปในภาชนะอะลูมิเนียม (aluminium shroud) ปิดฝาแล้วนำปลายทั้งสองข้างที่เหลือของลวดทองแดงต่อเข้ากับเครื่องวัด Precision LRC

ขั้นที่ 3 ต่อเทอร์มิสเตอร์เข้ากับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 100 μA และเครื่องวัดความต่างศักย์

ขั้นที่ 4 ลดอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างลง โดยนำภาชนะอะลูมิเนียมจุ่มลงไปในถังแช่ที่มีไนโตรเจนเหลว ทิ้งไว้จนกว่าอุณหภูมิภายในภาชนะอะลูมิเนียมลดลงต่ำสุด (ประมาณ 77 เคลวิน) แล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยค่อย ๆ ยกภาชนะอะลูมิเนียมขึ้นออกมาจากถังแช่ บันทึกค่าความต่างศักย์และความเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากเครื่องวัดความต่างศักย์และเครื่องวัด Precision LRC ตามลำดับ

ขั้นที่ 5 นำค่าความต่างศักย์และค่าความเหนี่ยวนำไปคำนวณหาอุณหภูมิและระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่าง จากสมการดังต่อไปนี้

สมการคำนวณหาอุณหภูมิ (K)¹

$$T = \frac{0.0558 - \sqrt{(0.0558)^2 - (0.00032(16.619 - R))}}{0.00016} \quad \text{----- (3.1)}$$

¹ ได้มาจากการสอบเทียบเทอร์มิสเตอร์กับเทอร์โมมิเตอร์แอลกอฮอล์วัดอุณหภูมิของน้ำแข็ง น้ำน้ำเดือดและไนโตรเจนเหลว

และ

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{-----} (3.2)$$

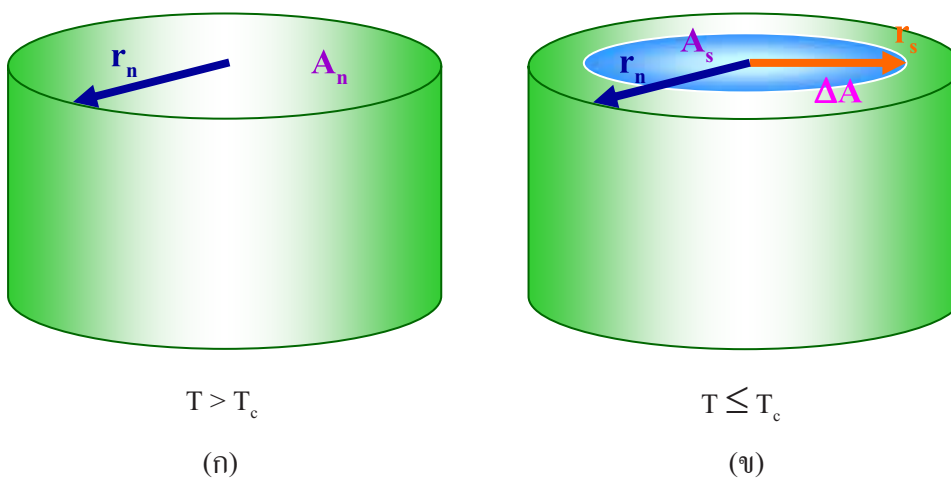
โดยที่ T คือ อุณหภูมิ (K)

R คือ ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ (Ω)

V คือ ความต่างศักย์คร่อมเทอร์มิสเตอร์ (V)

I คือ กระแสไฟฟ้าคงที่ 100 μA

สมการคำนวณหาระยะเจาะลึกยังผล (m)



รูป 3.12 แสดงแบบจำลองเม็ดสารตัวอย่างบริเวณที่อยู่ในสถานะปกติและสถานะนำยวดยิ่ง

จากรูป 3.12 และสมการ (2.128) จะได้ว่า

$$\frac{L_s}{L_n} = \frac{\Delta A}{A_n} \quad \text{-----} (3.3)$$

หรือ

$$\frac{L_s}{L_n} = 1 - \frac{r_s^2}{r_n^2} \quad \text{-----} (3.4)$$

เมื่อ

$$\lambda_{\text{eff}} = r_n - r_s \quad \text{-----} (3.5)$$

ดังนั้น

$$\lambda_{\text{eff}} = r_n \left(1 - \sqrt{1 - \frac{L_s}{L_n}} \right) \text{ ----- (3.6)}$$

โดยที่ λ_{eff} คือ ระยะเจาะลึกยังผล (m)

L_n คือ ความเหนียวน้ำ เมื่อ $T > T_c$

L_s คือ ความเหนียวน้ำ เมื่อ $T \leq T_c$

A_n คือ พื้นที่หน้าตัดของเม็ดสารตัวอย่าง เมื่อ $T > T_c$

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเม็ดสารตัวอย่างบริเวณที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่ง
เมื่อ $T \leq T_c$

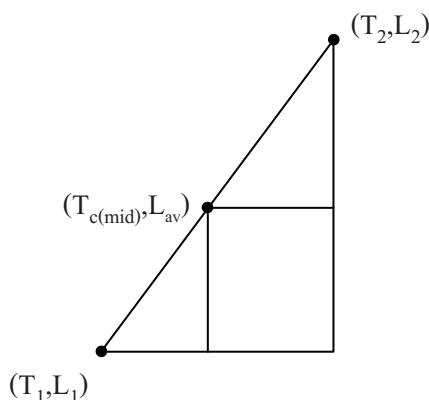
r_n คือ รัศมีของเม็ดสารตัวอย่าง เมื่อ $T > T_c$

r_s คือ รัศมีของเม็ดสารตัวอย่างบริเวณที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่ง เมื่อ $T \leq T_c$

ขั้นที่ 6 เขียนกราฟค่าความเหนียวน้ำและค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ วิเคราะห์หาอุณหภูมิวิกฤต สรุปและอภิปรายผล

สมการคำนวณหาอุณหภูมิวิกฤตกึ่งกลาง ($T_{c(\text{mid})}$)

โดยอาศัยการเทียบสัดส่วนสามเหลี่ยมคล้ายของจุดข้อมูลก่อนและหลังจุดอุณหภูมิวิกฤตกึ่งกลาง นั่นคือ พิจารณากรณีของค่าความเหนียวน้ำ (ทำนองเดียวกันในกรณีของค่าระยะเจาะลึกยังผล)



รูป 3.13 แสดงจุดข้อมูลบนรูปสามเหลี่ยม

$$T_{c(\text{mid})} = T_1 + \frac{(L_{\text{av}} - L_1)}{(L_2 - L_1)}(T_2 - T_1) \quad \text{-----} (3.7)$$

และ

$$L_{\text{av}} = \frac{L_{\text{max}} + L_{\text{min}}}{2} \quad \text{-----} (3.8)$$

ขั้นที่ 7 คำนวณและเขียนกราฟค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ มาตรฐานลอการิทึม วิเคราะห์หาเลขชี้กำลัง และกำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ เพียร์สัน สรุปและอภิปรายผล

สมการคำนวณมาตรฐานลอการิทึมและหาเลขชี้กำลัง (α)

จากความสัมพันธ์ (2.91) จะได้ว่า

$$\frac{\lambda_L(T)}{\lambda_L(0)} = k \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^\alpha}} \quad \text{-----} (3.9)$$

หรือ

$$\left(\frac{\lambda_L(0)}{\lambda_L(T)}\right)^2 = \frac{1}{k^2} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^\alpha\right]$$

หรือ

$$1 - \left(\frac{k\lambda_L(0)}{\lambda_L(T)}\right)^2 = \left(\frac{T}{T_c}\right)^\alpha$$

ดังนั้น

$$\log\left\{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right\} = \alpha \log\left(\frac{T}{T_c}\right) \quad \text{-----} (3.10)$$

เมื่อ $\frac{k\lambda_L(0)}{\lambda_L(T)} = \frac{\lambda_{\text{eff}}(0)}{\lambda_{\text{eff}}(T)} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$, $\lambda_{\text{eff}}(0)$ คือ ระยะเจาะลึกยังผลที่ศูนย์สัมบูรณ์¹ และ

α คือ เลขชี้กำลัง

สมการคำนวณกำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (R^2)

$$R^2 = \left[\frac{n(\sum XY) - (\sum X \sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right]^2 \quad \text{----- (3.11)}$$

เมื่อ $X = \log\left(\frac{T}{T_c}\right)$ และ $Y = \log\left\{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right\}$

ขั้นที่ 8 คำนวณและเขียนกราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำและค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิ วิเคราะห์หาความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ² ตัวแปรอิสระ และอภิปรายผล

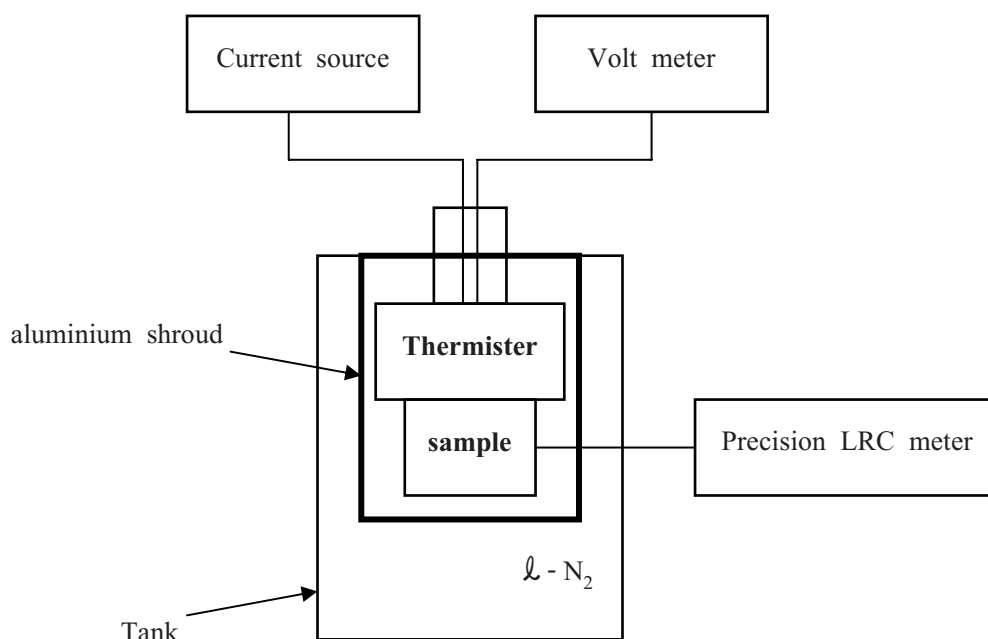
สมการคำนวณหาความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($\Delta\bar{T}$)

$$\Delta\bar{T} = \frac{1}{L'_{\max}} \sum_{i=1}^n L'_i(\Delta T_i) \quad \text{----- (3.12)}$$

หรือ $\Delta\bar{T} = \frac{1}{\lambda'_{\max}} \sum_{i=1}^n \lambda'_i(\Delta T_i) \quad \text{----- (3.13)}$

¹ แทนด้วยค่าระยะเจาะลึกยังผลที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกัน ($\lambda_{\text{eff}}(77 \text{ K}) = \lambda_{\text{eff}(\min)} \approx \lambda_{\text{eff}}(0)$ ที่ $T \rightarrow 0 \text{ K}$)

² ในการคำนวณหาความกว้างในการเปลี่ยนสถานะครึ่งฟิต (ΔT) ใช้วิธีเทียบสัดส่วนสามเหลี่ยมคล้ายของจุดข้อมูลก่อนและหลังจุดครึ่งฟิต $T(L'_{\max}/2)$ หรือ $T(\lambda'_{\max}/2)$ ทำนองเดียวกันกับการหาค่าอุณหภูมิวิกฤตกึ่งกลาง ($T_{c(\text{mid})}$)



รูป 3.14 แสดงแผนภาพการวัดค่าความเหนียวนำและอุณหภูมิของสารตัวอย่างที่แช่ในไนโตรเจนเหลว

3.5 การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO โดยการถ่ายภาพ SEM

ในการศึกษาลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งมีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 ตัดสารตัวนำยวดยิ่งด้วยเครื่องตัดสารความเร็วต่ำและทาบให้แยกออกเป็นสองส่วน

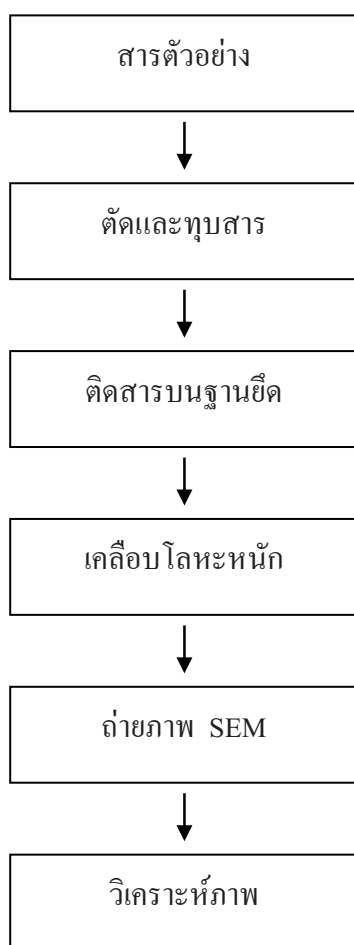
ขั้นที่ 2 เลือกส่วนของสารตัวอย่างที่ต้องการถ่ายภาพจากขั้นที่ 1 ควรให้มีขนาดใกล้เคียงกับฐานยึดสารตัวอย่าง

ขั้นที่ 3 ติดสารตัวอย่างบนฐานยึด โดยใช้เทปกาวสองหน้า ทำการเป่าฝุ่นทำความสะอาด โดยใช้ลูกยางเป่าลม

ขั้นที่ 4 นำสารตัวอย่างไปเคลือบโลหะหนัก เช่น ทอง

ขั้นที่ 5 นำสารตัวอย่างที่เคลือบโลหะหนักเสร็จแล้วไปถ่ายภาพ SEM

ขั้นที่ 6 วิเคราะห์ภาพ บรรยายภาพ สรุป และอภิปรายผล



รูป 3.15 แสดงแผนภาพขั้นตอนการถ่ายภาพ SEM

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยเพื่อศึกษาค่าความเหนียว น้ำ ระยะเจาะลึกยังผล ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของสารตัวนำยวดยิ่ง ค่าความเหนียวของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่งและระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและระยะเจาะลึกยังผลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารจากอุณหภูมิเริ่มต้นหนึ่งและสองของค่าทั้งสองเทียบกับอุณหภูมิ ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของสารตัวนำยวดยิ่ง ดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพของสารตัวนำยวดยิ่ง

ตาราง 4.1 แสดงลักษณะดี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสาร และการทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

เม็ดสารที่	ดี		เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) *		ความหนา (mm) *		มวลสาร (g) **		ปริมาตร (mm) ³		การแสดงผลปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	
5	ดำปนเทา	ดำแวววาว	13.20	10.60	12.90	10.60	6.2904	3.2489	1765.34	935.42	แสดง
6	ดำปนเทา	ดำปนเขียวแวววาว	13.04	9.02	13.74	8.98	6.4656	1.4564	1834.98	573.82	แสดง
9	เทาปนดำ	ดำปนเขียวแวววาว	13.04	9.70	13.70	9.82	6.2178	3.0921	1829.64	725.68	แสดง
10	เทาปนดำ	ดำแวววาว	13.10	11.90	13.70	12.76	6.4924	4.5991	1846.52	1419.17	แสดง
13	เทาปนดำ	ดำปนเขียวแวววาว	13.10	10.76	14.00	11.58	6.3140	4.8941	1886.95	1052.99	แสดง
14	เทาปนดำ	ดำปนเขียว	13.04	13.10	14.34	14.00	6.4873	5.6285	1915.11	1886.95	แสดง

* ทำการวัดโดยใช้ เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ ยี่ห้อ ROSTEFREI GEHARTET

** ทำการชั่งโดยใช้ เครื่องชั่ง Digital ยี่ห้อ SARTORIUS

จากตาราง 4.1 พบว่าเม็ดสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ภายในเตา ส่วนใหญ่เป็นสีดำปนเขียว มีเกล็ดแวววาวกระจายอยู่ทั่วทั้งเม็ด ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 และ 10 เป็นสีดำแวววาว และเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 เป็นสีดำปนเขียวแต่ไม่มีเกล็ดแวววาว มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงตั้งแต่ 9.16 - 30.83 % ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 14 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 0.46 % มีความหนาลดลงตั้งแต่ 13.24 - 77.47 % มีมวลสารลดลงตั้งแต่ 13.24 - 77.47 % มีปริมาตรลดลงตั้งแต่ 1.47 - 68.73 % คาดว่าเกิดจากการหลอมเหลวหรือการระเหยออกไปของเนื้อสารบางส่วนในขณะที่เผา ส่วนเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 คาดว่าเกิดจากความพรุนหรือรอยปริแตกของเม็ดสาร และเม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดแสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์

ตาราง 4.2 แสดงลักษณะสี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสาร และการทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

เม็ดสาร ที่	สี		เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) *		ความหนา (mm) *		มวลสาร (g) **		ปริมาตร (mm) ³		การแสดงผล ปรากฏการณ์ ไมสส์เนอร์
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	
3	ดำปนเทา	ดำปนเขียว แวววาว	13.04	9.44	12.66	8.54	6.4835	2.0131	1690.75	597.71	แสดง
5	ดำปนเทา	ดำแวววาว	13.10	10.80	13.10	10.90	6.4550	4.9026	1765.65	998.54	แสดง
6	ดำปนเทา	ดำแวววาว	13.10	9.10	13.06	7.60	6.3050	2.0659	1760.26	494.30	แสดง
8	ดำปนเทา	ดำแวววาว	13.10	11.58	13.18	11.50	6.2859	5.7422	1776.43	1211.17	แสดง
9	เทาปนดำ	ดำแวววาว	13.10	10.90	13.34	10.40	6.2820	4.8737	1797.99	970.46	แสดง
10	เทาปนดำ	ดำแวววาว	13.10	10.30	13.94	11.76	6.1951	4.0291	1878.86	979.88	แสดง
13	เทาปนดำ	ดำแวววาว	13.30	11.68	13.34	11.56	5.9505	5.2997	1853.31	1238.61	แสดง
14	เทาปนดำ	ดำปนเขียว	13.24	12.64	13.94	12.96	6.1930	5.4555	1919.24	1626.26	แสดง

* ทำการวัดโดยใช้ เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ ยี่ห้อ ROSTEFREI GEHARTET

** ทำการชั่งโดยใช้ เครื่องชั่ง Digital ยี่ห้อ SARTORIUS

จากตาราง 4.2 พบว่าเม็ดสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในเตา ส่วนใหญ่เป็นสีดำ มีเกล็ดแวววาวกระจายอยู่ทั่วทั้งเม็ด ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 3 เป็นสีดำปนเขียวแวววาว และเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 เป็นสีดำปนเขียวไม่มีเกล็ดแวววาว มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงตั้งแต่ 4.53 - 30.53 % มีความหนาลดลงตั้งแต่ 7.03 - 41.81 % มีมวลสารลดลงตั้งแต่ 8.65 - 68.95 % มีปริมาตรลดลงตั้งแต่ 15.27 - 71.92 % คาดว่าเกิดจากการหลอมเหลวหรือการระเหยออกไปของเนื้อสารบางส่วนในขณะเผา และเม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดแสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์

ตาราง 4.3 แสดงลักษณะสี เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสาร และการทดสอบปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

เม็ดสาร ที่	สี		เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) *		ความหนา (mm) *		มวลสาร (g) **		ปริมาตร (mm) ³		การแสดงผล ปรากฏการณ์ ไมสส์เนอร์
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	
3	ดำปนเทา	ดำแวววาว	13.10	9.64	12.16	8.24	6.1419	2.1869	1638.95	601.41	แสดง
5	ดำปนเทา	ดำแวววาว	13.08	11.30	13.00	10.60	6.3699	5.1637	1746.82	1063.05	แสดง
6	ดำปนเทา	ดำแวววาว	13.06	9.00	13.50	8.44	6.4572	2.2876	1808.46	536.93	แสดง
8	ดำปนเทา	ดำปนเขียว แวววาว	13.10	12.20	13.54	12.00	6.3919	5.7096	1824.95	1402.78	แสดง
9	เทาปนดำ	ดำแวววาว	13.08	10.90	13.74	10.70	6.3940	5.0405	1846.26	998.45	แสดง
10	เทาปนดำ	ดำแวววาว	13.04	10.94	12.96	10.00	5.7099	4.3326	1730.81	939.99	แสดง
13	เทาปนดำ	ดำปนเขียว แวววาว	13.20	12.10	14.50	12.40	6.3541	5.5488	1984.29	1425.88	แสดง
14	เทาปนดำ	ดำปนเขียว	13.06	12.12	14.36	13.30	6.3736	5.5520	1923.67	1534.43	แสดง
15	เทาปนดำ	ดำแวววาว	13.14	14.00	14.32	14.06	6.3292	4.8350	1941.89	2164.37	แสดง
18	เทาปนดำ	เขียวปนดำ	13.08	13.68	14.56	14.92	6.2725	5.6952	1956.44	2192.96	แสดง
19	เทาปนดำ	ดำปนเขียว	13.14	12.80	14.30	14.20	6.1920	5.5333	1939.17	1827.25	ไม่แสดง

* ทำการวัดโดยใช้ เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ ยี่ห้อ ROSTEFREI GEHARTET

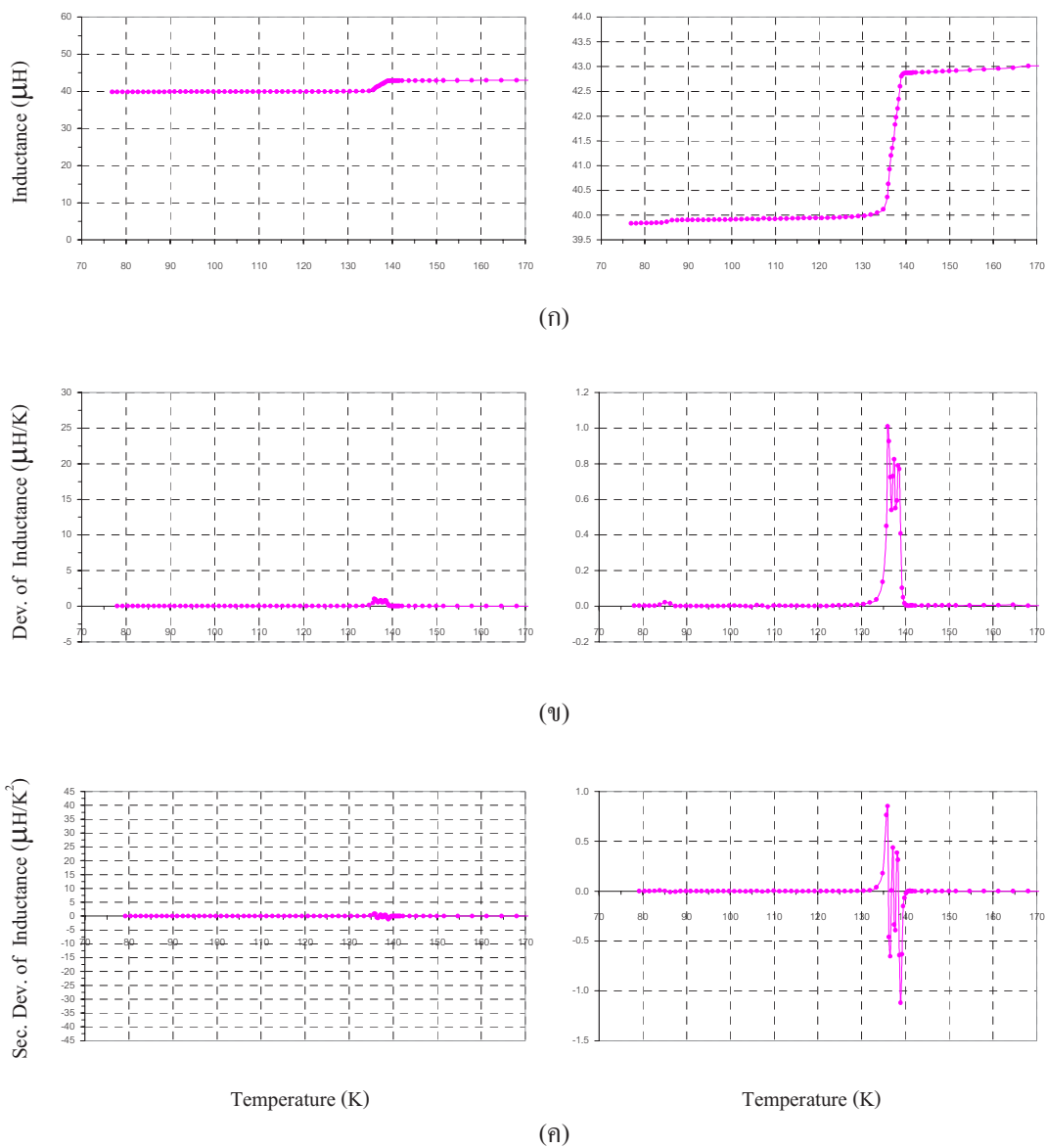
** ทำการชั่งโดยใช้ เครื่องชั่ง Digital ยี่ห้อ SARTORIUS

จากตาราง 4.3 พบว่าเม็ดสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในเตา ส่วนใหญ่เป็นสีดำ มีเกล็ดแวววาวกระจายอยู่ทั่วทั้งเม็ด ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 8 และ 13 เป็นสีดำปนเขียวแวววาว เม็ดสารตัวอย่างที่ 14 และ 19 เป็นสีดำปนเขียว และเม็ดสารตัวอย่างที่ 18 เป็นสีเขียวปนดำ มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงตั้งแต่ 2.59 - 31.09 % ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 15 และ 18 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 6.54 % และ 4.59 % ตามลำดับ มีความหนาลดลงตั้งแต่ 0.70 - 37.48 % ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 18 มีความหนาเพิ่มขึ้น 2.47 % มีมวลสารลดลงตั้งแต่ 9.20 - 64.57 % มีปริมาตรลดลงตั้งแต่ 5.77 - 70.31 % ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 15 และ 18 มีปริมาตรเพิ่มขึ้น 11.46 % และ 12.09 % ตามลำดับ คาดว่าเกิดจากการหลอมเหลวหรือการระเหยออกไปของเนื้อสารบางส่วนในขณะเผา ส่วนเม็ดสารตัวอย่างที่ 15 และ 18 คาดว่าเกิดจากความพรุนหรือรอยปริแตกของเม็ดสาร และเม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดแสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 19 คาดว่าไม่มีเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งหรือมีน้อยมาก

4.2 สมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำยวดยิ่ง

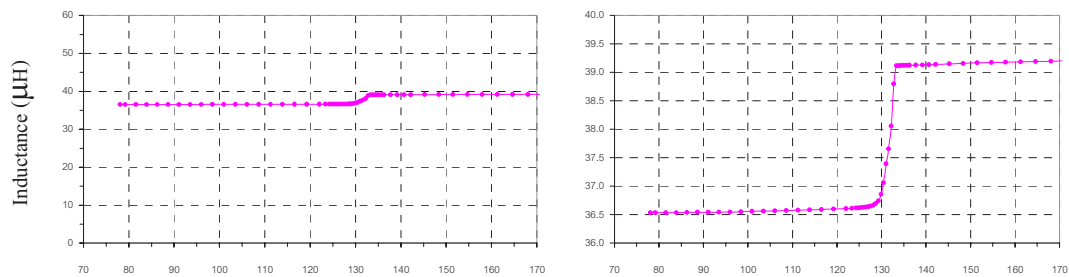
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบสารตัวนำยวดยิ่ง ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ตามอุณหภูมิ

ในการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ การคำนวณหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิ กระทำในช่วงอุณหภูมิประมาณ 77 K ไปจนถึงอุณหภูมิห้อง ได้ผลการทดลองและผลการคำนวณดังกราฟรูป 4.1 - 4.6 , 4.7 - 4.14 และ 4.15 - 4.25 ซึ่งแสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิ เพียงบางส่วนในช่วงอุณหภูมิประมาณ 77 - 170 K เมื่อ ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 4.4 - 4.5 , 4.6 - 4.7 และ 4.8 - 4.9 เมื่อ ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

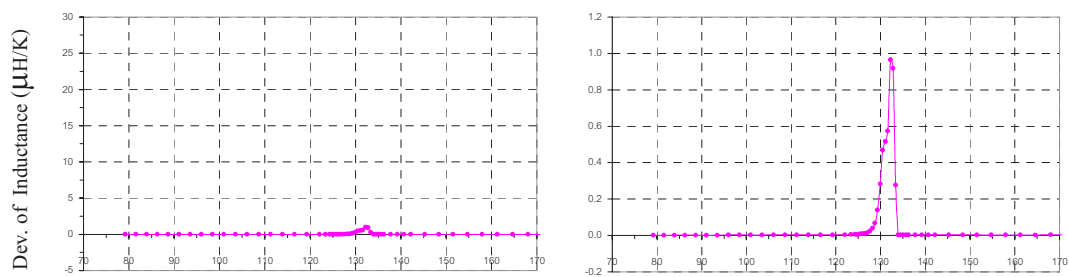


รูป 4.1 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

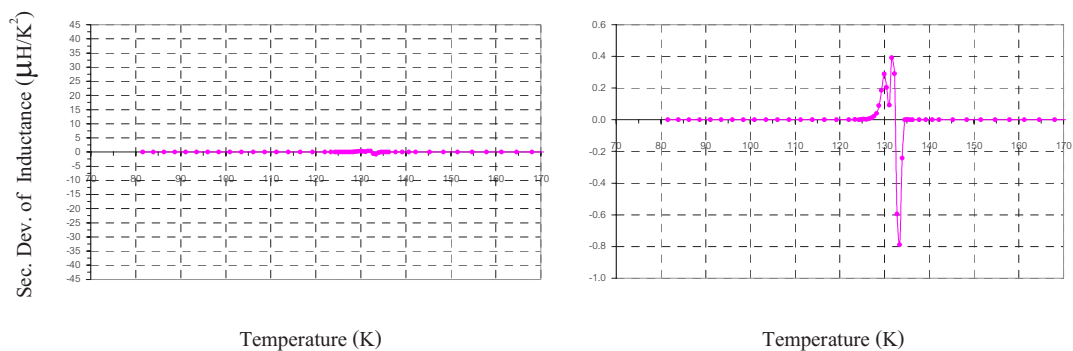
- (ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร
- (ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร
- (ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



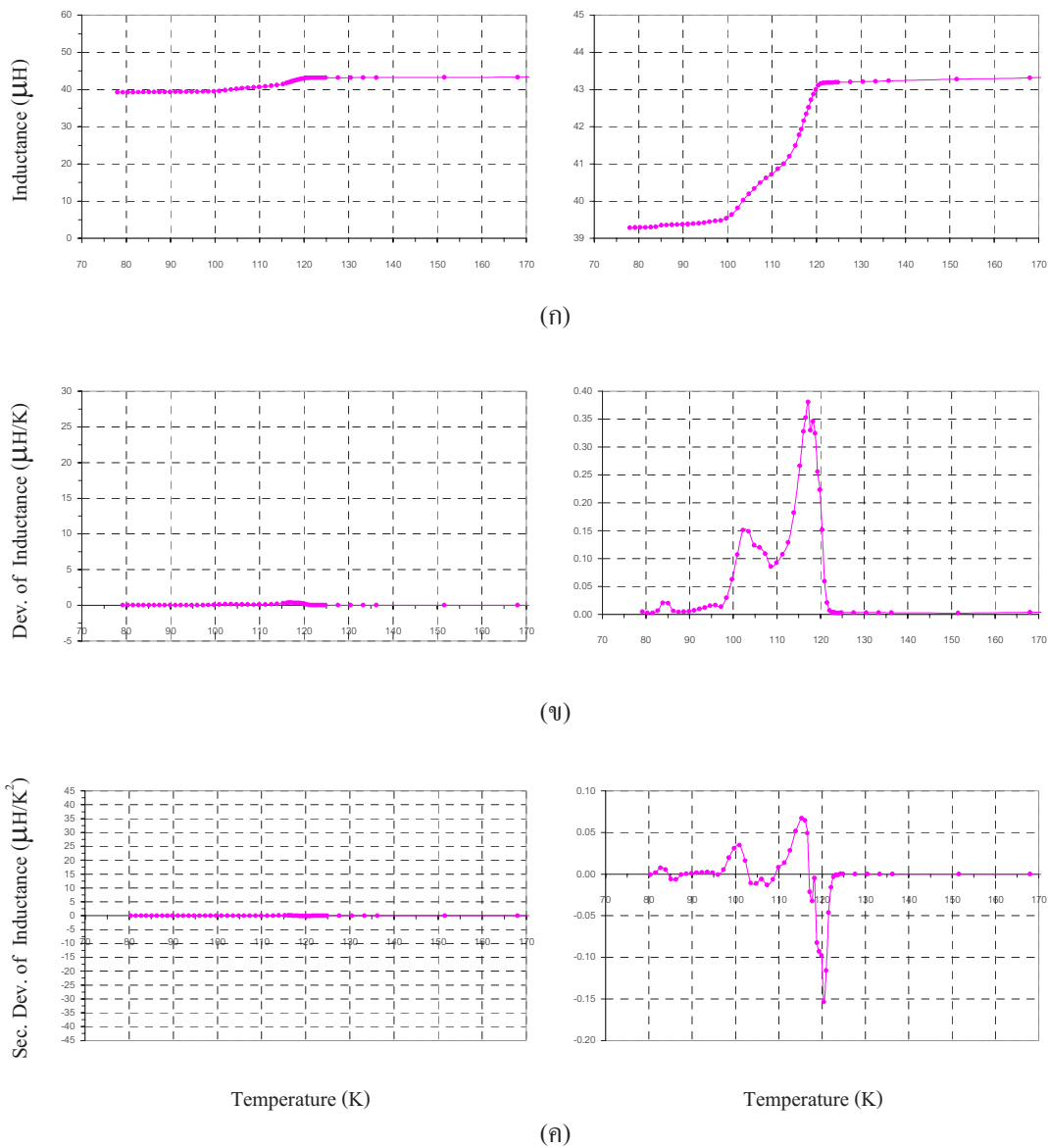
(ข)



(ค)

รูป 4.2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเมดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

- (ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร
- (ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร
- (ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

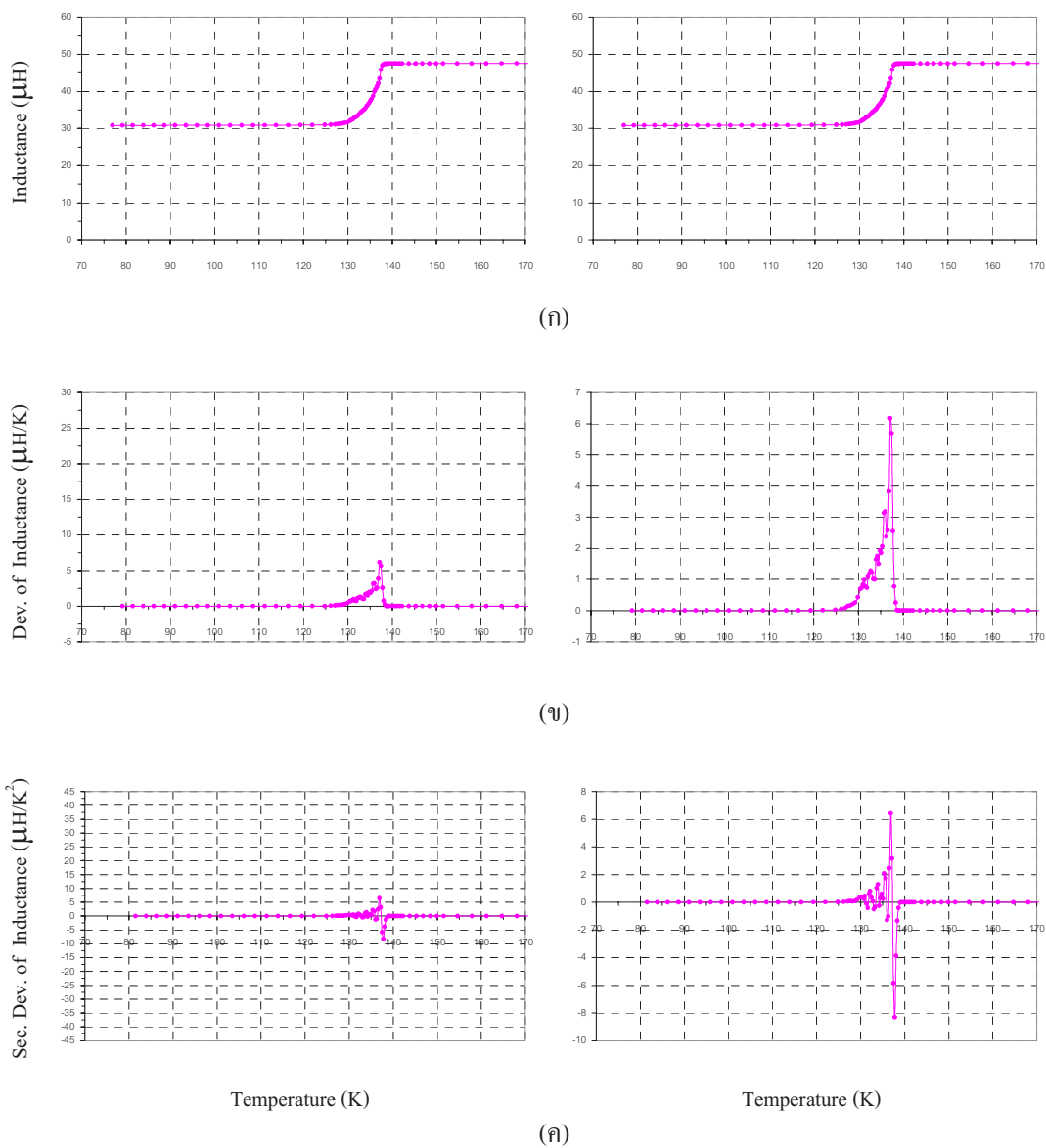


รูป 4.3 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเมดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

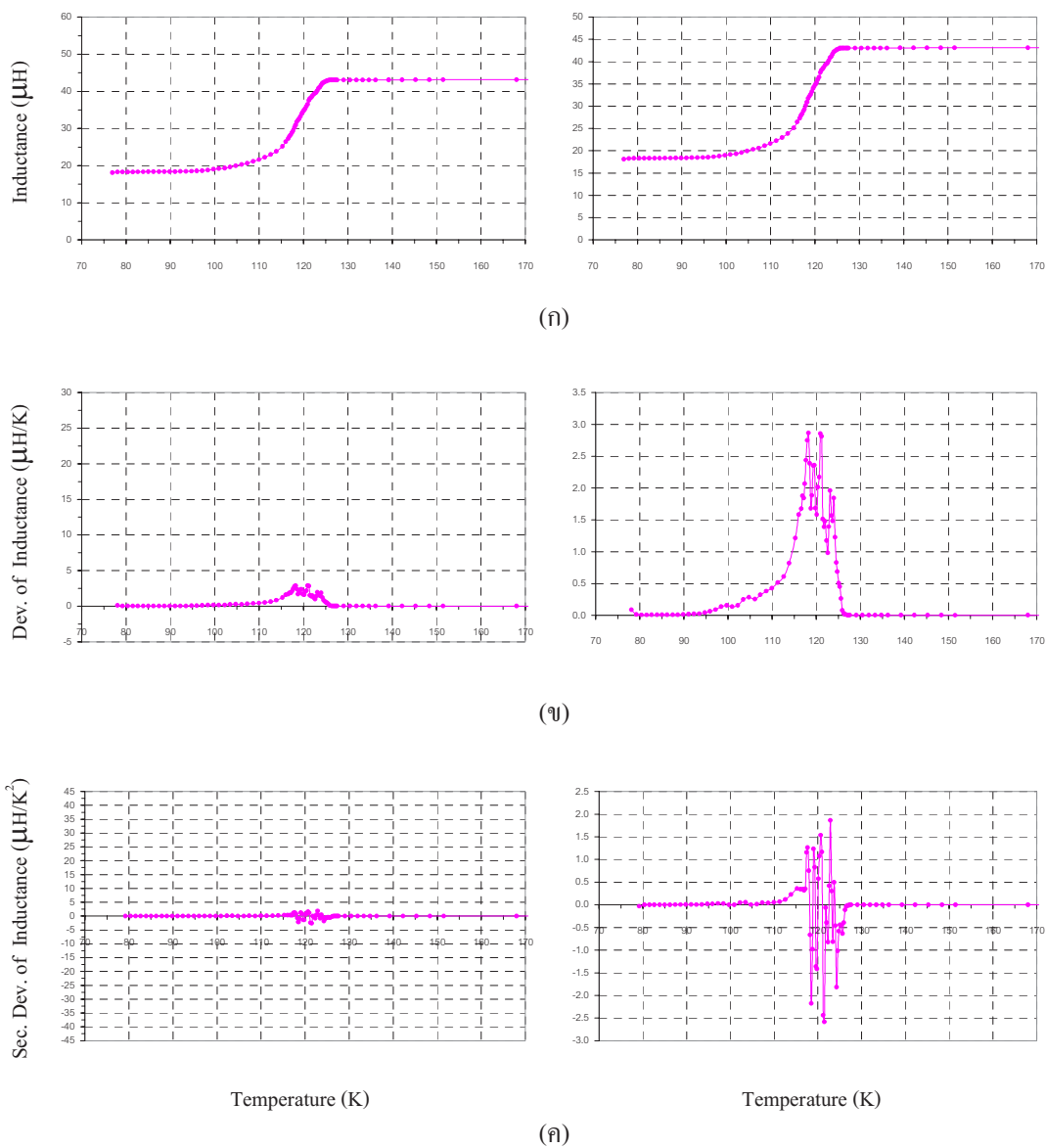


รูป 4.4 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

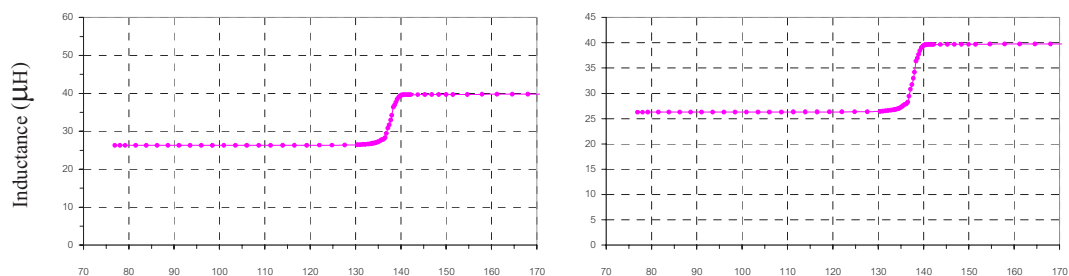


รูป 4.5 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

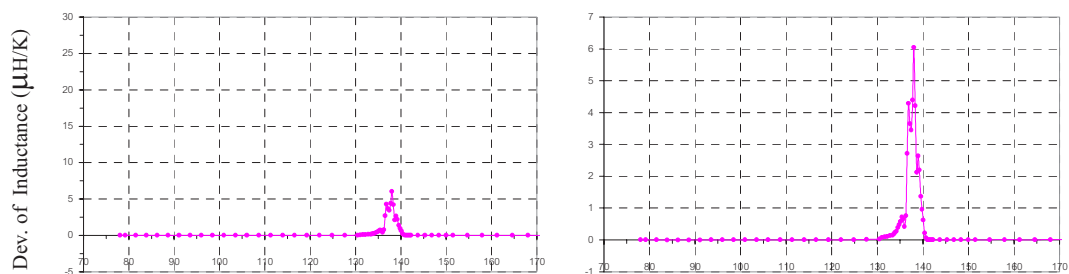
(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

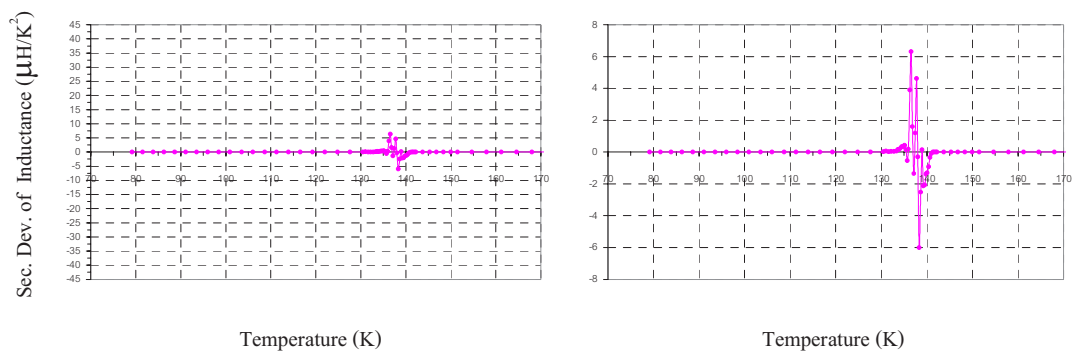
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 4.6 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

จากผลการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร ดังกราฟรูป 4.1 – 4.6 พบว่า ค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 13, 14 รองลงมา ก่อนข้างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงประมาณ 77 - 170 K จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ การเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดและตัวแปรอสมมาตร ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 4.4 – 4.5 ดังนี้

ตาราง 4.4 แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ

สารเม็ดที่	อุณหภูมิวิกฤต (K)				ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ (K)		
	$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{inflect})}$	$T_{c(\text{mid})}$	$T_{c(\text{zero})}$	$\Delta\bar{T}$	ΔT	ΔT_{PP}
5	139.492	135.938	136.977	131.894	3.489	3.146	2.987
6	133.369	132.211	131.944	127.077	3.145	2.543	1.763
9	121.508	117.149	114.490	98.447	11.840	6.065	5.115
10	138.360	137.145	135.838	127.613	2.753	2.028	0.887
13	125.643	118.231	118.191	97.177	8.819	8.473	1.379
14	140.390	138.004	137.782	131.031	2.313	2.196	1.775

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.4 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ พบว่า อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{inflect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง และยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ กับ $T_{c(\text{mid})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 มีค่าแตกต่างกันมาก คือ 2.659 K รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 10 มีค่าแตกต่างกันปานกลาง คือ -1.039, 1.307 K และเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 13, 14 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ 0.267, 0.040, 0.222 K ทำให้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างดังกล่าวมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ นั่นคือ การเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างแต่ละเม็ดมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร นั่นเอง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้กราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่สมมาตร

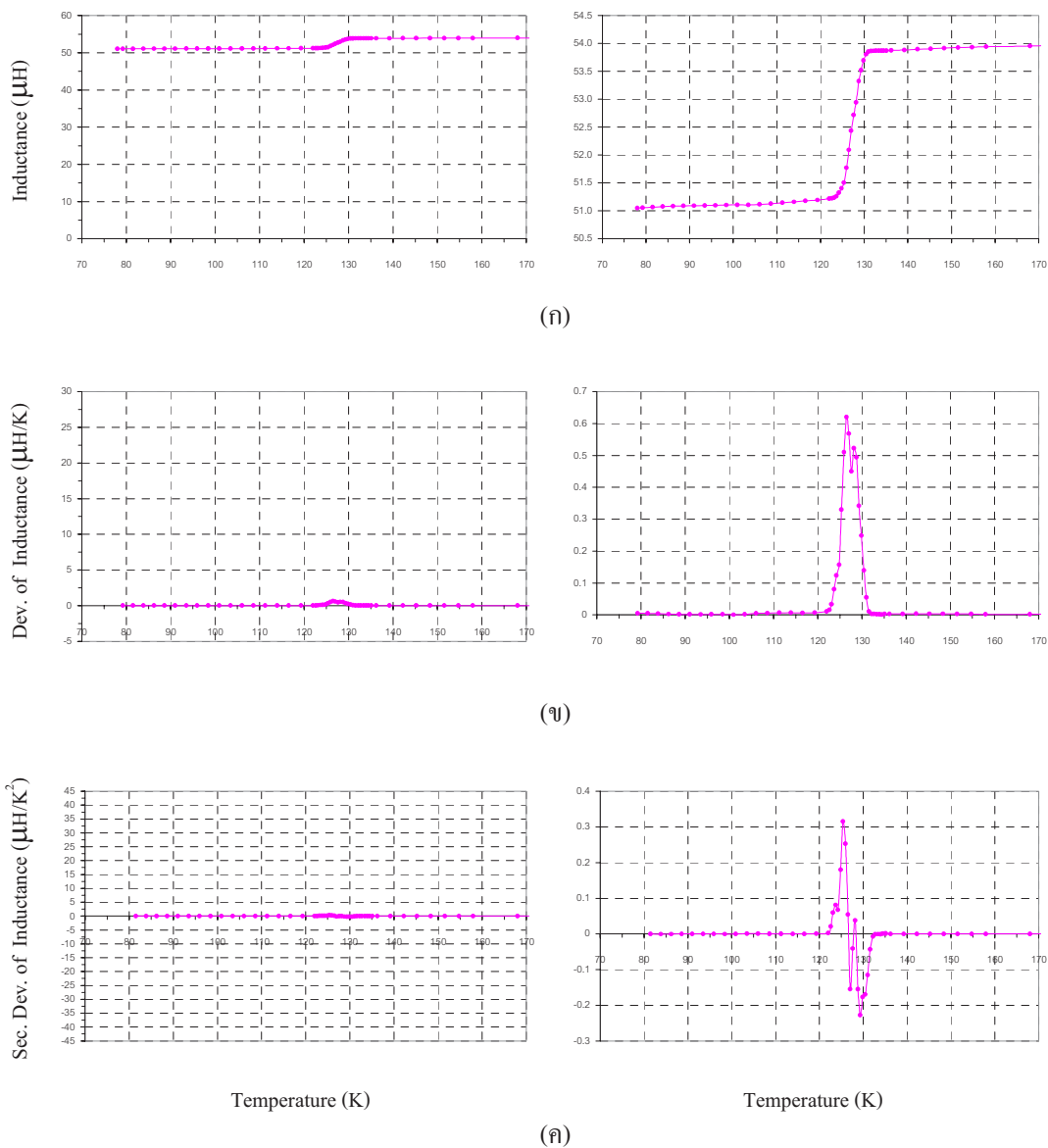
และเข้าใกล้สมมาตร กราฟอนุพันธ์อันดับสองไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับด้วยเช่นกัน

ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ พบว่า ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($\Delta\bar{T}$), ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะครึ่งพิค (ΔT) และความกว้างในการเปลี่ยนสถานะพิคถึงพิค (ΔT_{pp}) ของเม็คสารตัวอย่างที่ 9, 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็คสารตัวอย่างที่ 5, 6, 10, 14 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากมีปริมาณและสัดส่วนของสารเจือปนชนิดต่าง ๆ ในแต่ละเม็คสารตัวอย่างไม่เท่ากัน นั่นคือ เม็คสารตัวอย่างที่ 9, 13 และ 5, 6, 10, 14 มีปริมาณสารเจือปนมากและน้อย ตามลำดับ

ตาราง 4.5 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียว ϵ_L ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด L'_{max} และตัวแปรสมมาตร $(A-B)/(A+B)$ ของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

สารเม็คที่	ϵ_L	L'_{max} ($\mu H/K$)	$(A-B)/(A+B)$
5	0.07	1.009	-0.135424
6	0.07	0.966	-0.337043
9	0.09	0.381	-0.391109
10	0.52	6.176	-0.128112
13	1.30	2.864	-0.162936
14	0.50	6.047	0.024692

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.5 สำหรับเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ พบว่า ค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็คสารตัวอย่างที่ 10, 14 มีค่าปานกลาง และเม็คสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9 มีค่าน้อยมาก ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็คสารตัวอย่างที่ 10, 14 มีค่ามาก รองลงมา เม็คสารตัวอย่างที่ 5, 13 มีค่าปานกลาง และเม็คสารตัวอย่างที่ 6, 9 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากการมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งในเม็คสารตัวอย่างที่แตกต่างกันนั่นเอง นอกจากนี้ ตัวแปรสมมาตรของแต่ละเม็คสารตัวอย่างมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของกราฟอนุพันธ์อันดับสอง

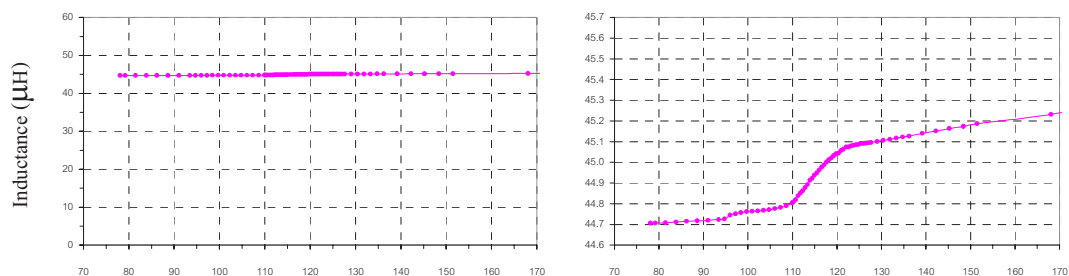


รูป 4.7 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลงของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

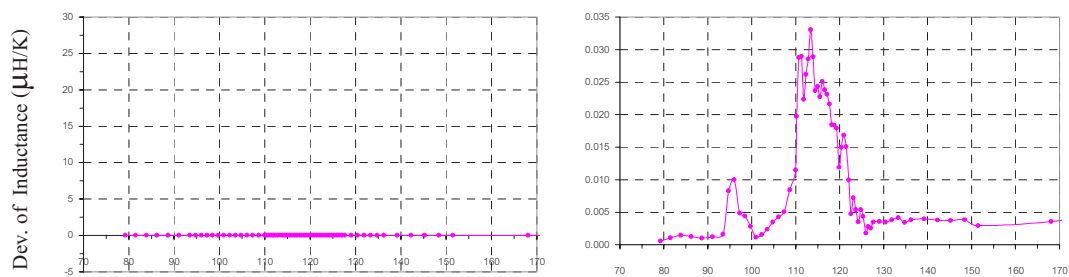
(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

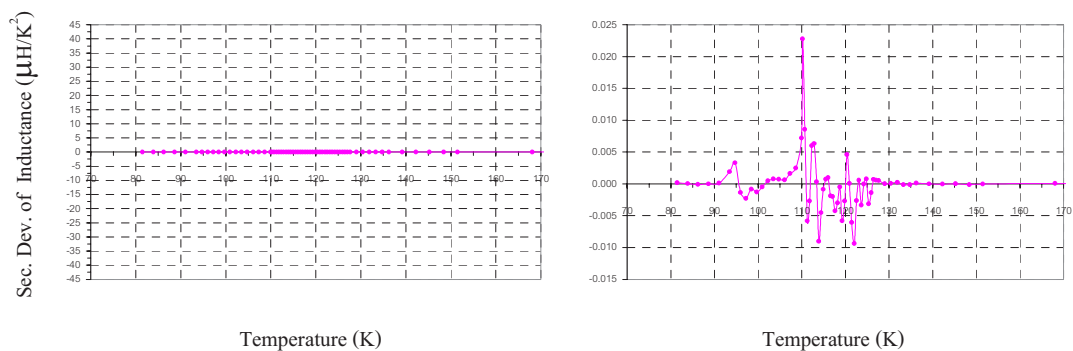
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



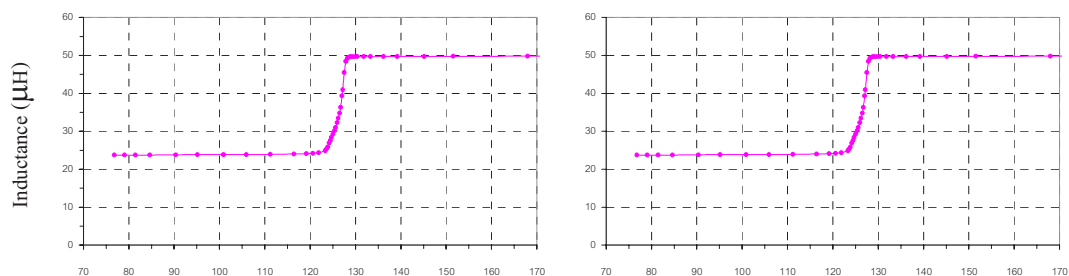
(ค)

รูป 4.8 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

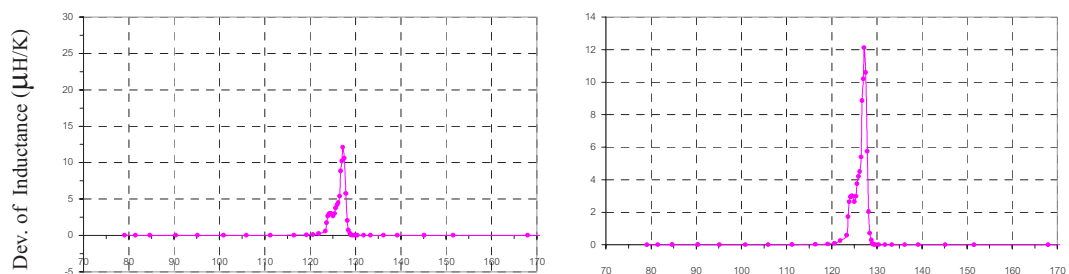
(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

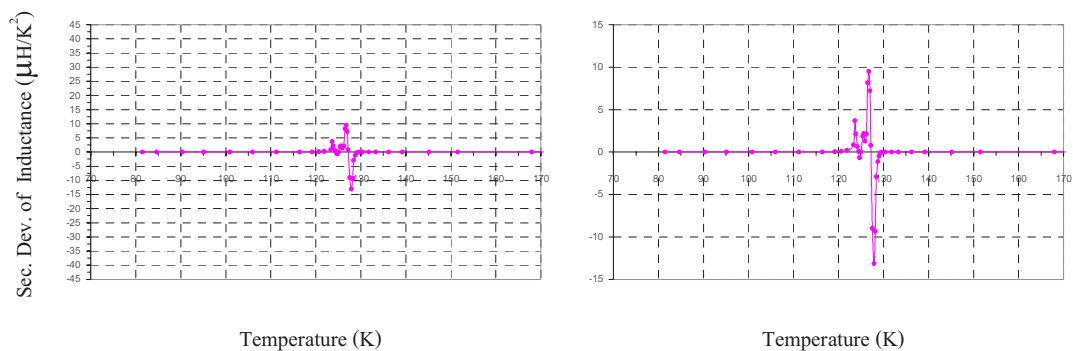
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



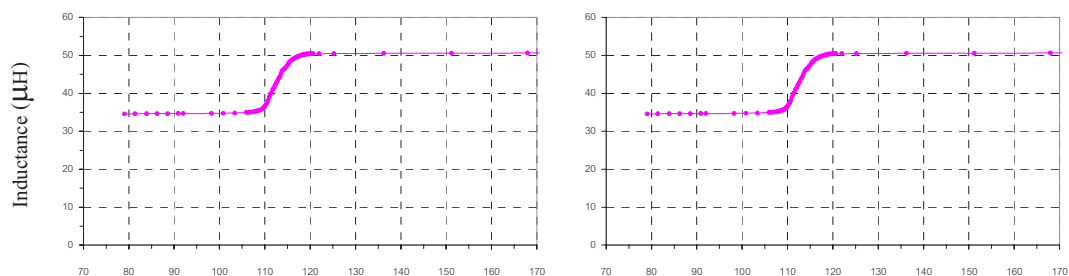
(ค)

รูป 4.9 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

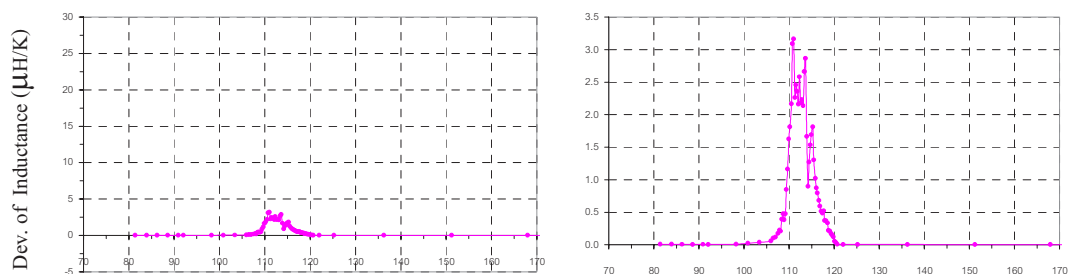
(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

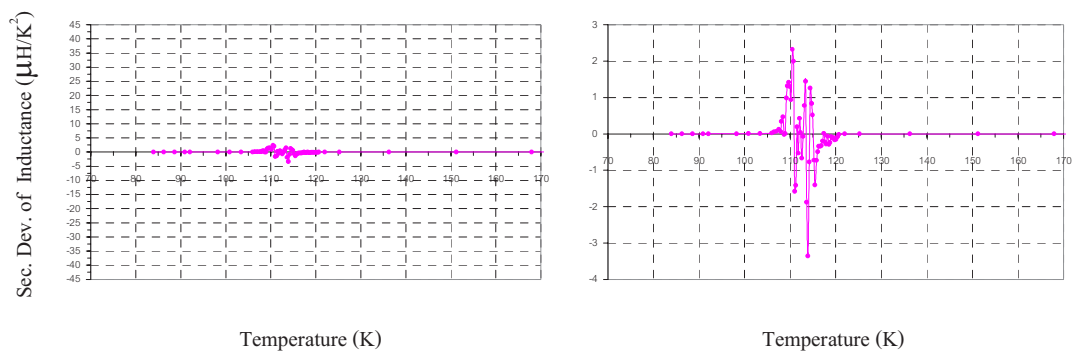
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



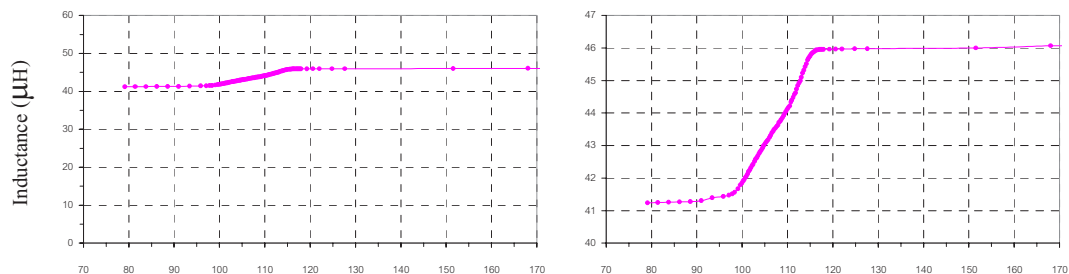
(ค)

รูป 4.10 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

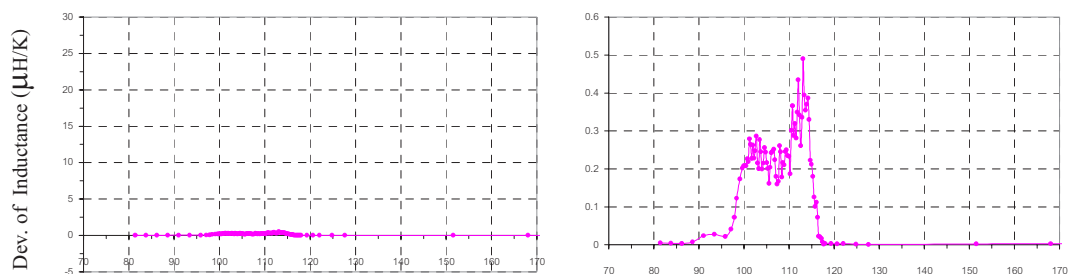
(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

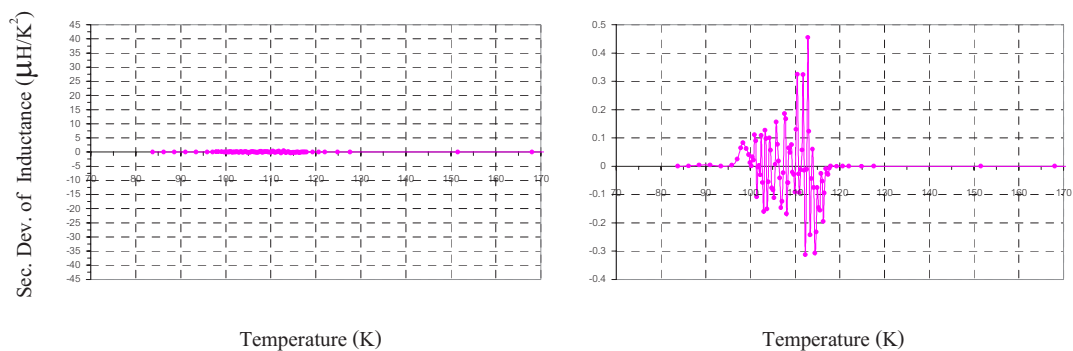
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



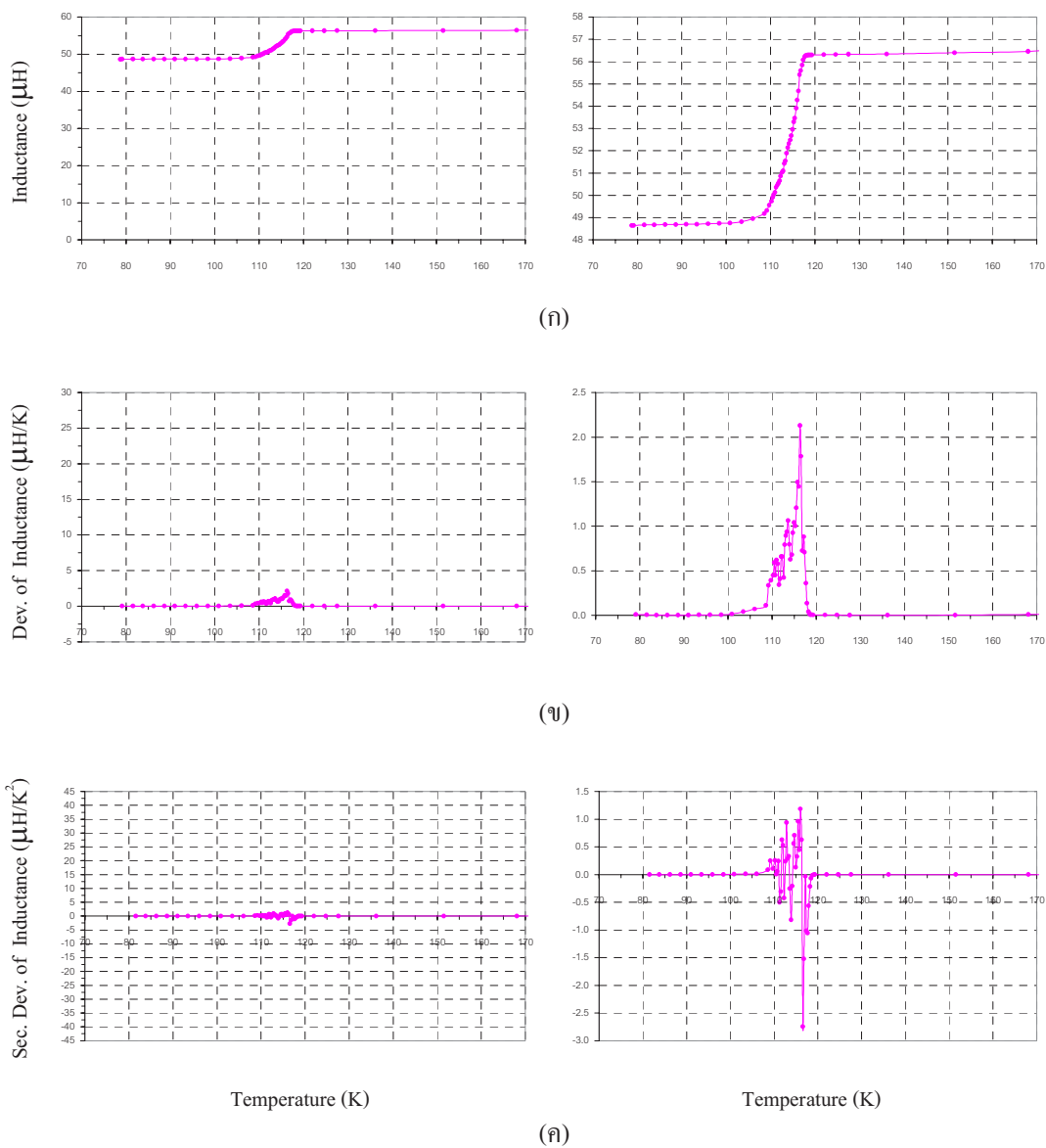
(ค)

รูป 4.11 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

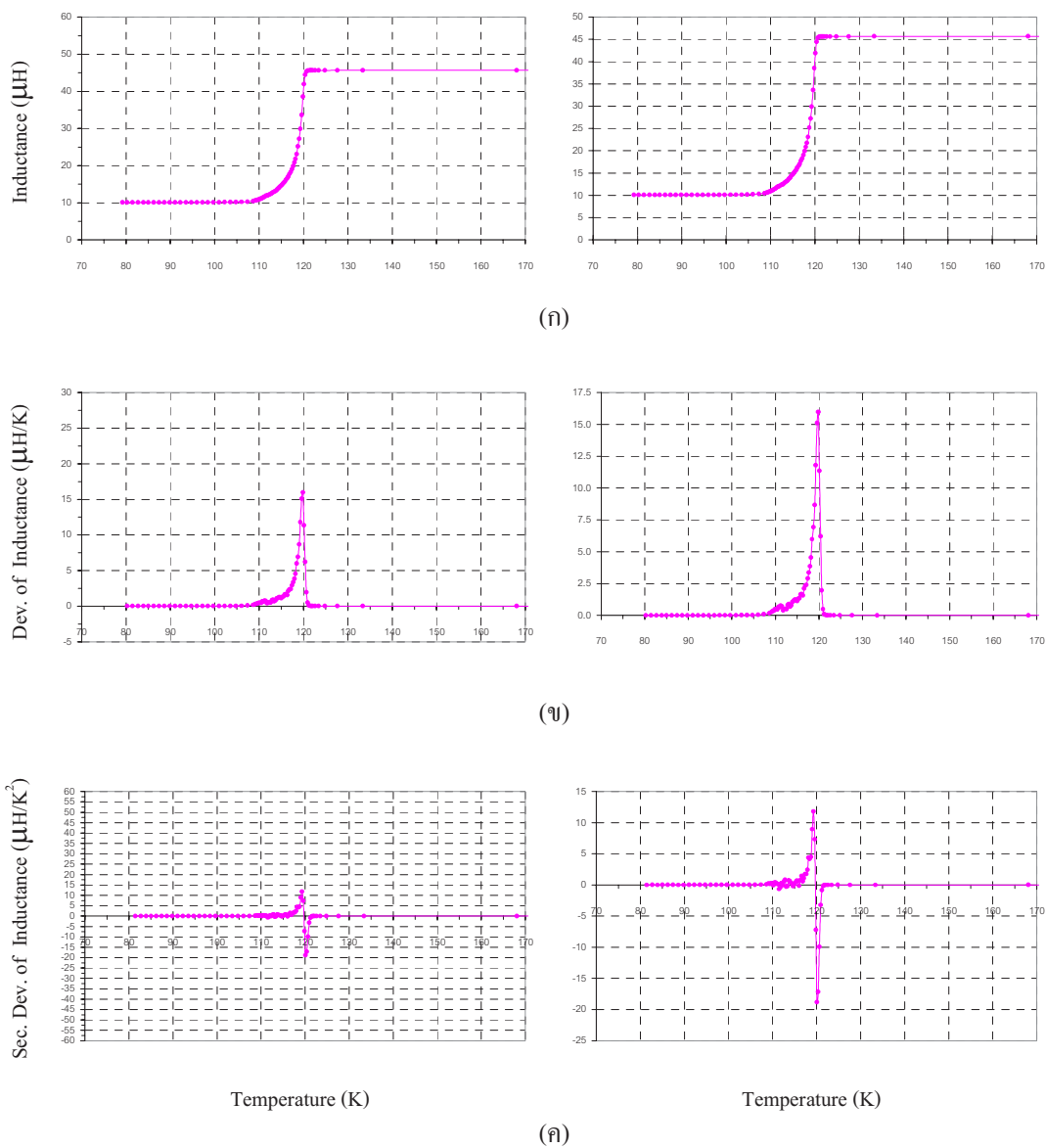


รูป 4.12 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

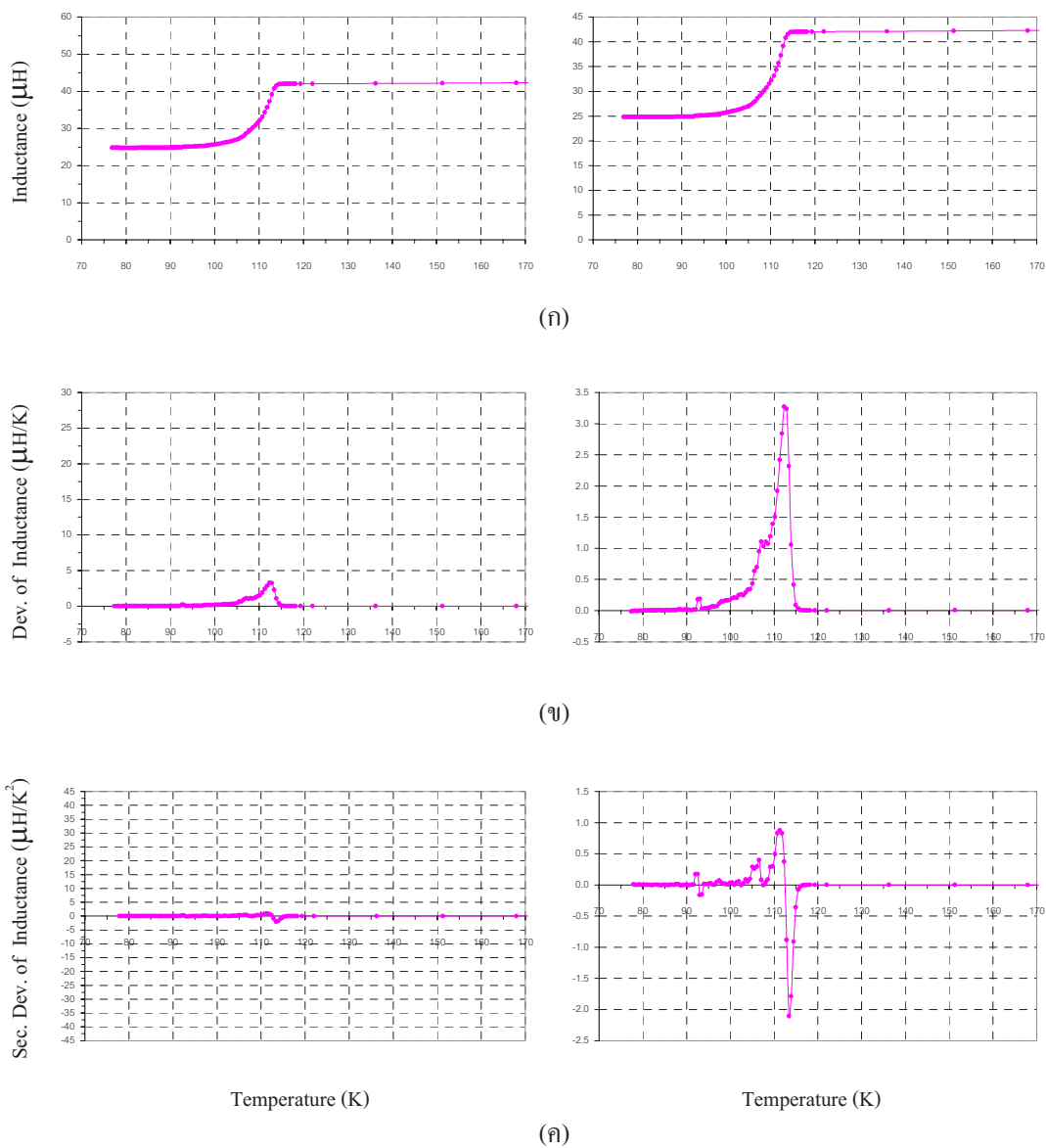


รูป 4.13 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



รูป 4.14 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

- (ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร
- (ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร
- (ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

จากผลการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของ สาร ดังกราฟรูป 4.7–4.14 พบว่า ค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความ เหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 8, 13, 14 รองลงมา ก่อนข้างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 9, 10 และไม่ชัดเจน ได้แก่ เม็ดสาร ตัวอย่างที่ 5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงประมาณ 77–170 K จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการ ทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ การเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดและตัวแปรอสมมาตร ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 4.6–4.7 ดังนี้

ตาราง 4.6 แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

สารเม็ดที่	อุณหภูมิวิกฤต (K)				ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ (K)		
	$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{inflect})}$	$T_{c(\text{mid})}$	$T_{c(\text{zero})}$	$\Delta\bar{T}$	ΔT	ΔT_{PP}
3	131.002	126.513	127.250	123.109	5.066	4.196	3.952
5	122.058	113.401	114.744	108.643	22.077	10.910	11.849
6	128.434	127.189	126.795	121.893	2.155	1.316	1.157
8	120.410	110.997	112.541	106.466	5.095	5.440	3.408
9	117.149	113.083	108.131	97.077	10.226	13.751	0.582
10	118.231	116.314	114.533	103.466	3.796	3.384	0.538
13	120.958	119.863	119.119	108.643	2.249	1.359	0.819
14	114.973	112.315	110.979	97.475	5.363	3.307	2.115

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.6 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ พบว่า อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{inflect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง และยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิ วิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ กับ $T_{c(\text{mid})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 มีค่าแตกต่างกันมาก คือ 4.952 K รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 8, 10, 14 มีค่าแตกต่างกันปานกลาง คือ -1.343, -1.544, 1.781, 1.336 K และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 6, 13 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ -0.737, 0.394, 0.744 K

ทำให้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำไปตามอุณหภูมิของเมดสารตัวอย่างดังกล่าวมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ นั่นคือ การเปลี่ยนสถานะของเมดสารตัวอย่างแต่ละเมดมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร นั่นเอง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้กราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่สมมาตรและเข้าใกล้สมมาตร กราฟอนุพันธ์อันดับสองไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน

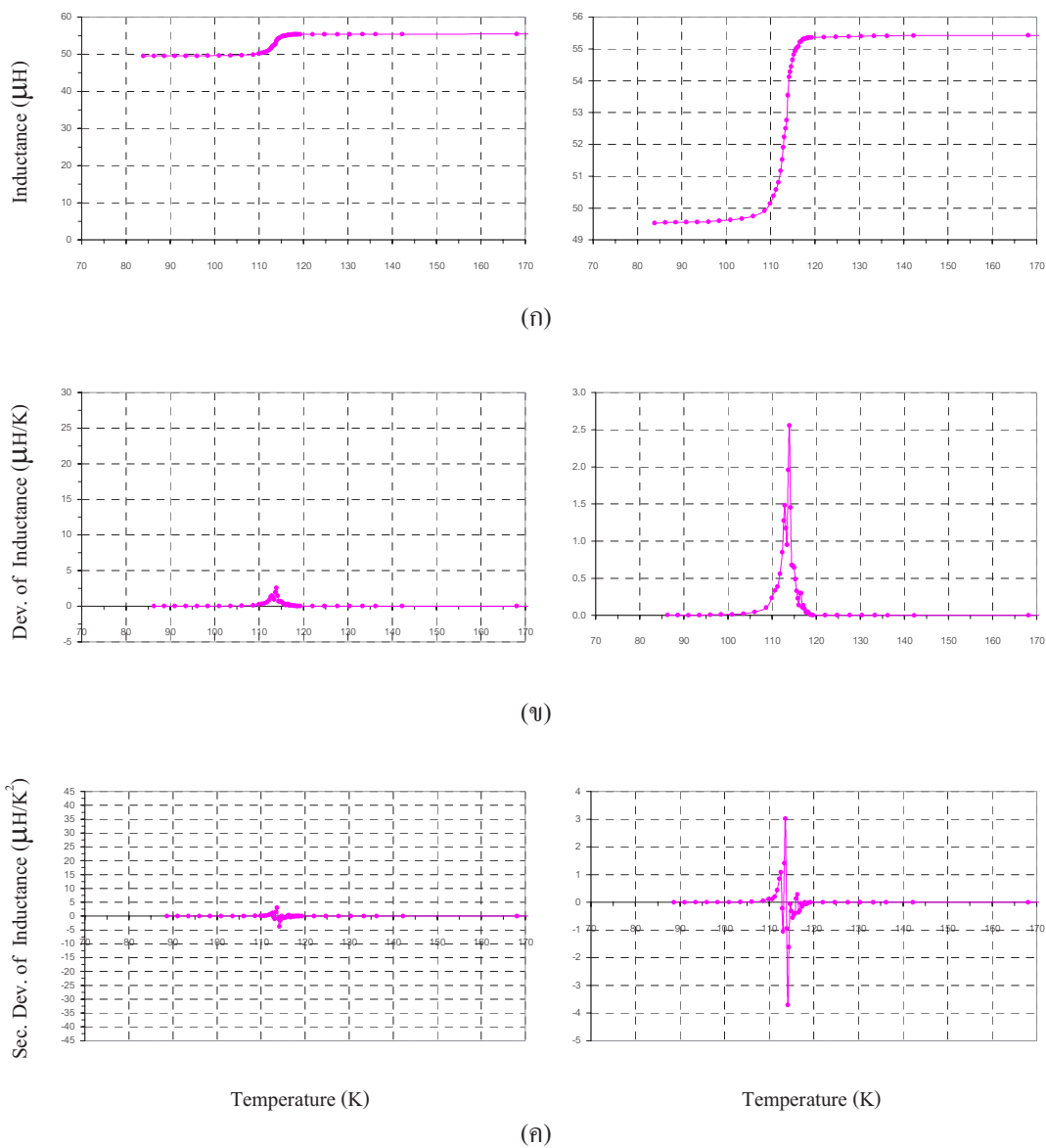
ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ พบว่า ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($\Delta\bar{T}$), ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะครึ่งพิค (ΔT) และความกว้างในการเปลี่ยนสถานะพิคถึงพิค (ΔT_{pp}) ของเมดสารตัวอย่างที่ 5, 9 มีค่ามาก รองลงมา เมดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 14 มีค่าปานกลาง และเมดสารตัวอย่างที่ 6, 13 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากมีปริมาณและสัดส่วนของสารเจือปนชนิดต่าง ๆ ในแต่ละเมดสารตัวอย่างไม่เท่ากัน นั่นคือ เมดสารตัวอย่างที่ 5, 9 เมดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 14 และเมดสารตัวอย่างที่ 6, 13 มีปริมาณสารเจือปนมาก ปานกลางและน้อย ตามลำดับ

ตาราง 4.7 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำ ϵ_L ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด $L'_{\max}$ และตัวแปร

อสมมาตร $(A-B)/(A+B)$ ของเมดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$

สารเมดที่	ϵ_L	$L'_{\max}$ ($\mu H/K$)	$(A-B)/(A+B)$
3	0.05	0.620	0.162597
5	0.01	0.033	0.417443
6	1.03	12.117	-0.161759
8	0.44	3.163	-0.182509
9	0.11	0.490	0.185700
10	0.15	2.129	-0.397168
13	3.35	15.980	-0.229078
14	0.66	3.273	-0.411773

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.7 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ พบว่า ค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวนำของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 9, 10, 14 มีค่าปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 5 มีค่าน้อยมาก ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 10, 14 มีค่าปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 5, 9 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากการมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งในเม็ดสารตัวอย่างที่แตกต่างกัน นั่นเอง นอกจากนี้ ตัวแปรสมมาตรของแต่ละเม็ดสารตัวอย่างมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของกราฟอนุพันธ์อันดับสอง

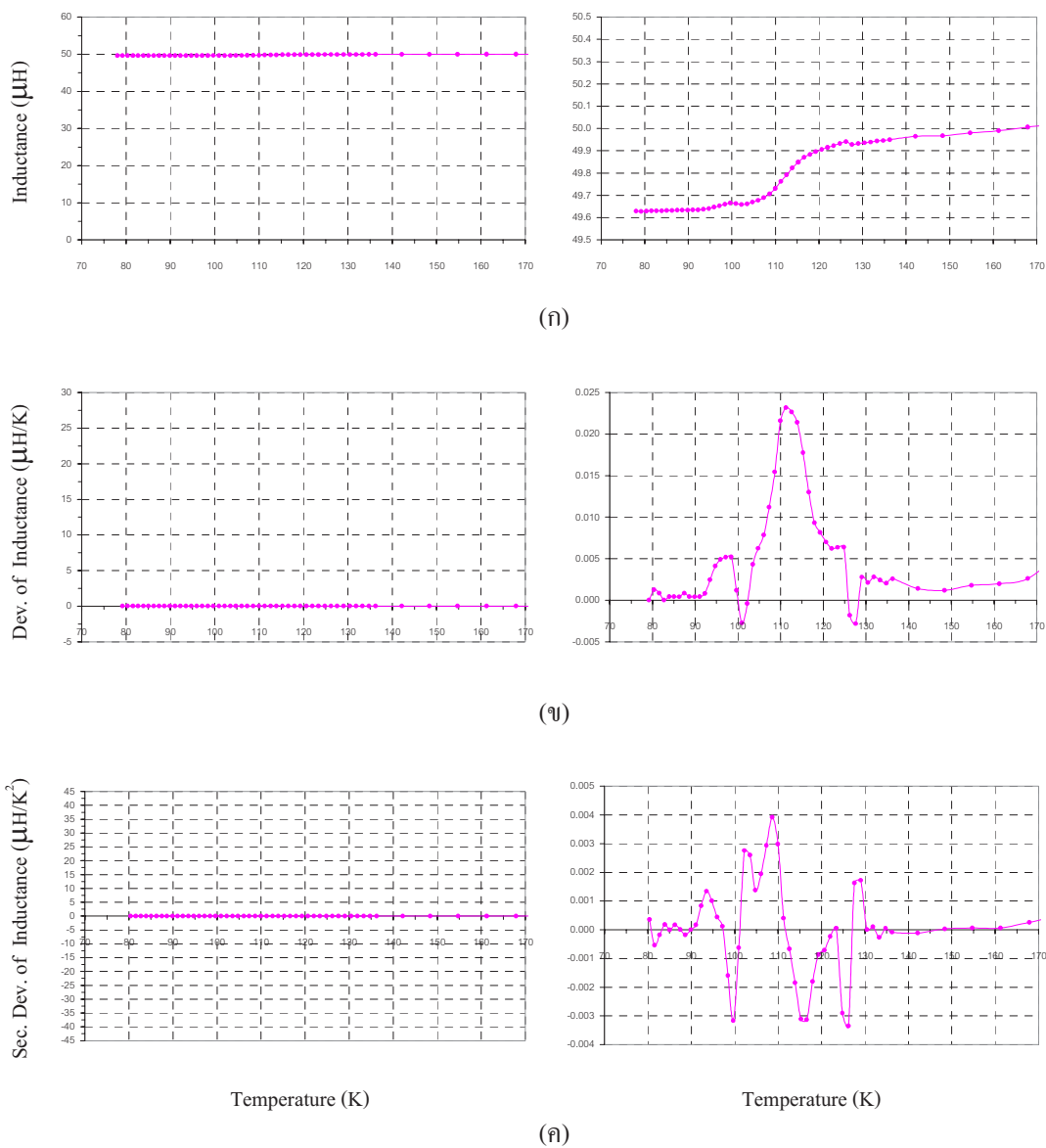


รูป 4.15 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

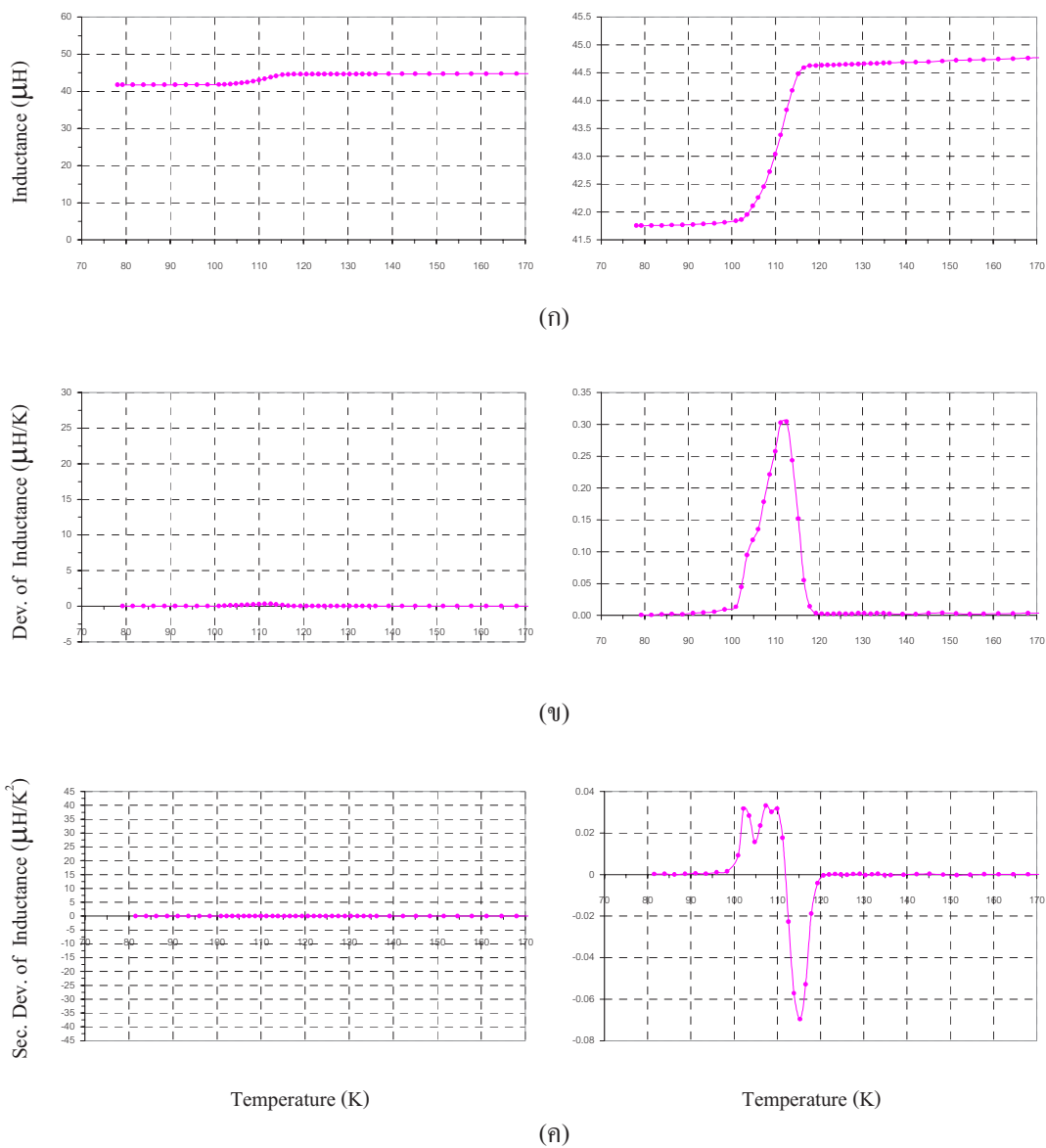


รูป 4.16 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

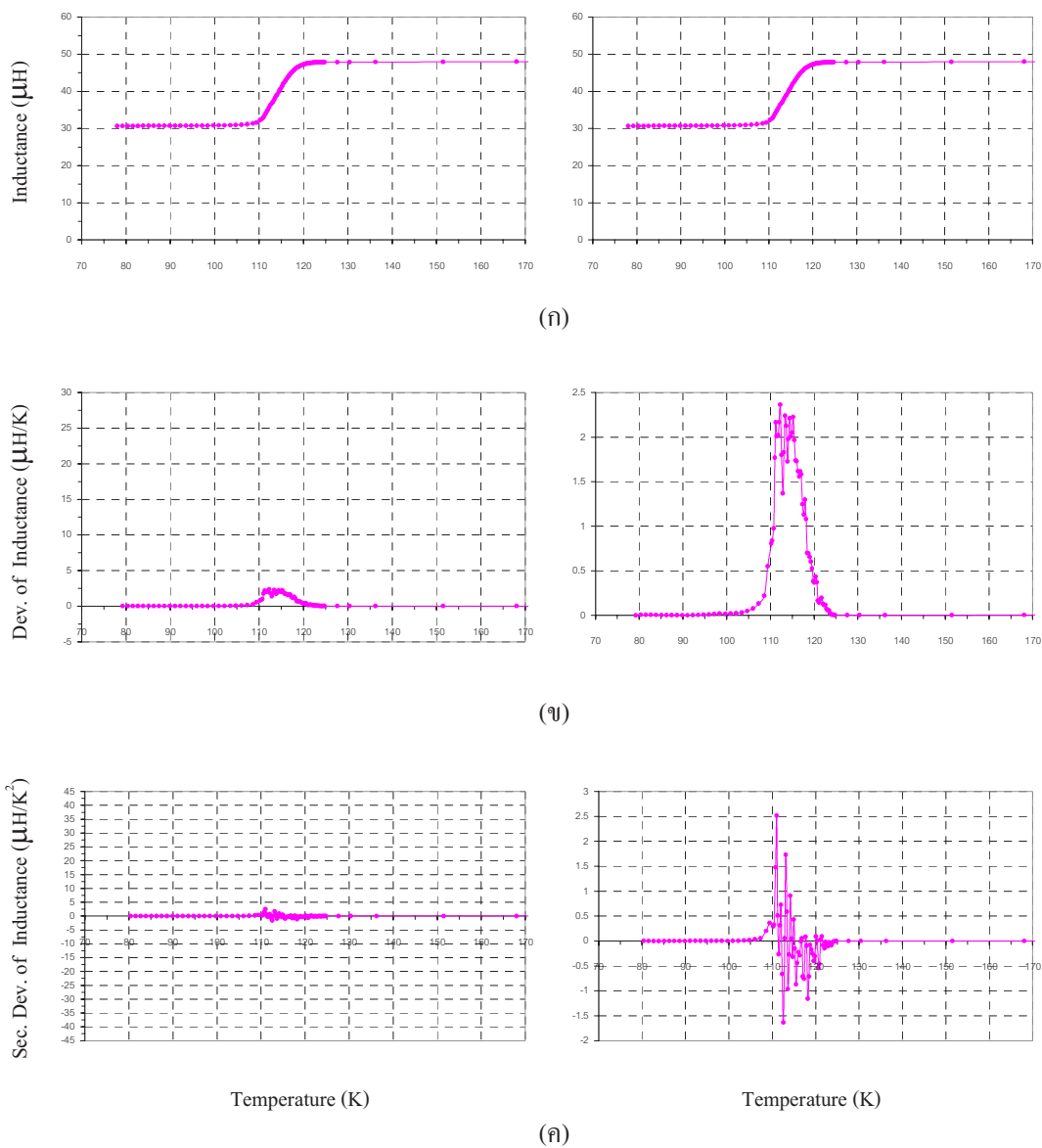


รูป 4.17 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

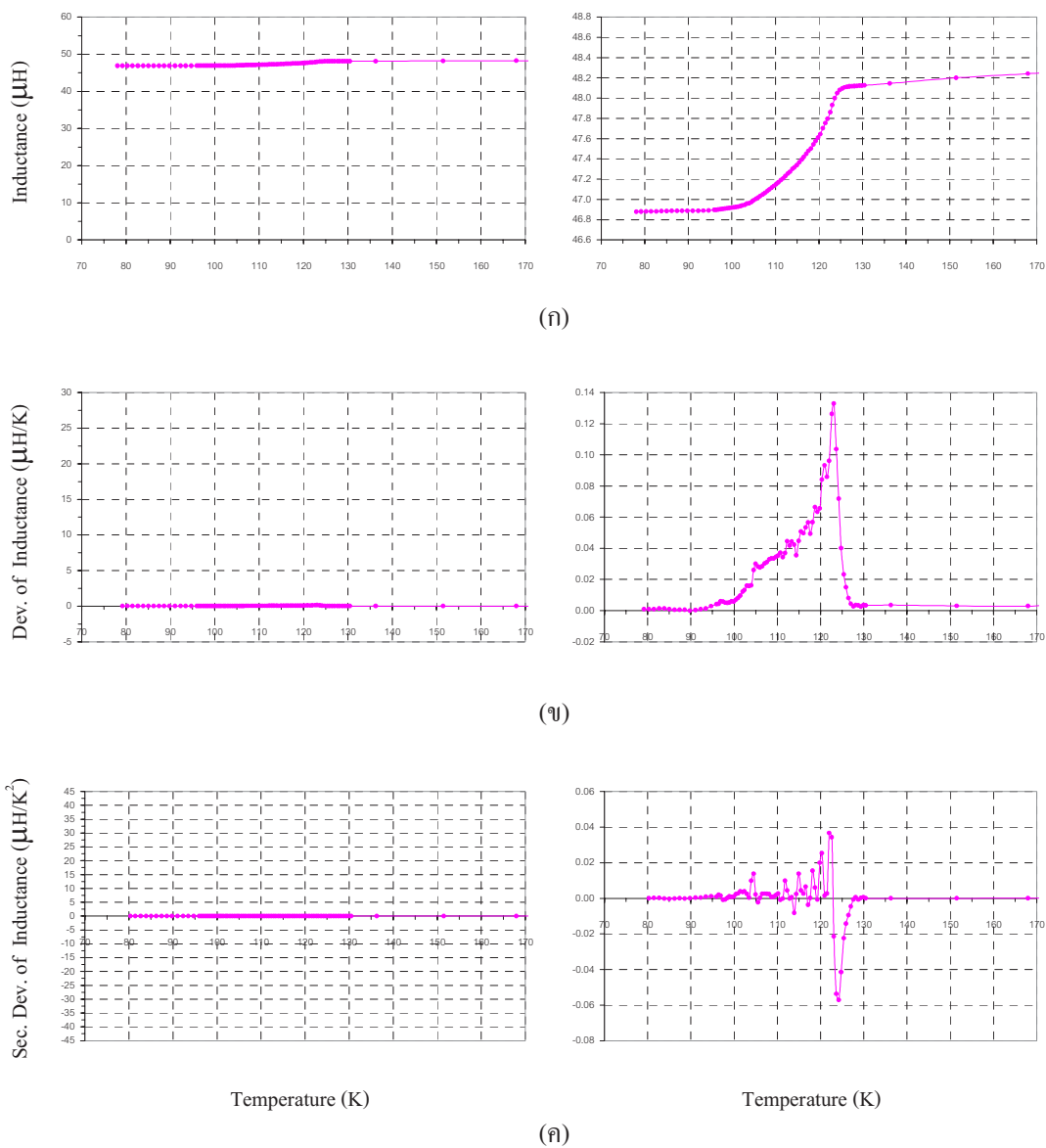


รูป 4.18 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

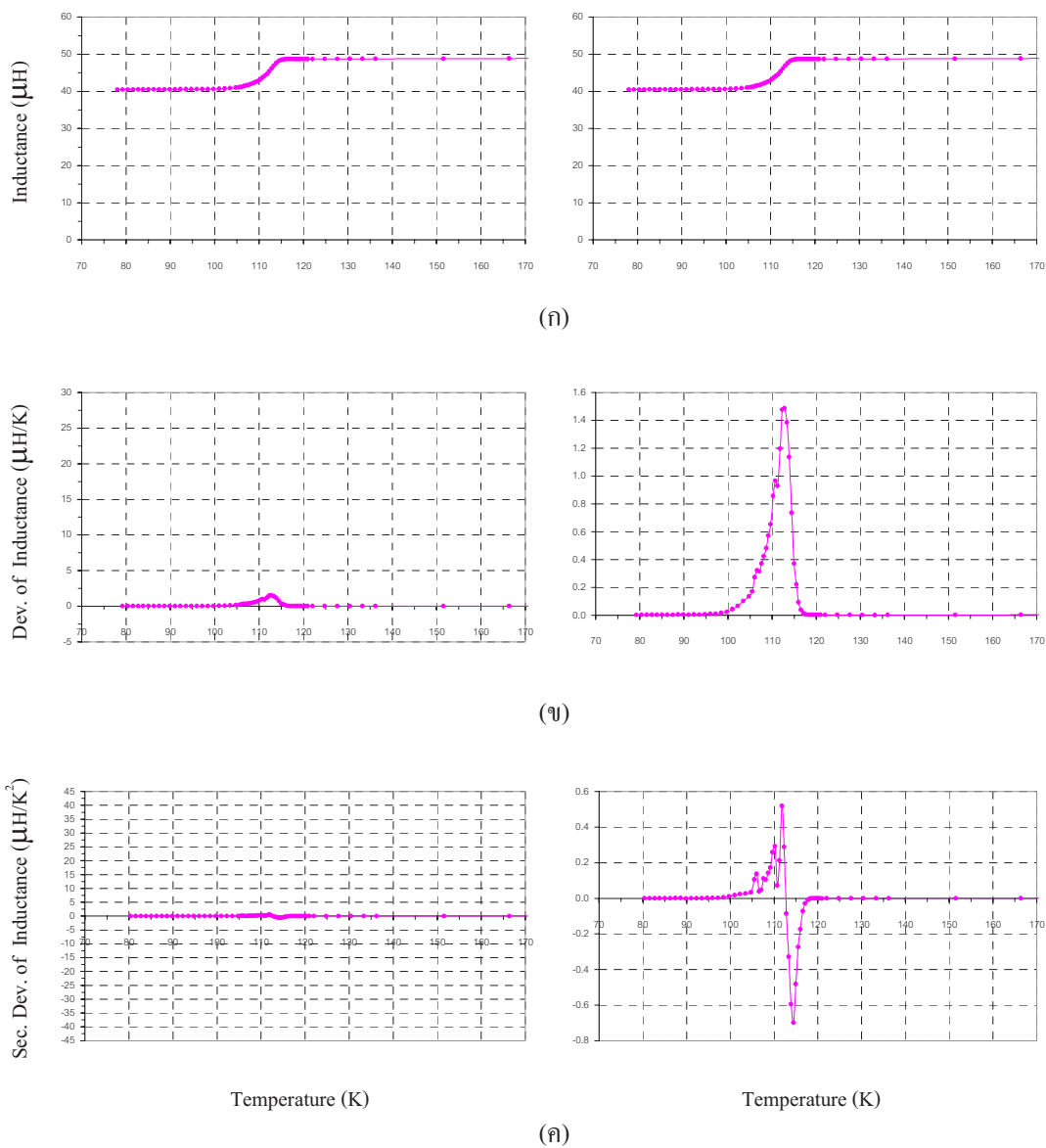


รูป 4.19 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

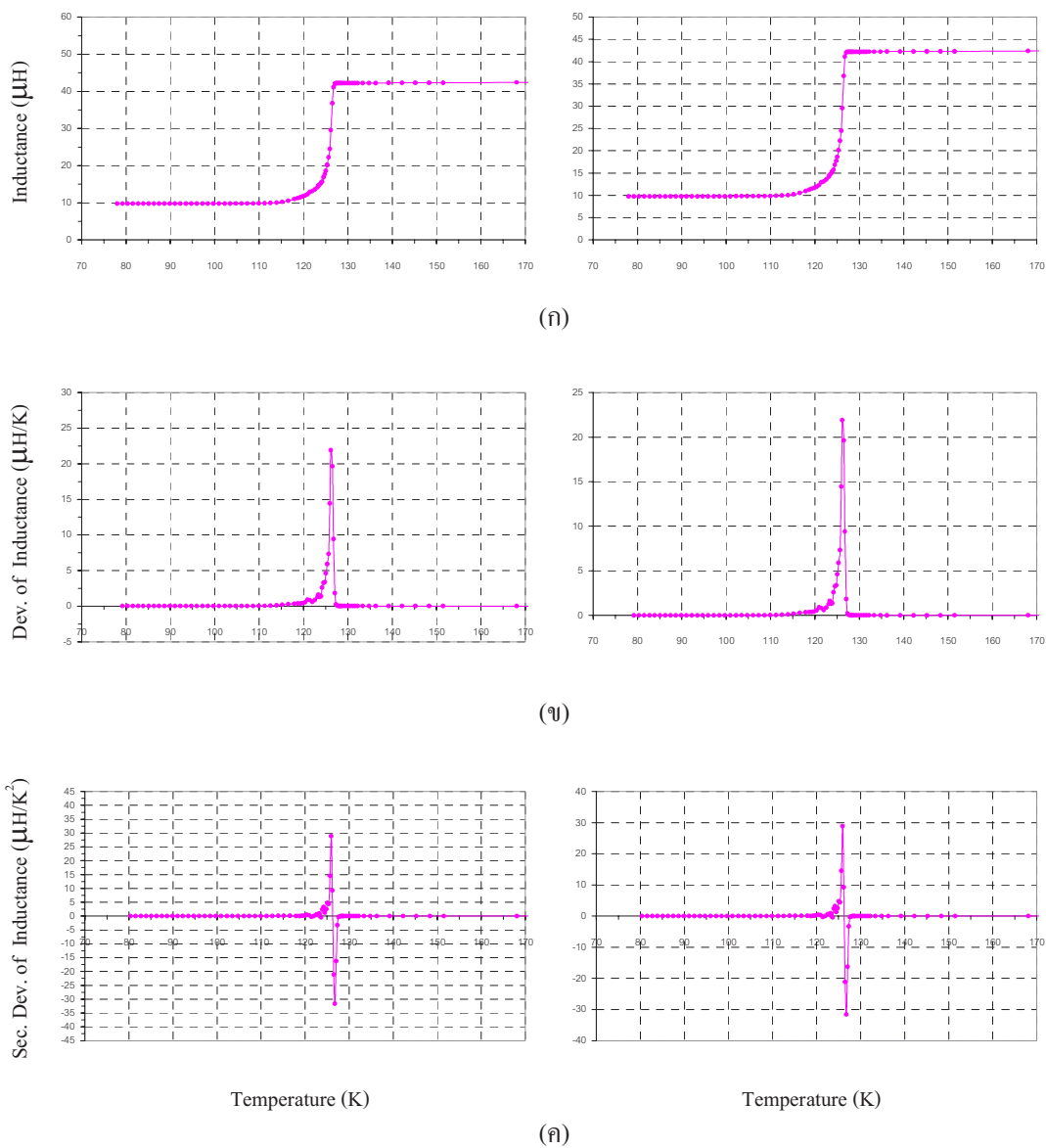
(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



รูป 4.20 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

- (ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร
- (ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร
- (ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

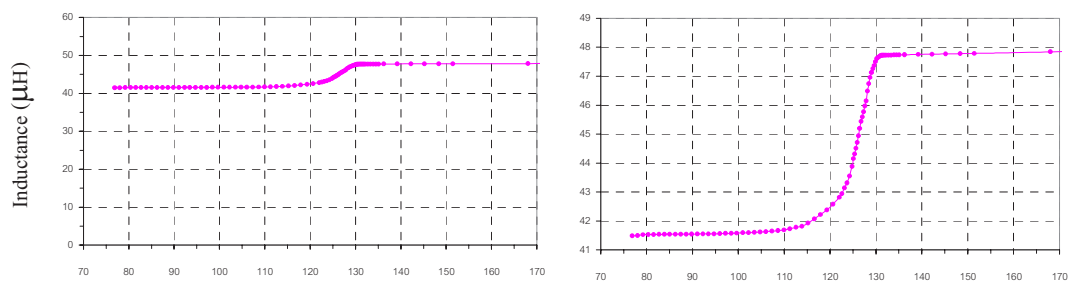


รูป 4.21 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

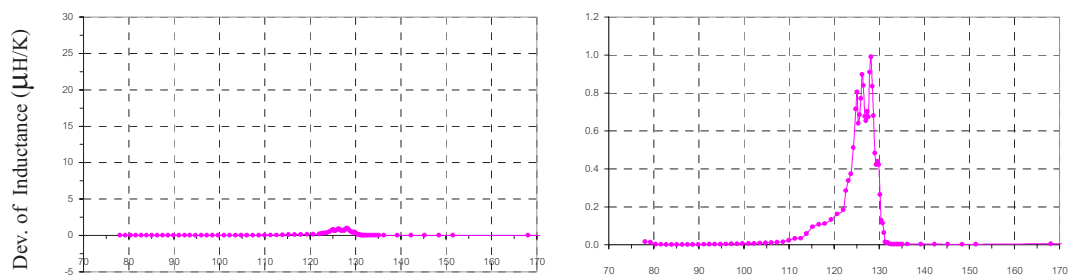
(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

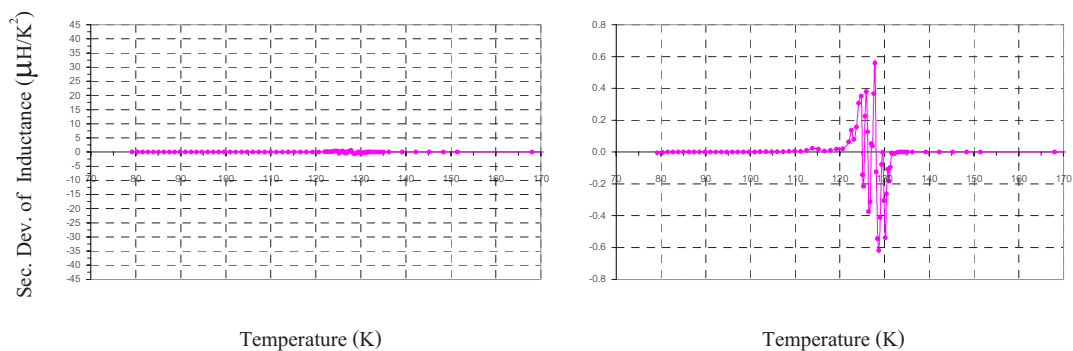
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



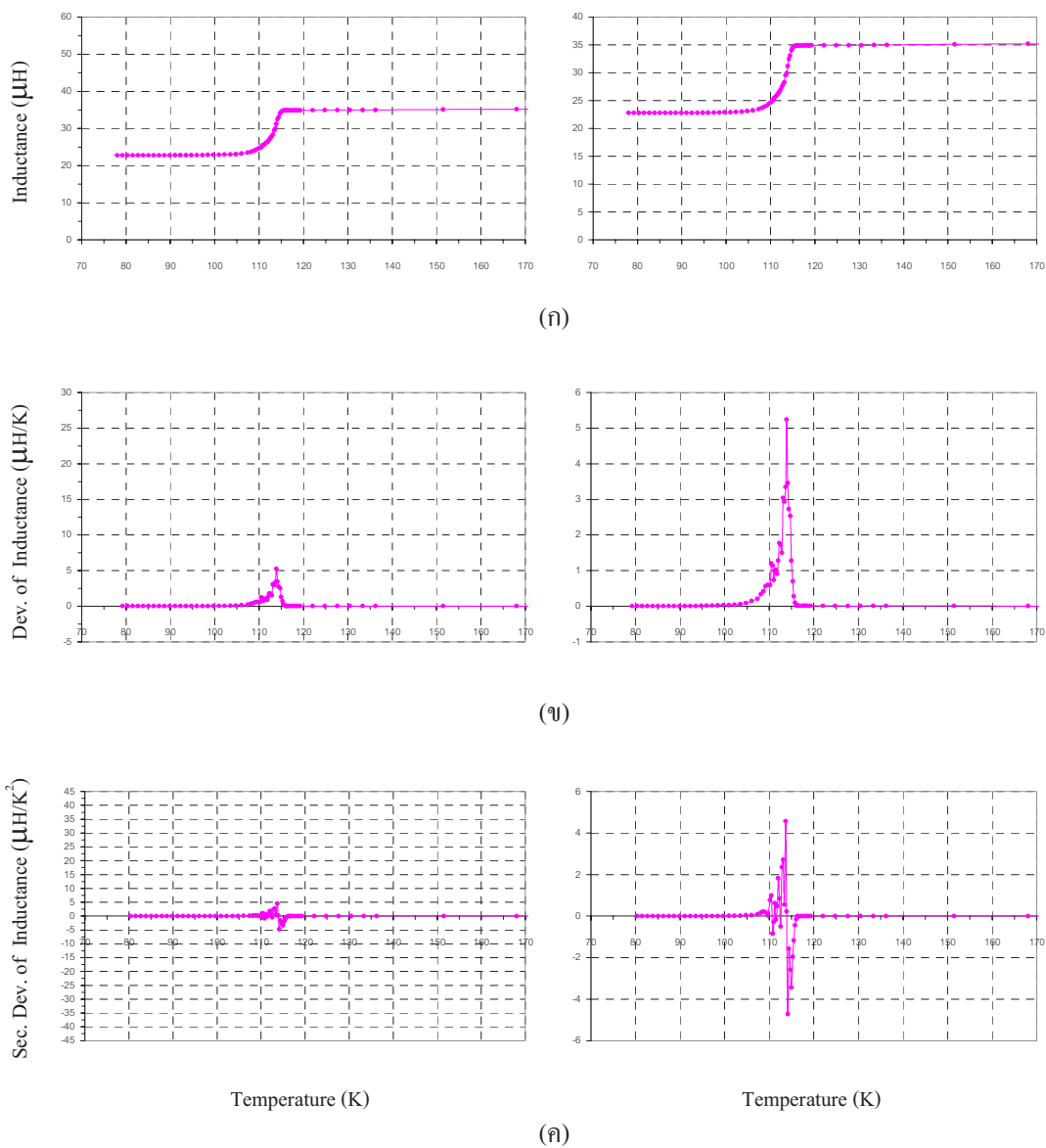
(ค)

รูป 4.22 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

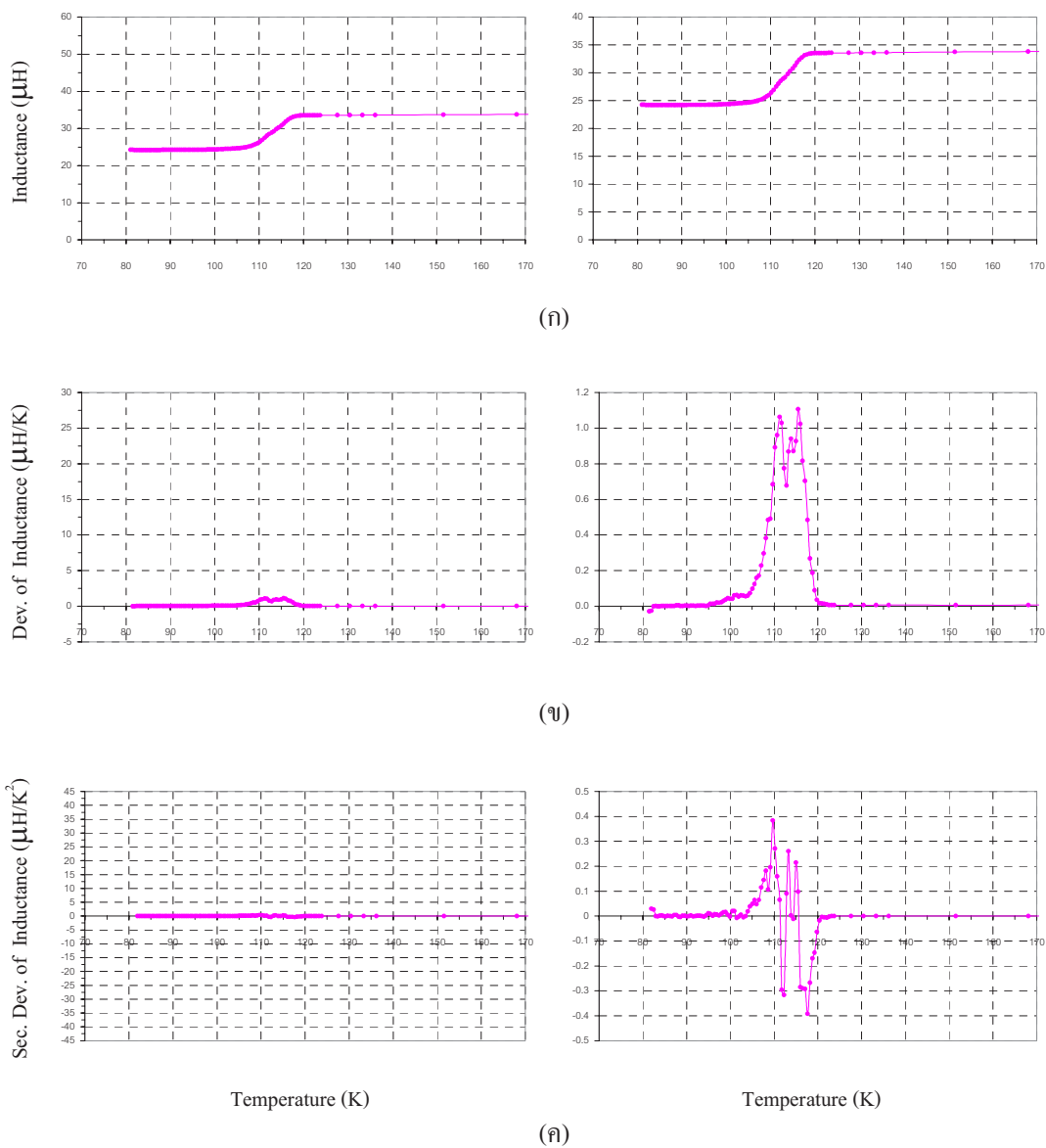
(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



รูป 4.23 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

- (ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร
- (ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร
- (ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

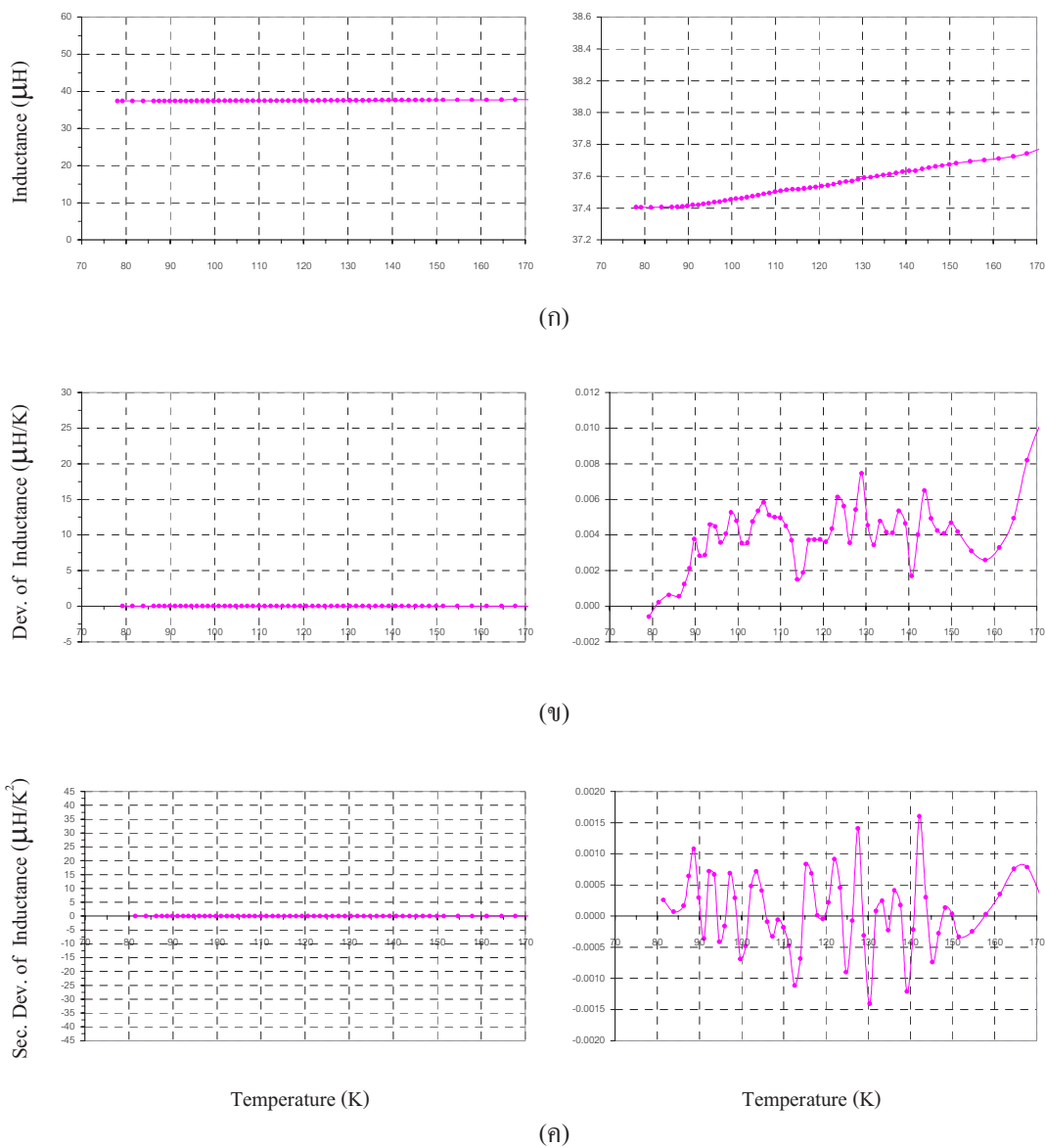


รูป 4.24 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมดุลงของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร



รูป 4.25 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิของสาร

จากผลการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่าง สารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของ สาร ดังกราฟรูป 4.15 – 4.25 พบว่า ค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความ เหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 13, 15 รองลงมา ก่อนข้างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 6, 10, 14, 18 และไม่ชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 9, 19 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงประมาณ 77 - 170 K จากนั้นทำการ วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ การเพิ่มขึ้น ของความเหนี่ยวนำ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด และตัวแปรอสมมาตร ได้ผลการวิเคราะห์ ข้อมูลดังตาราง 4.8 – 4.9 ดังนี้

ตาราง 4.8 แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

สารเม็ดที่	อุณหภูมิวิกฤต (K)				ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ (K)		
	$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{inflect})}$	$T_{c(\text{mid})}$	$T_{c(\text{zero})}$	$\Delta\bar{T}$	ΔT	ΔT_{pp}
3	118.448	113.906	113.420	106.054	2.378	1.619	0.532
5	124.832	111.260	112.837	103.517	34.432	9.686	17.536
6	116.556	112.606	110.667	102.196	10.869	8.694	7.923
8	123.663	112.262	114.330	108.617	7.557	7.234	1.530
9	126.457	123.081	118.405	100.957	11.595	5.560	2.216
10	115.991	112.818	111.863	103.466	5.896	4.517	2.626
13	127.331	126.176	126.024	113.933	1.511	0.914	0.815
14	131.290	128.151	125.990	113.880	6.952	5.218	0.851
15	115.777	113.880	113.259	104.769	2.372	1.750	0.479
18	119.809	115.509	113.086	104.513	9.109	8.464	7.976
19	-	-	-	-	-	-	-

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.8 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ พบว่า อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{inflect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง และยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ กับ $T_{c(\text{mid})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 9, 14, 18 มีค่าแตกต่างกันมาก คือ -2.068, 4.676, 2.161, 2.423 K รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6 มีค่าแตกต่างกันปานกลาง คือ -1.577, 1.939 K และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 10, 13, 15 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ 0.486, 0.955, 0.152, 0.621 K ทำให้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างดังกล่าวมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ นั่นคือ การเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างแต่ละเม็ดมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร นั่นเอง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้กราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่สมมาตรและเข้าใกล้สมมาตร กราฟอนุพันธ์อันดับสองไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน ส่วนเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ไม่สามารถหาอุณหภูมิวิกฤตได้ เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ พบว่า ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($\Delta\bar{T}$), ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะครึ่งพิค (ΔT) และความกว้างในการเปลี่ยนสถานะพิคถึงพิค (ΔT_{pp}) ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 8, 9, 18 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 14 มีค่าปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 13, 15 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากมีปริมาณและสัดส่วนของสารเจือปนชนิดต่าง ๆ ในแต่ละเม็ดสารตัวอย่างไม่เท่ากัน นั่นคือ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 8, 9, 18 เม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 14 และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 13, 15 มีปริมาณสารเจือปนมาก ปานกลางและน้อย ตามลำดับ ส่วนเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ไม่สามารถหาความกว้างในการเปลี่ยนสถานะได้ เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

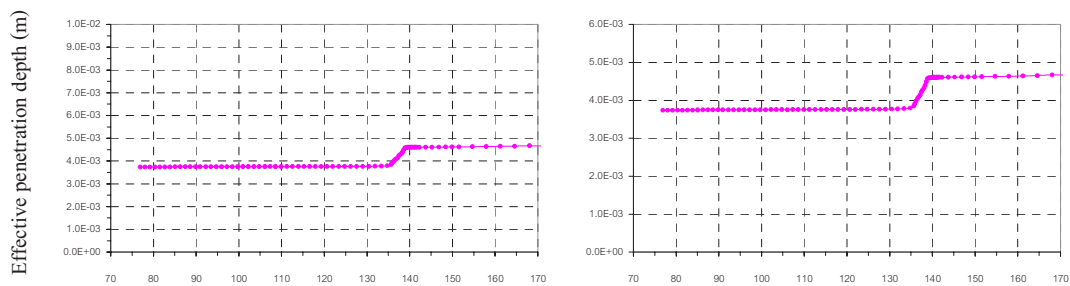
ตาราง 4.9 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียว ϵ_L ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด $L'_{\max}$ และตัวแปร
 อสมมาตร $(A-B)/(A+B)$ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$

สารเม็ดที่	ϵ_L	$L'_{\max}$ ($\mu H/K$)	$(A-B)/(A+B)$
3	0.11	2.555	-0.102883
5	0.01	0.023	0.078767
6	0.07	0.304	-0.354103
8	0.53	2.364	0.212461
9	0.03	0.133	-0.217888
10	0.19	1.486	-0.147409
13	3.20	21.906	-0.045341
14	0.14	0.990	-0.051180
15	0.51	5.242	-0.016573
18	0.36	1.107	-0.011541
19	-	-	-

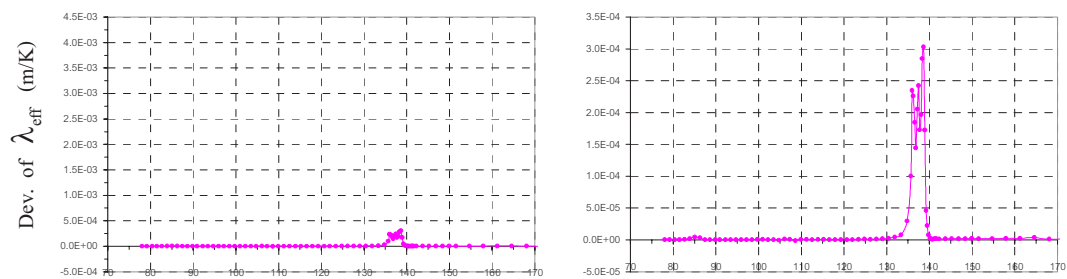
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.9 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน
 แผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ พบว่า ค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียวของ
 เม็ดสารตัวอย่างที่ 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 14, 15, 18 มีค่า
 ปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9 มีค่าน้อยมาก ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของ
 เม็ดสารตัวอย่างที่ 13, 15 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 18 มีค่าปานกลาง
 และเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 14 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากการมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของเนื้อสาร
 ตัวนำยวดยิ่งในเม็ดสารตัวอย่างที่แตกต่างกัน นั่นเอง นอกจากนี้ ตัวแปรอสมมาตรของแต่ละ
 เม็ดสารตัวอย่างมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของกราฟอนุพันธ์อันดับสอง และ
 เม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ไม่สามารถหาค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนียว ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด
 และตัวแปรอสมมาตรได้ เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ตามอุณหภูมิ

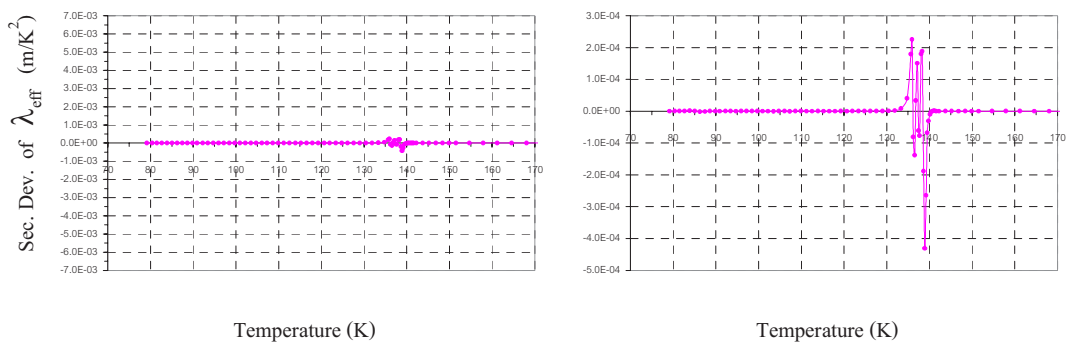
ในการหาค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ การหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิ จากค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO กระทำในช่วงอุณหภูมิประมาณ 77 K ไปจนถึงอุณหภูมิห้อง ได้ดังกราฟรูป 4.26 – 4.31 , 4.32 – 4.39 และ 4.40 – 4.50 ซึ่งแสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิ เพียงบางส่วนในช่วงอุณหภูมิประมาณ 77 - 170 K เมื่อ ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลระยะเจาะลึกยังผลได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 4.10 – 4.11 , 4.12 – 4.13 และ 4.14 – 4.15 เมื่อ ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)



(ค)

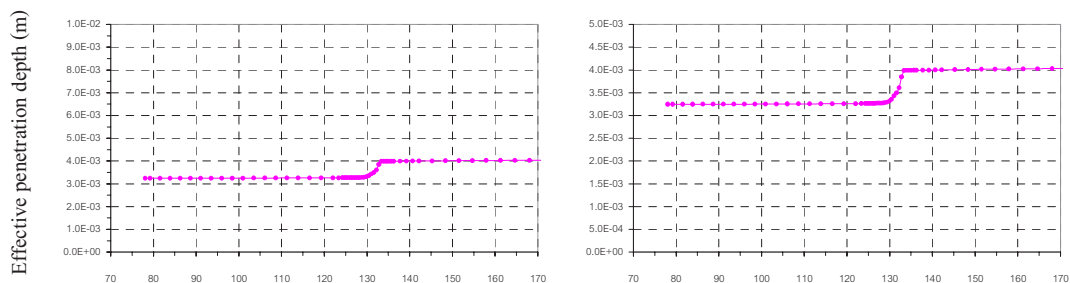
รูป 4.26 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

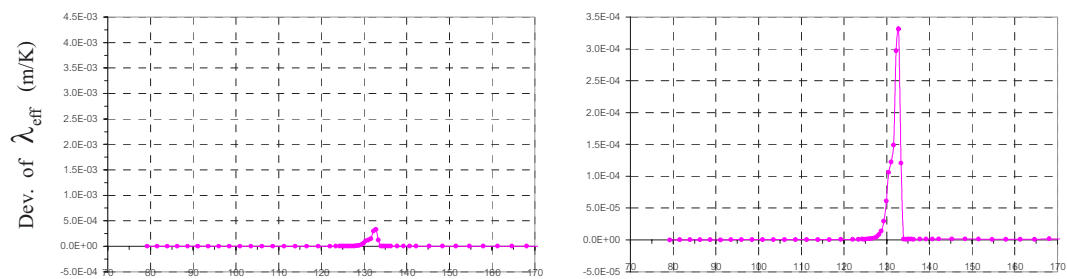
(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

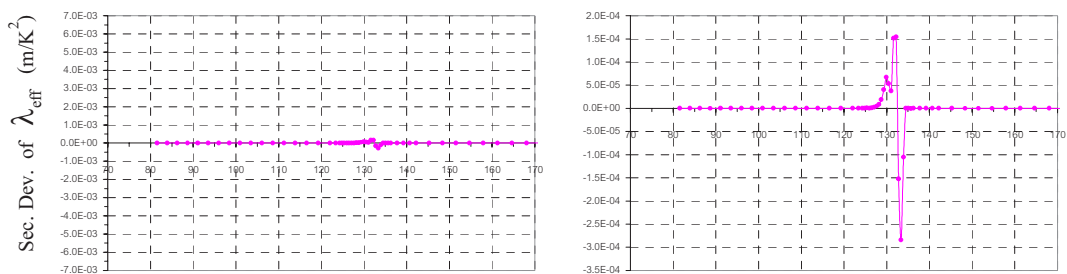
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



Temperature (K)

Temperature (K)

(ค)

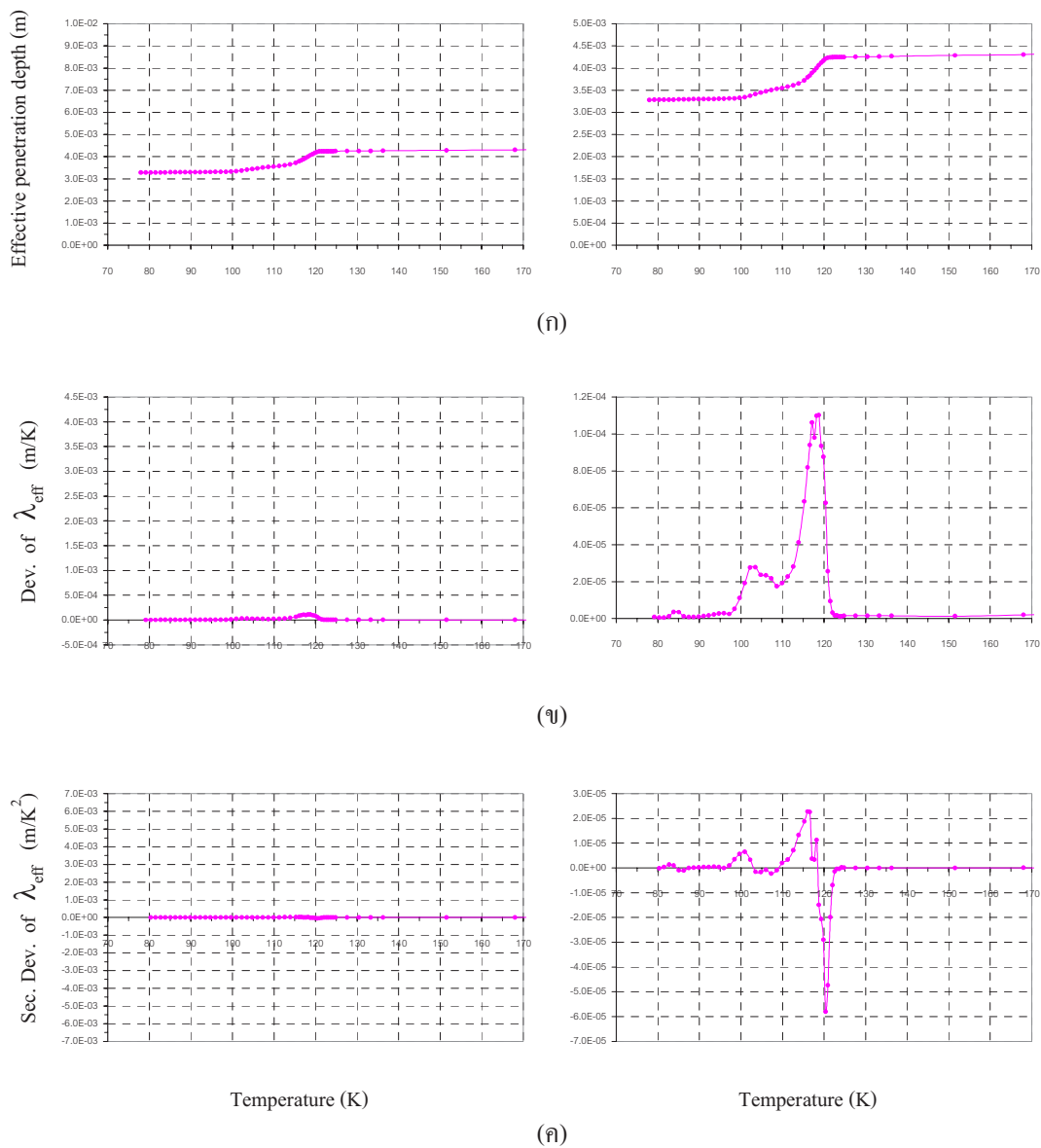
รูป 4.27 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



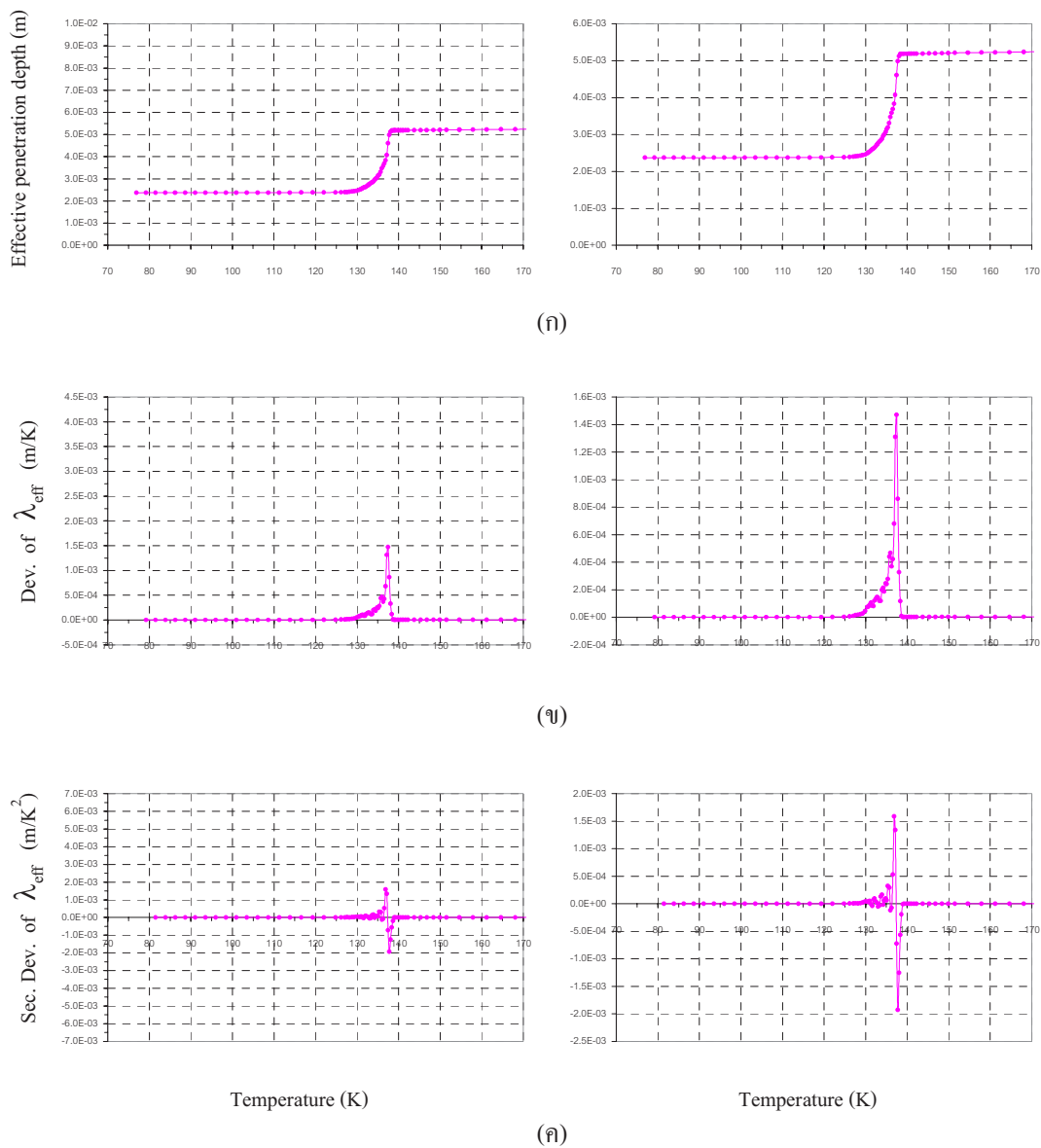
รูป 4.28 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



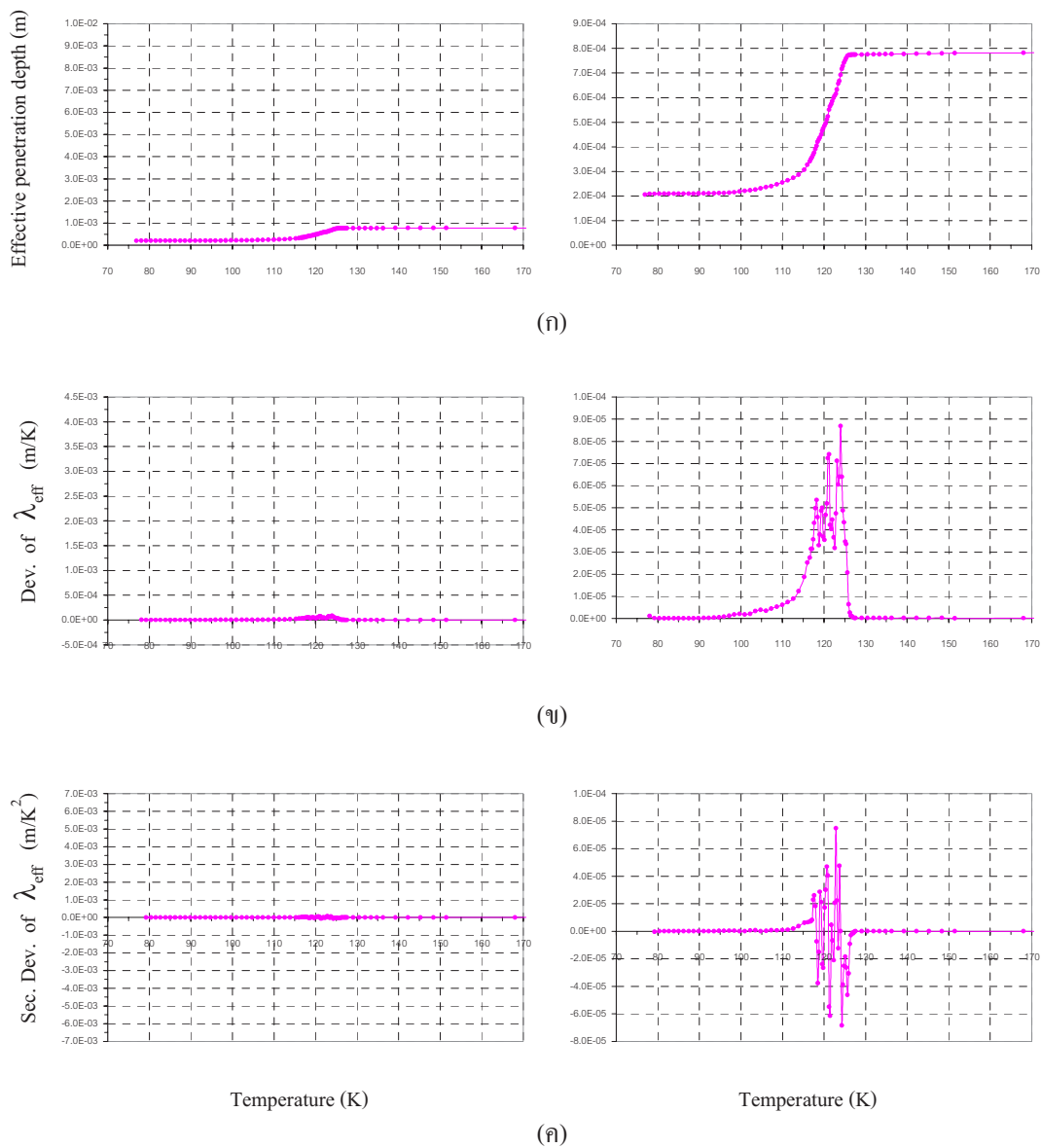
รูป 4.29 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

ไม่เจอ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



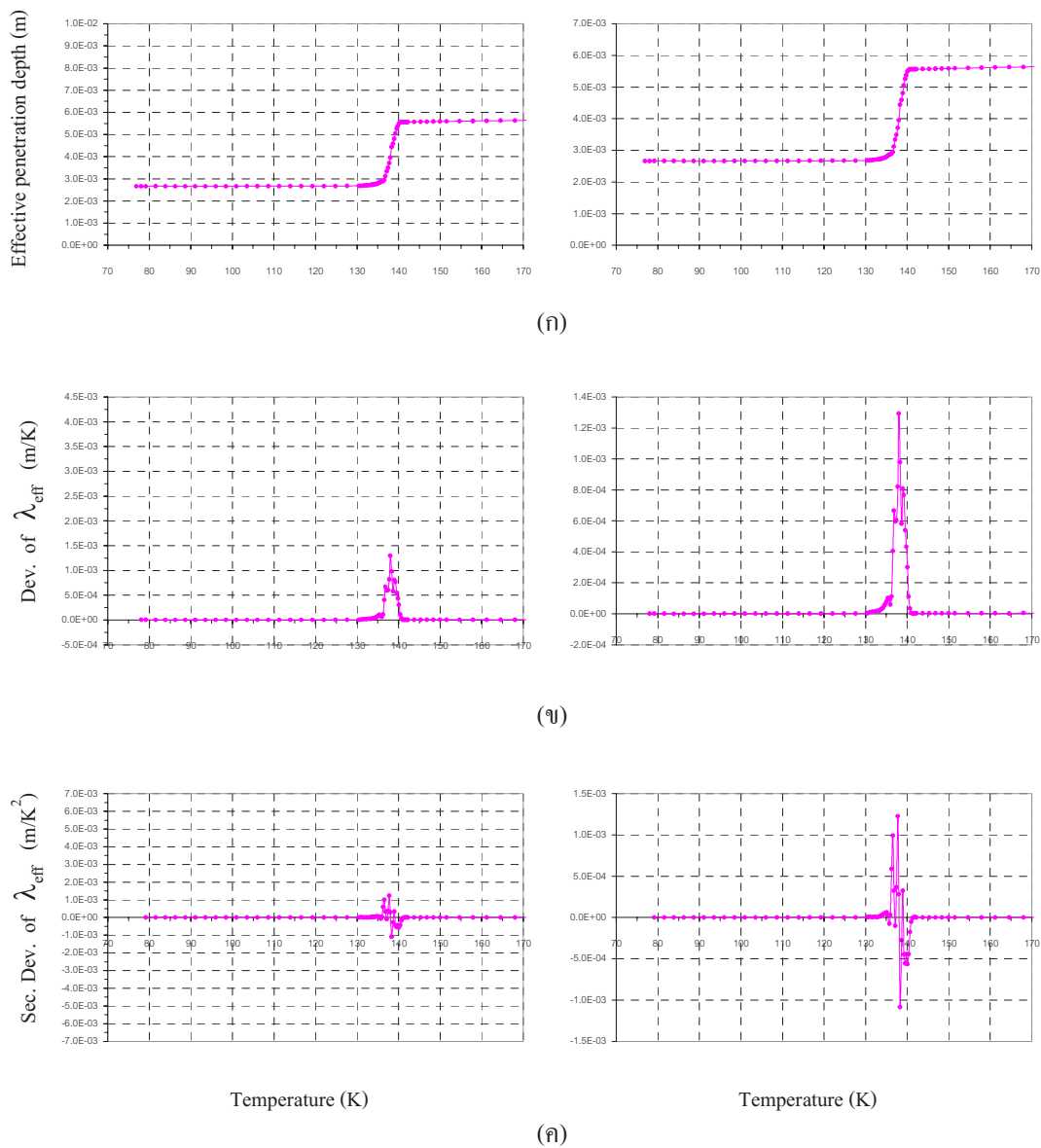
รูป 4.30 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO

ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



รูป 4.31 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

จากการหาค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร ดังกราฟรูป 4.26 – 4.31 พบว่า ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 14 ร่องลงมา ก่อนข้างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 13 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงประมาณ 77 - 170 K จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ การเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดและตัวแปรอสมมาตร ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 4.10 – 4.11 ดังนี้

ตาราง 4.10 แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ

สารเม็ดที่	อุณหภูมิวิกฤต (K)				ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ (K)		
	$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{inflect})}$	$T_{c(\text{mid})}$	$T_{c(\text{zero})}$	$\Delta\bar{T}$	ΔT	ΔT_{pp}
5	139.492	138.627	137.336	131.894	3.776	3.200	2.987
6	133.369	132.789	132.264	127.077	3.240	1.571	1.158
9	121.508	118.774	115.917	98.447	12.453	5.741	4.311
10	138.360	137.470	136.794	127.613	2.040	0.933	0.887
13	125.643	123.997	120.305	97.177	7.150	7.129	1.416
14	140.390	138.004	138.113	131.031	2.565	2.596	0.564

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.10 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ พบว่า อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{inflect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง และยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ กับ $T_{c(\text{mid})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9, 13 มีค่าแตกต่างกันมาก คือ 2.857, 3.692 K ร่องลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 มีค่าแตกต่างกันปานกลาง คือ 1.291 K และเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 10, 14 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ 0.525, 0.676, -0.109 K ทำให้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างดังกล่าวมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ นั่นคือ การเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างแต่ละเม็ดมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร นั่นเอง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้กราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่สมมาตร

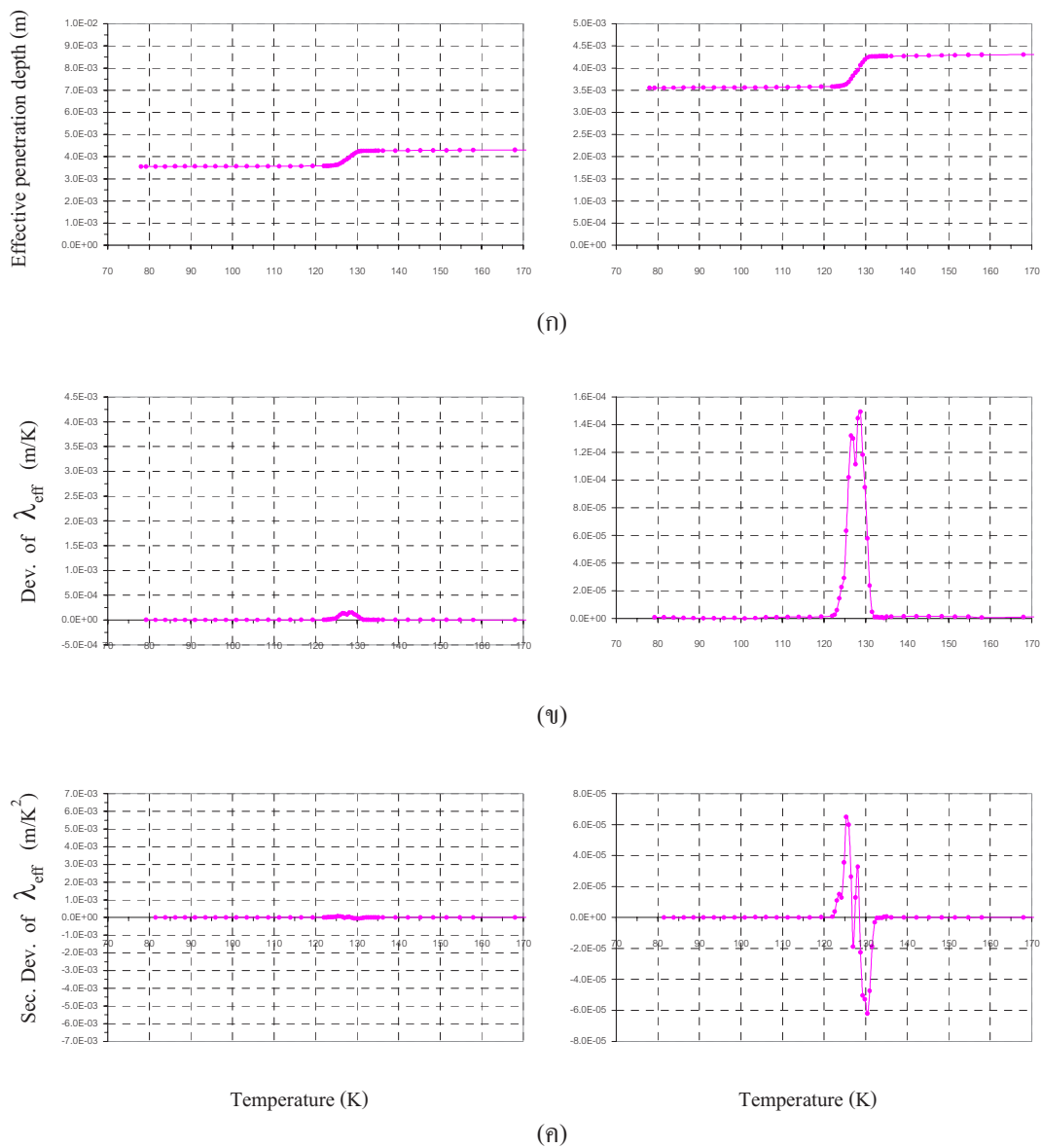
และเข้าใกล้สมมาตร กราฟอนุพันธ์อันดับสองไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน

ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ พบว่า ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($\Delta\bar{T}$), ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะครึ่งพิค (ΔT) และความกว้างในการเปลี่ยนสถานะพิคถึงพิค (ΔT_{pp}) ของเม็คสารตัวอย่างที่ 9, 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็คสารตัวอย่างที่ 5, 6, 10, 14 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากมีปริมาณและสัดส่วนของสารเจือปนชนิดต่าง ๆ ในแต่ละเม็คสารตัวอย่างไม่เท่ากัน นั่นคือ เม็คสารตัวอย่างที่ 9, 13 และ 5, 6, 10, 14 มีปริมาณสารเจือปนมากและน้อย ตามลำดับ

ตาราง 4.11 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ϵ_λ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด $\lambda'_{\max}$ และตัวแปรอสมมาตร $(A-B)/(A+B)$ ของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

สารเม็คที่	ϵ_λ	$\lambda'_{\max}$ (m/K)	$(A-B)/(A+B)$
5	0.22	0.000303	-0.313196
6	0.22	0.000331	-0.297071
9	0.28	0.000110	-0.437119
10	1.15	0.001471	-0.098100
13	2.60	0.000087	0.044825
14	1.06	0.001293	0.059972

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.11 สำหรับเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ พบว่า ค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็คสารตัวอย่างที่ 10, 14 มีค่าปานกลาง และเม็คสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9 มีค่าน้อย ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็คสารตัวอย่างที่ 10, 14 มีค่ามาก รองลงมา เม็คสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9 มีค่าปานกลาง และเม็คสารตัวอย่างที่ 13 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากการมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งในเม็คสารตัวอย่างที่แตกต่างกัน นั่นเอง นอกจากนี้ ตัวแปรอสมมาตรของแต่ละเม็คสารตัวอย่างมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของกราฟอนุพันธ์อันดับสอง



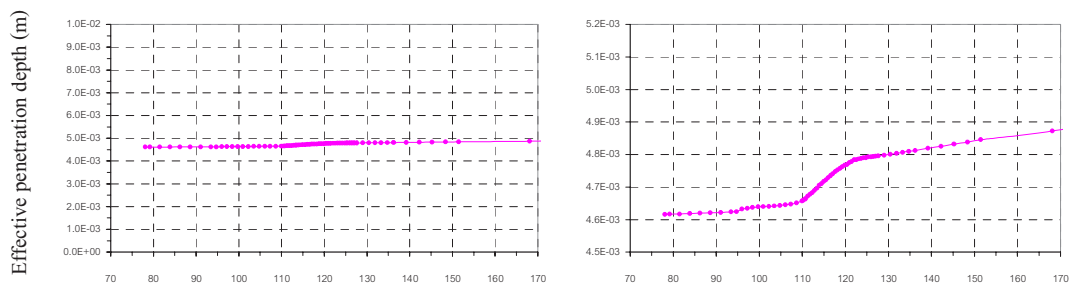
รูป 4.32 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

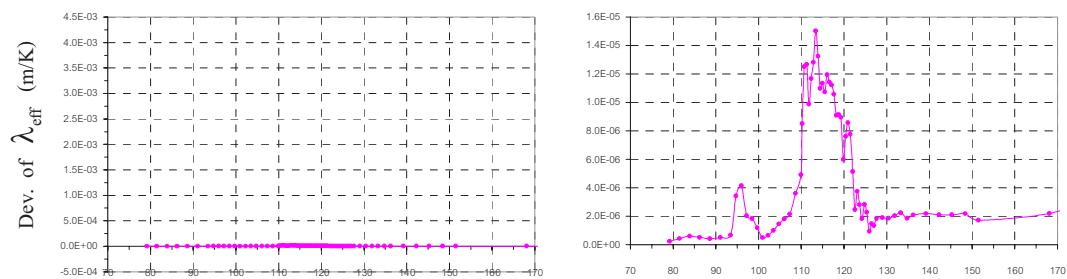
(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

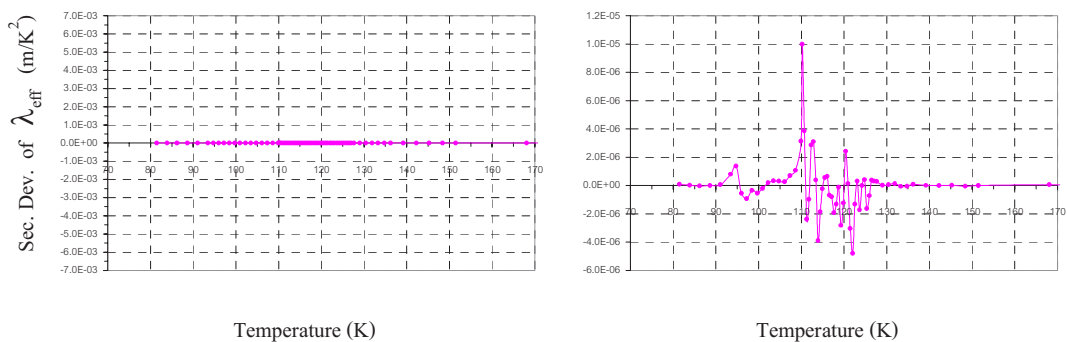
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



(ค)

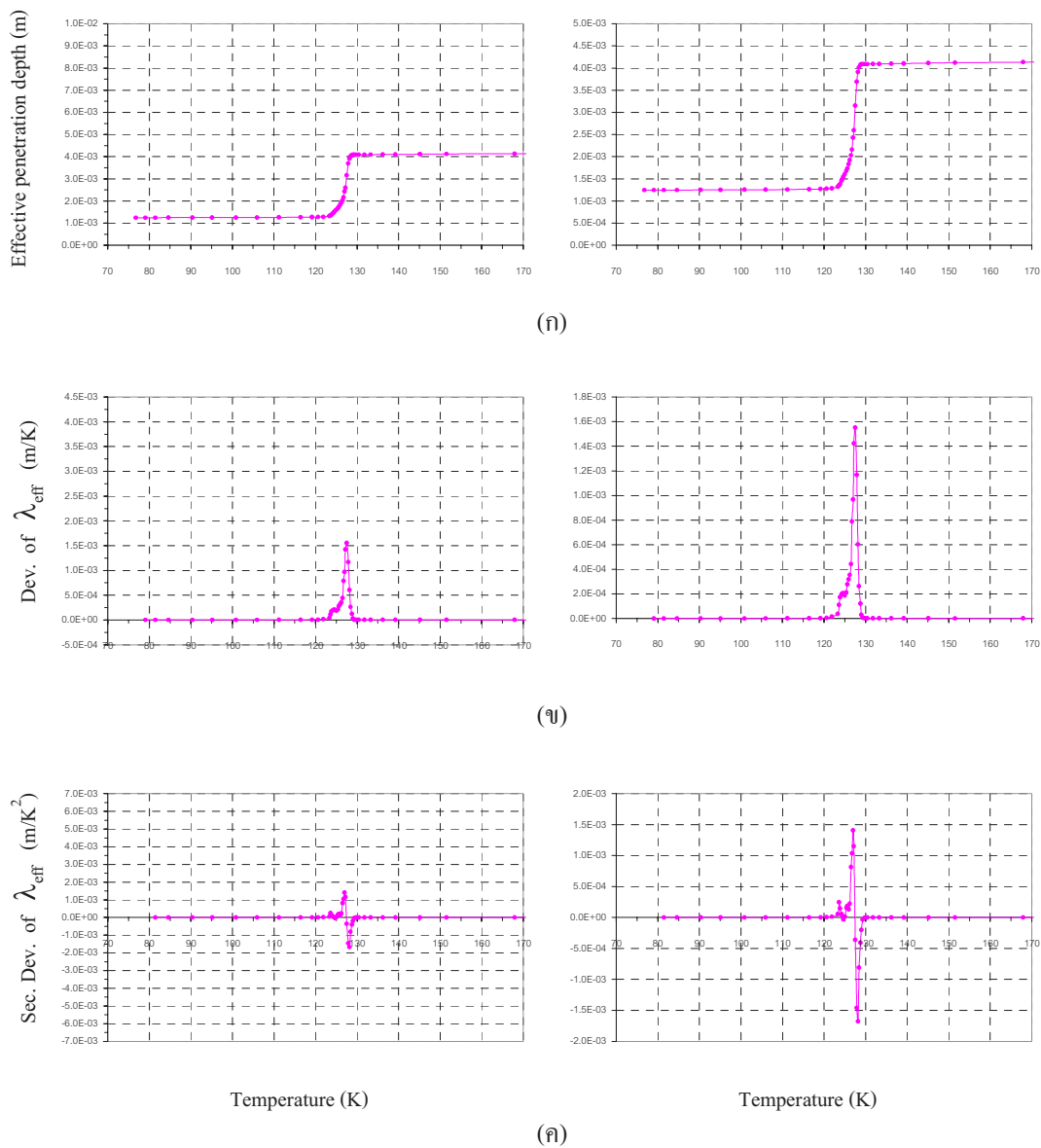
รูป 4.33 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



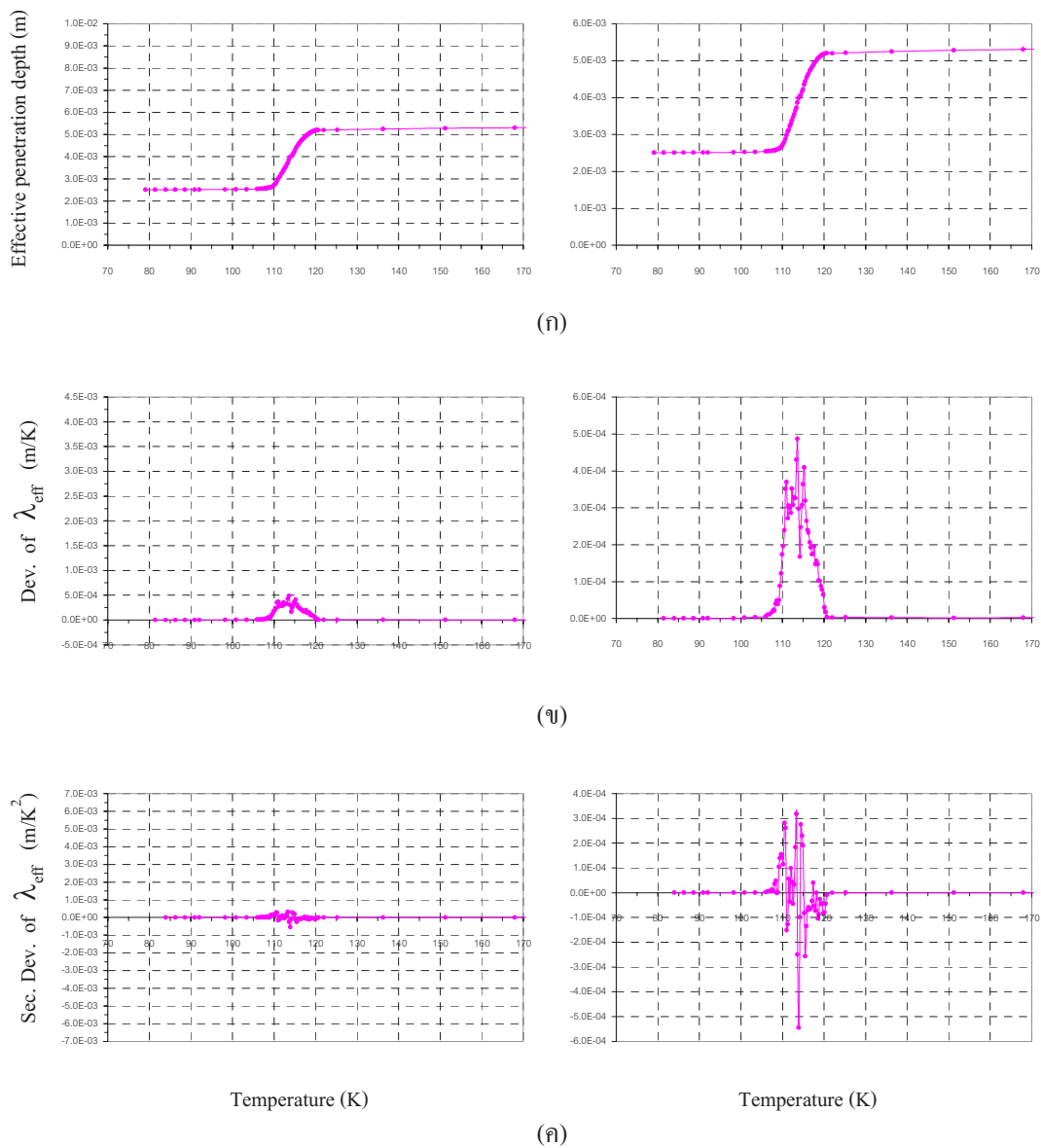
รูป 4.34 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



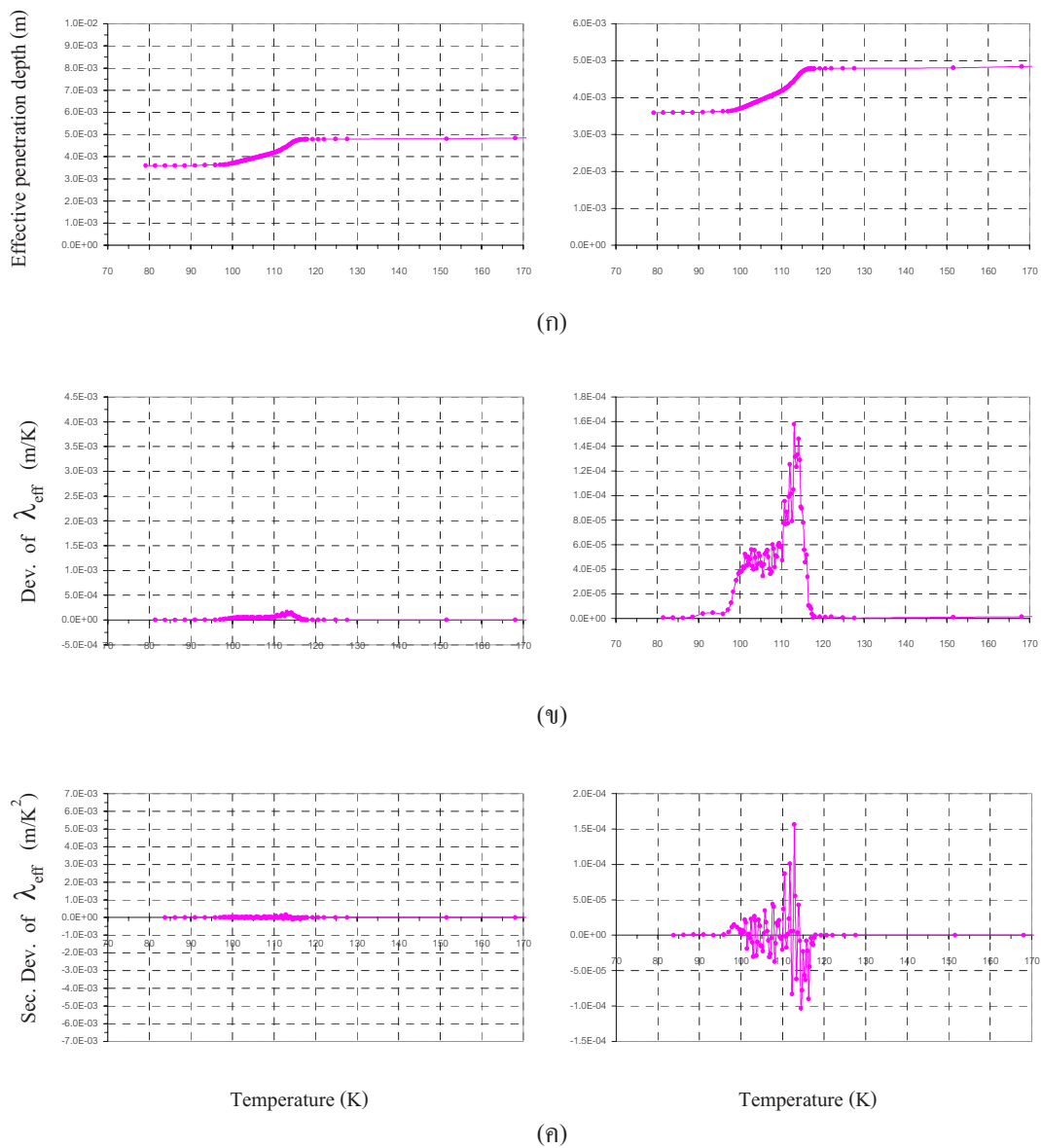
รูป 4.35 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



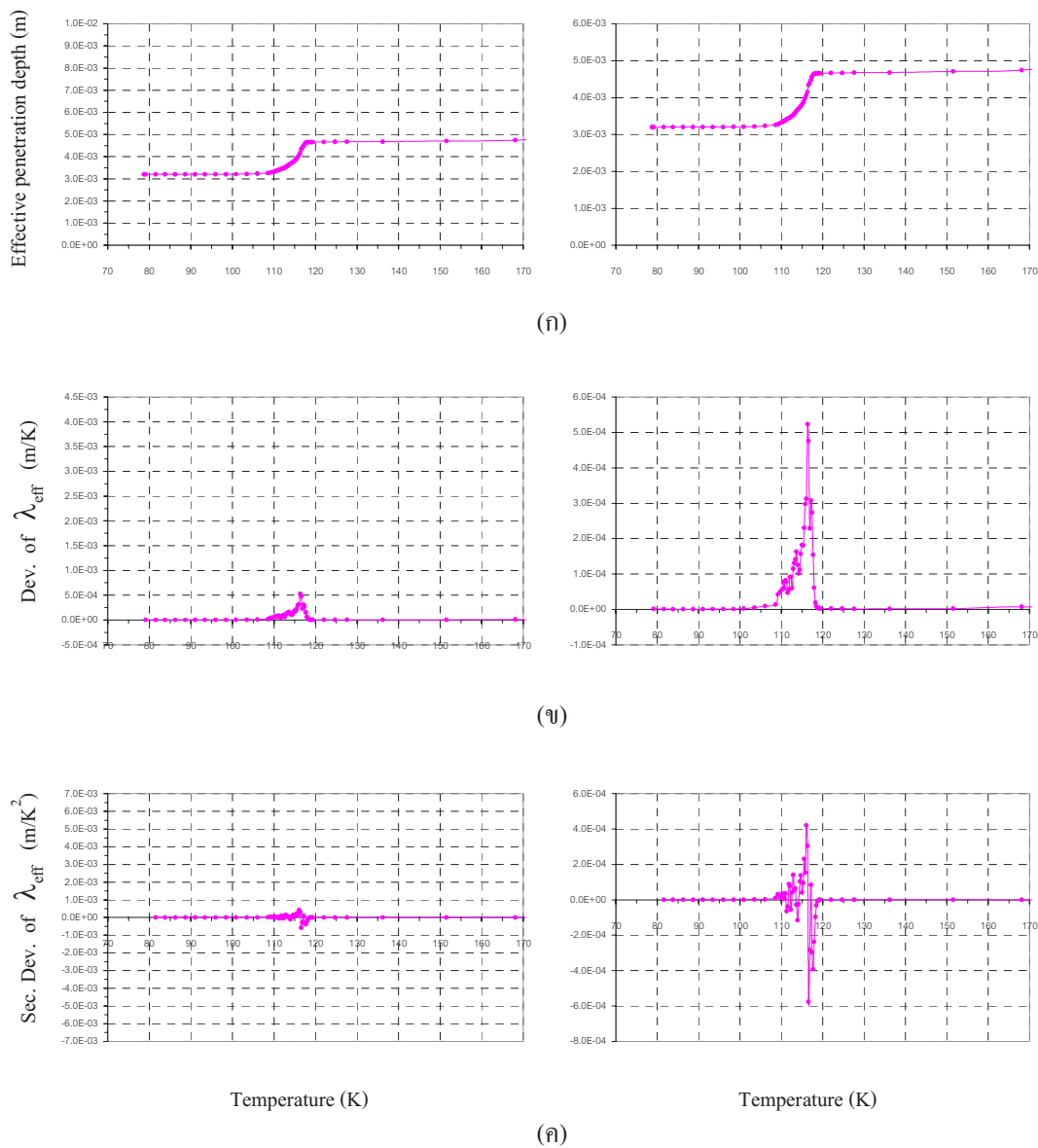
รูป 4.36 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



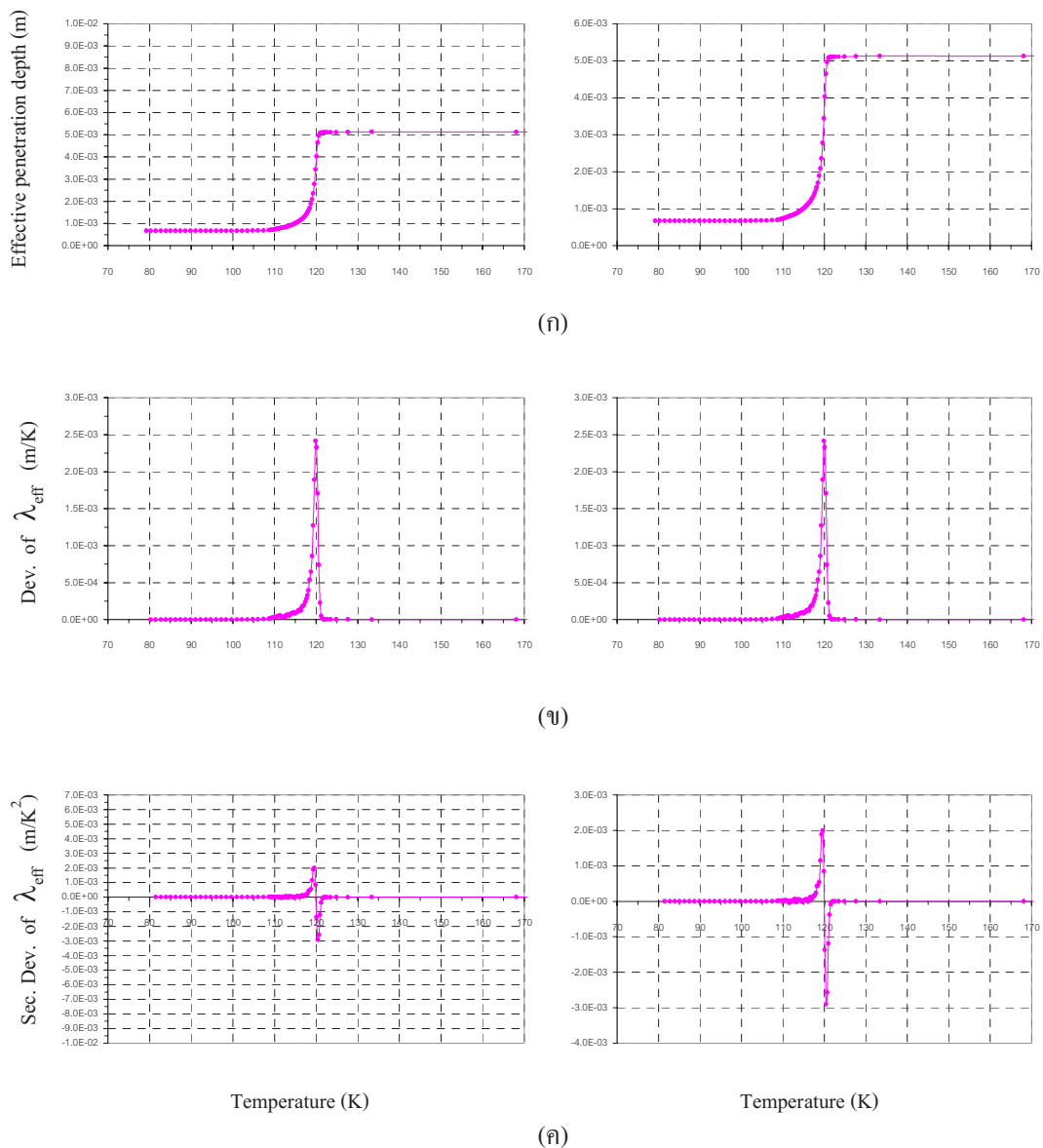
รูป 4.37 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



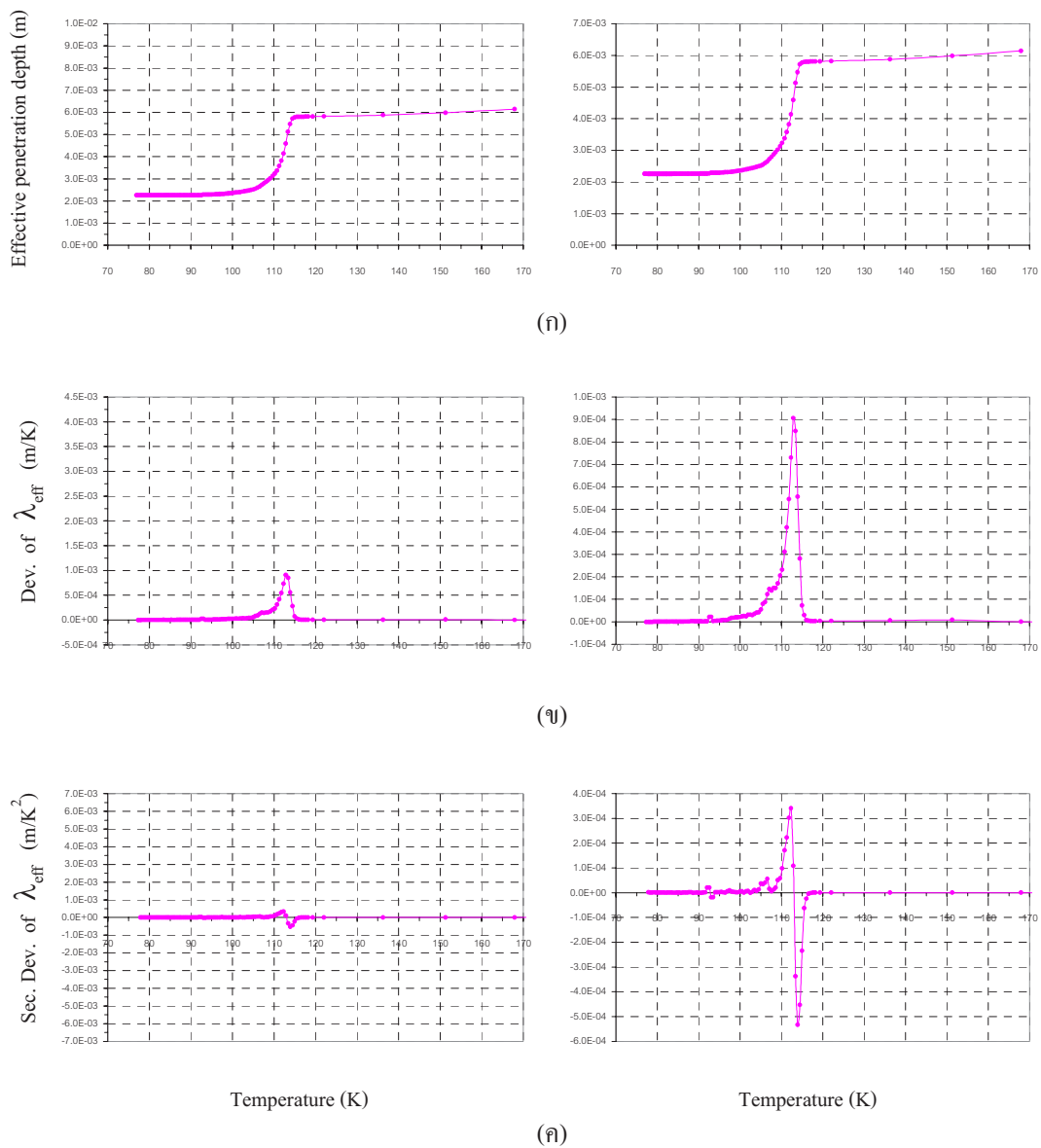
รูป 4.38 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



รูป 4.39 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุขของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

จากการหาค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร ดังกราฟรูป 4.32 – 4.39 พบว่าค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 8, 13, 14 ร่องลงมา ค่อนข้างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 9, 10 และไม่ชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงประมาณ 77 - 170 K จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ การเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดและตัวแปรอสมมาตร ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 4.12 – 4.13 ดังนี้

ตาราง 4.12 แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

สารเม็ดที่	อุณหภูมิวิกฤต (K)				ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ (K)		
	$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{inflect})}$	$T_{c(\text{mid})}$	$T_{c(\text{zero})}$	$\Delta\bar{T}$	ΔT	ΔT_{pp}
3	131.002	128.775	127.852	123.109	6.015	4.647	5.094
5	122.058	113.401	114.993	108.643	26.554	11.372	11.849
6	128.434	127.528	127.223	121.893	1.880	1.362	1.159
8	120.410	113.614	113.637	106.466	5.895	5.503	0.532
9	117.149	113.083	110.531	97.077	8.596	4.723	1.569
10	118.231	116.314	115.602	103.466	3.354	1.775	0.538
13	120.958	119.863	119.635	108.643	1.928	1.271	0.792
14	114.973	112.871	112.159	97.475	4.118	2.690	1.591

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.12 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ พบว่า อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{inflect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง และยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ กับ $T_{c(\text{mid})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 มีค่าแตกต่างกันมาก คือ 2.552 K ร่องลงมาเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 มีค่าแตกต่างกันปานกลาง คือ -1.592 K และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 6, 8, 10, 13, 14 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ 0.923, 0.305, -0.023, 0.712, 0.228, 0.712 K ทำให้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวนำไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างดังกล่าวมีความ

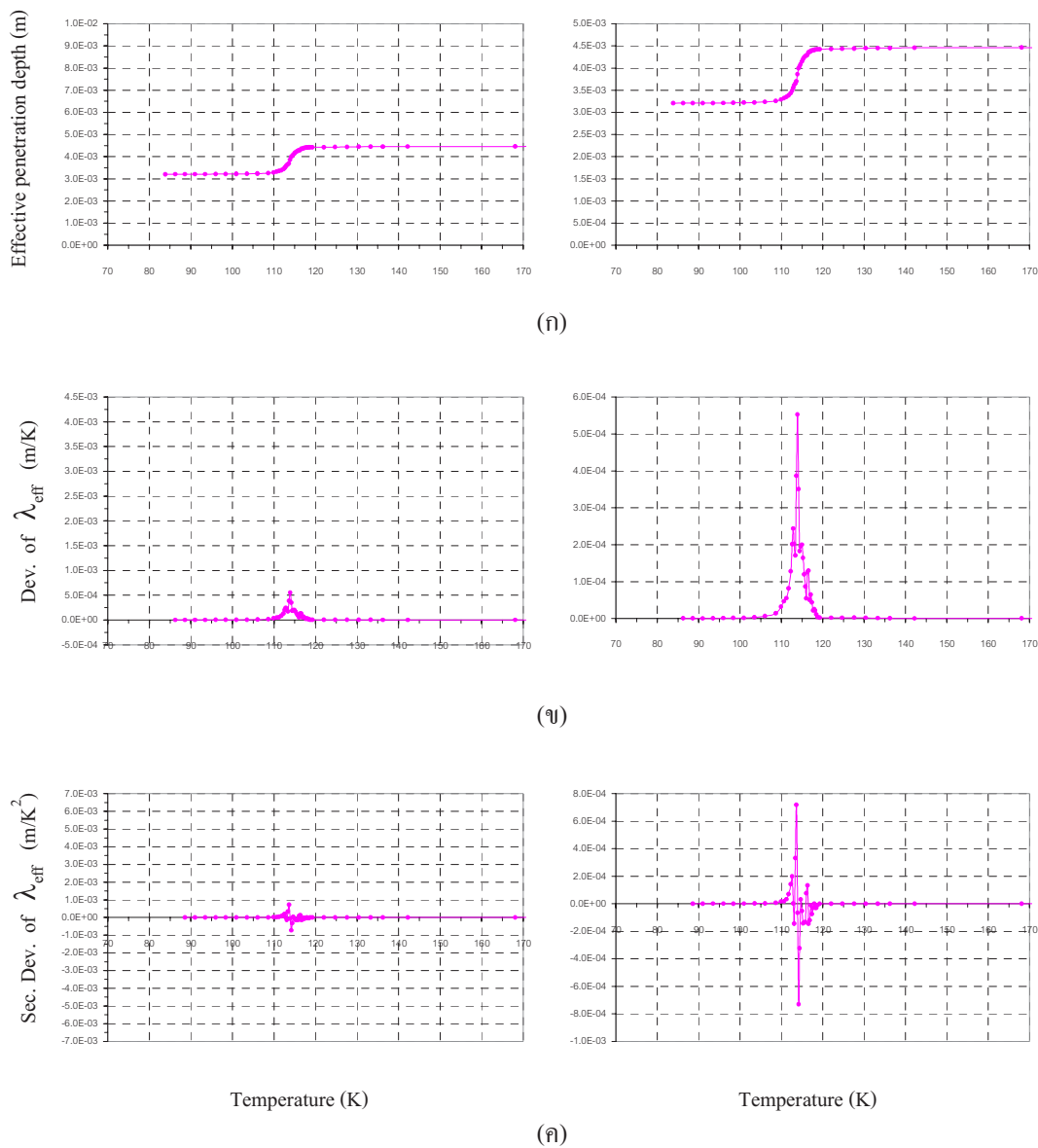
ไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ นั่นคือ การเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างแต่ละเม็ดมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร นั่นเอง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้กราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่สมมาตรและเข้าใกล้สมมาตร กราฟอนุพันธ์อันดับสองไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน

ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ พบว่า ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($\Delta\bar{T}$), ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะครึ่งพิค (ΔT) และความกว้างในการเปลี่ยนสถานะพิคถึงพิค (ΔT_{pp}) ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 9 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 14 มีค่าปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 13 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากมีปริมาณและสัดส่วนของสารเจือปนชนิดต่าง ๆ ในแต่ละเม็ดสารตัวอย่างไม่เท่ากัน นั่นคือ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 9 เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 14 และเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 13 มีปริมาณสารเจือปนมาก ปานกลางและน้อย ตามลำดับ

ตาราง 4.13 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ϵ_λ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด $\lambda'_{\max}$ และตัวแปรอสมมาตร $(A-B)/(A+B)$ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำวยวยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

สารเม็ดที่	ϵ_λ	$\lambda'_{\max}$ (m/K)	$(A-B)/(A+B)$
3	0.19	0.000149	0.022799
5	0.03	0.000015	0.351383
6	2.12	0.001552	-0.088713
8	1.04	0.000487	-0.262456
9	0.32	0.000158	0.203112
10	0.45	0.000523	-0.157287
13	6.23	0.002416	-0.185607
14	1.49	0.000906	-0.220109

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.13 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งใน แผนภาพสมดุขของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ พบว่า ค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 8, 13, 14 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 9, 10 มีค่า ปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 มีค่าน้อยมาก ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 6, 13 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 9, 10, 14 มีค่าปานกลาง และ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากการมีส่วนเชิงปริมาตรของเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งใน เม็ดสารตัวอย่างที่แตกต่างกัน นั่นเอง นอกจากนี้ ตัวแปรอสมมาตรของแต่ละเม็ดสารตัวอย่างมีค่า ไม่เป็นศูนย์ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของกราฟอนุพันธ์อันดับสอง



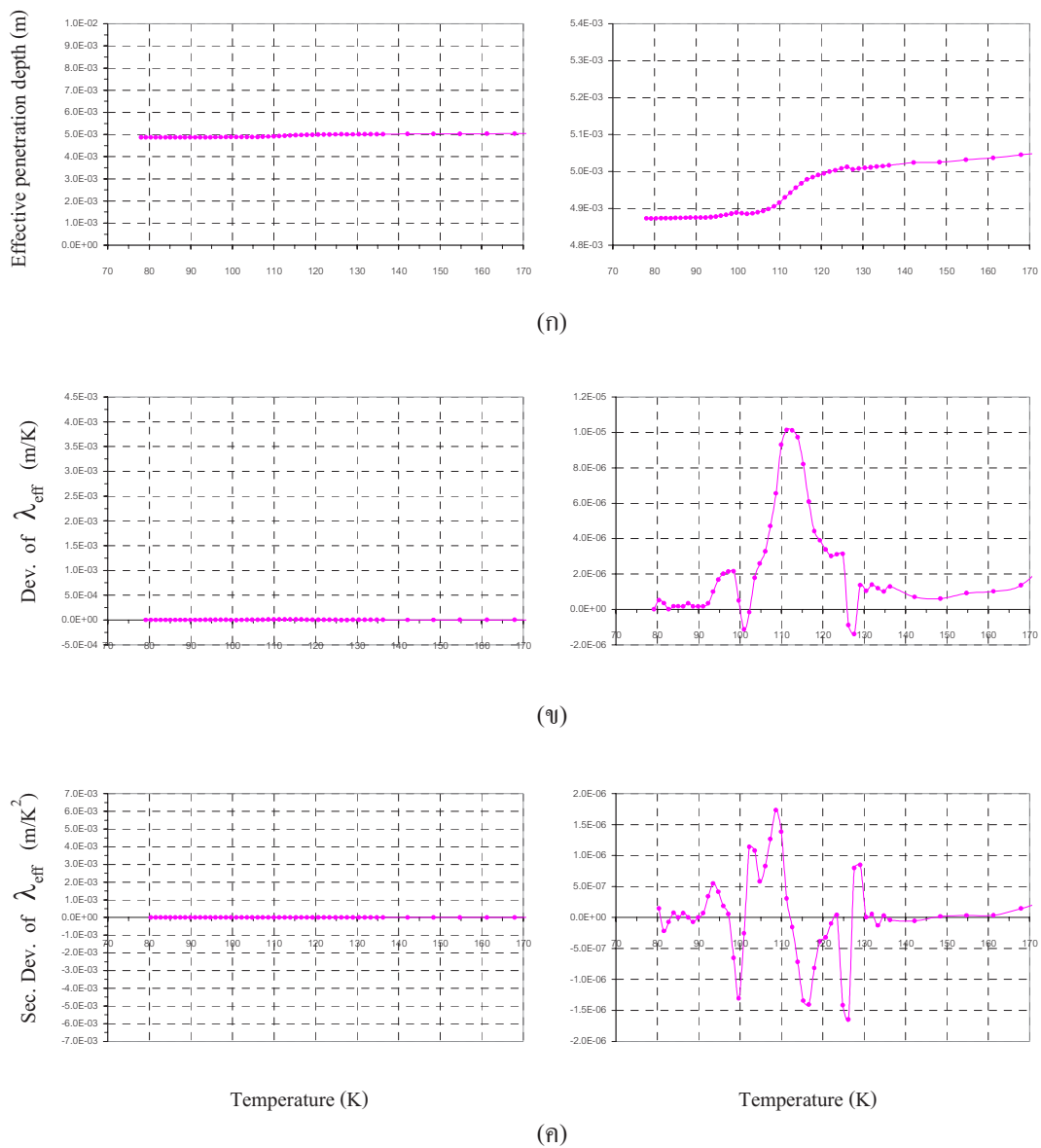
รูป 4.40 แสดงค่าระยะเจาะลึกยิ่งยวดของเม็ดสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยิ่งยวดเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยิ่งยวดเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยิ่งยวดเทียบกับอุณหภูมิของสาร



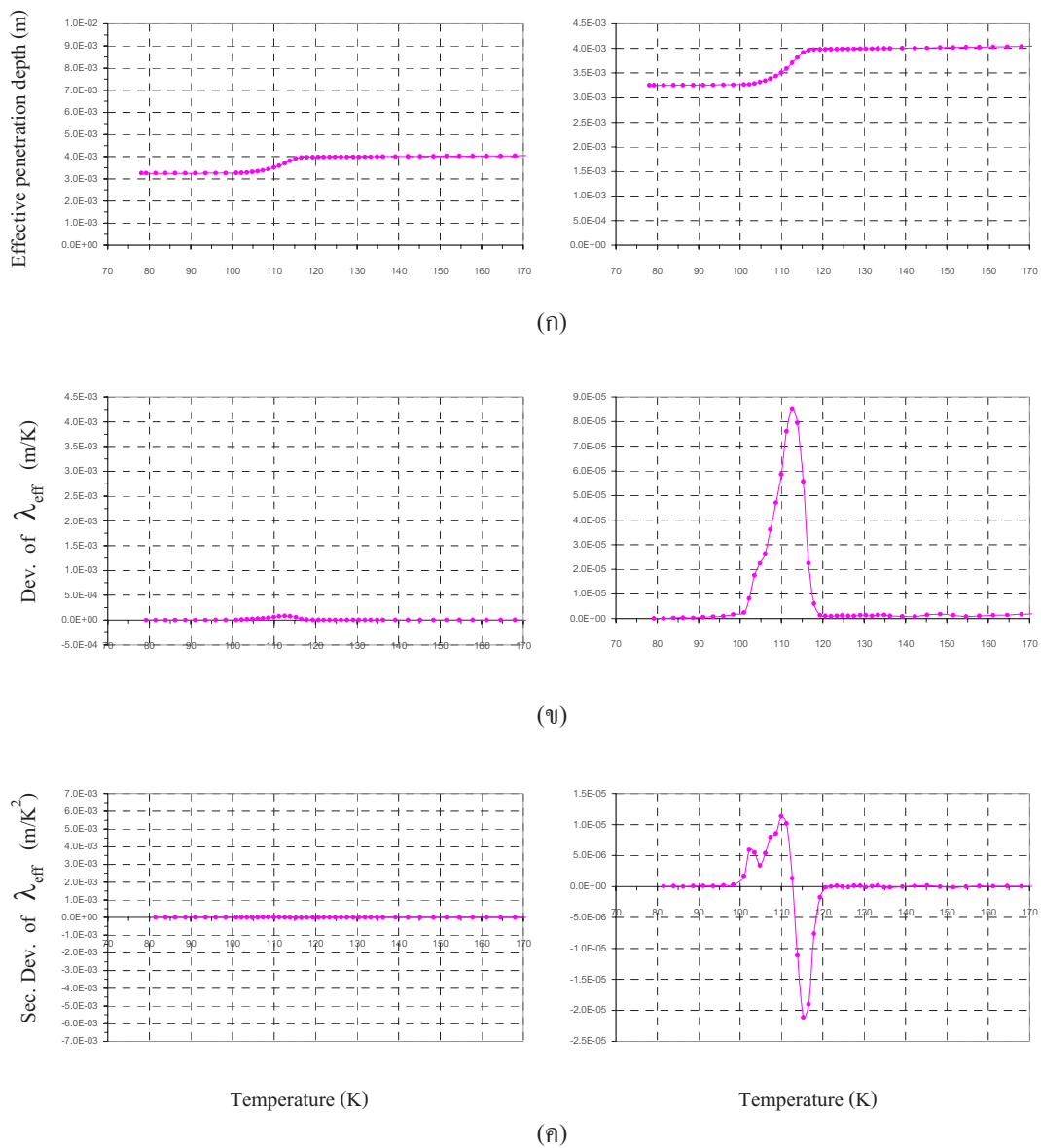
รูป 4.41 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเมื่อดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



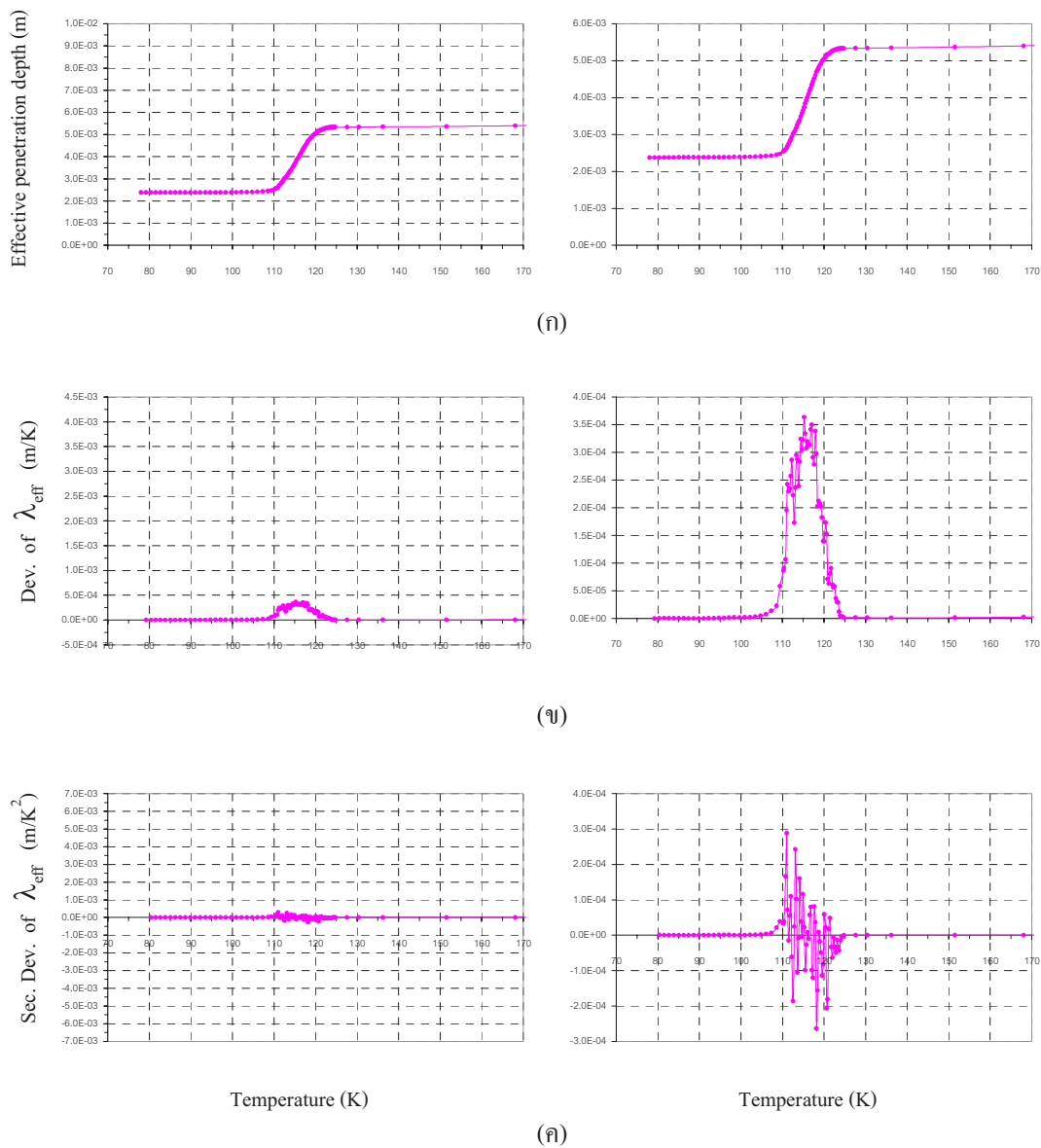
รูป 4.42 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเมื่อดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



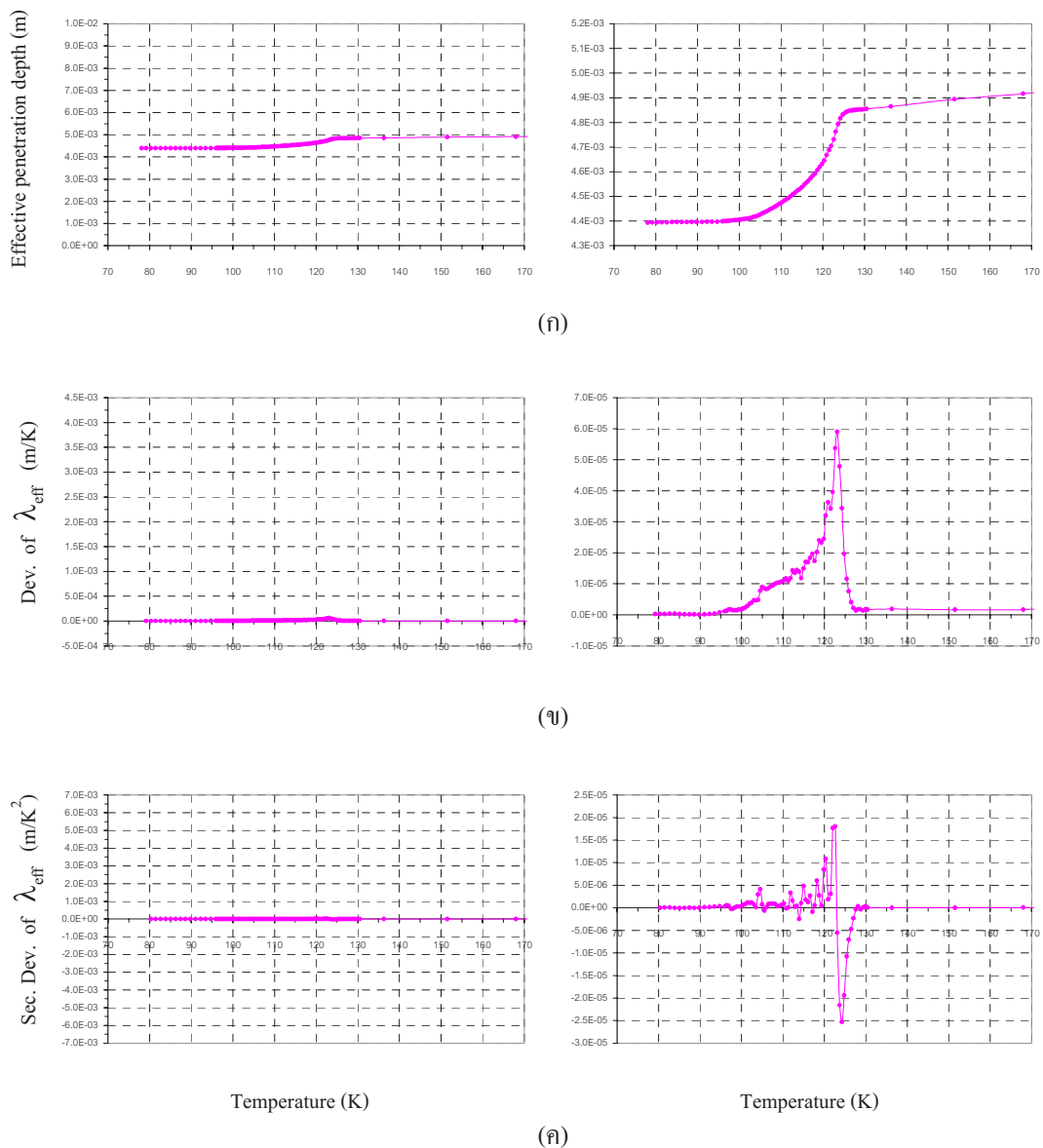
รูป 4.43 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



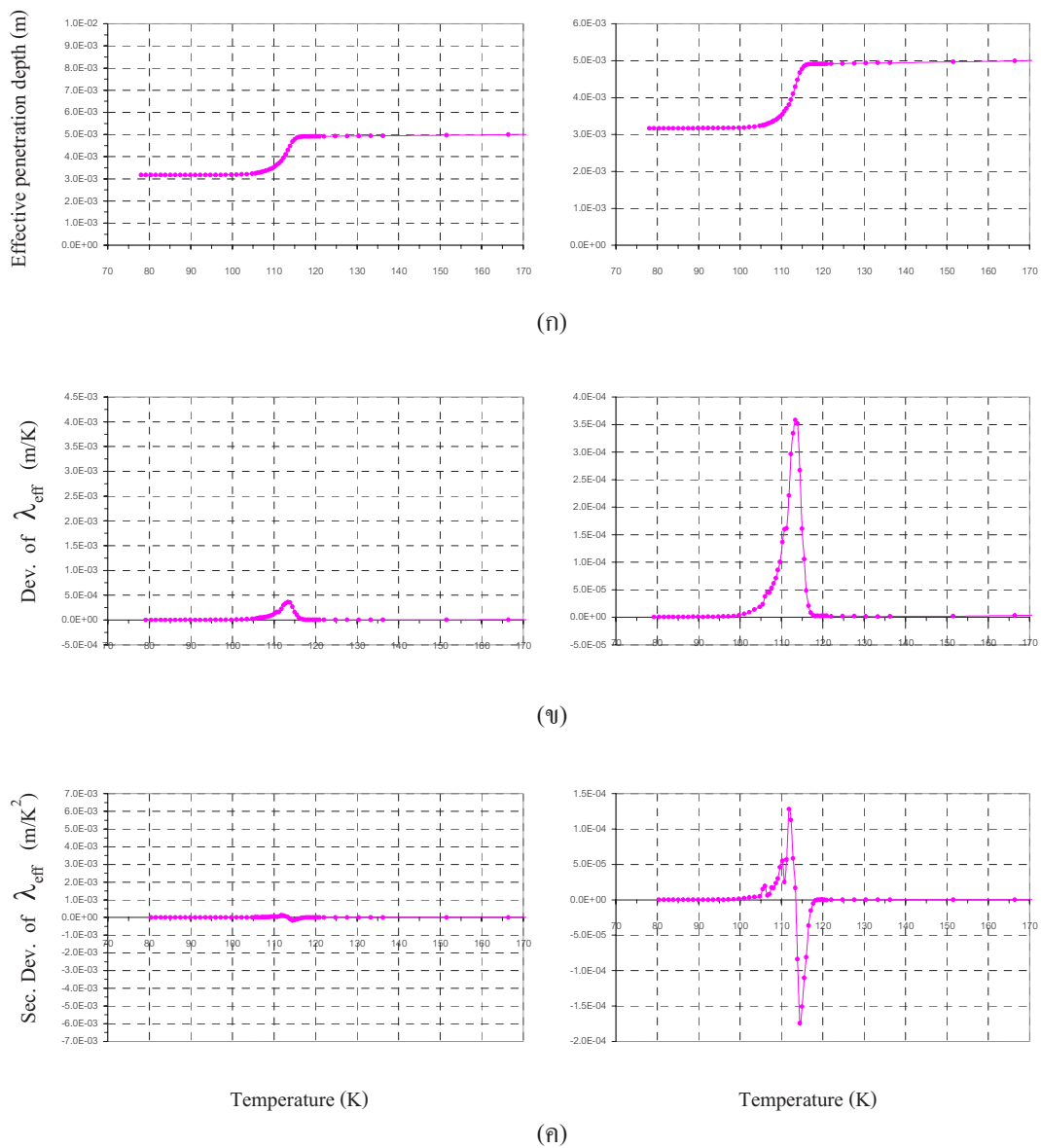
รูป 4.44 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดเงินด้อย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



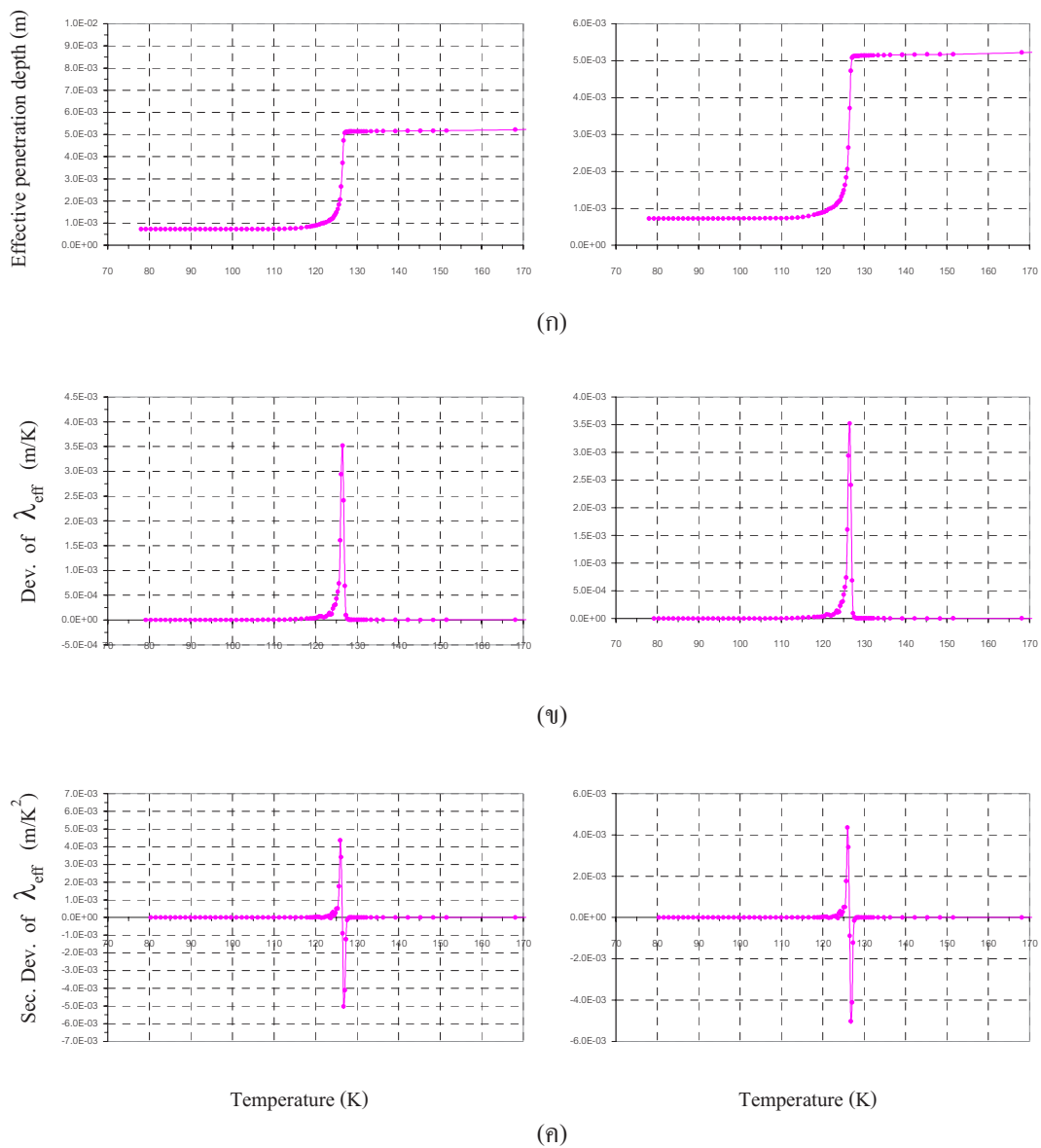
รูป 4.45 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



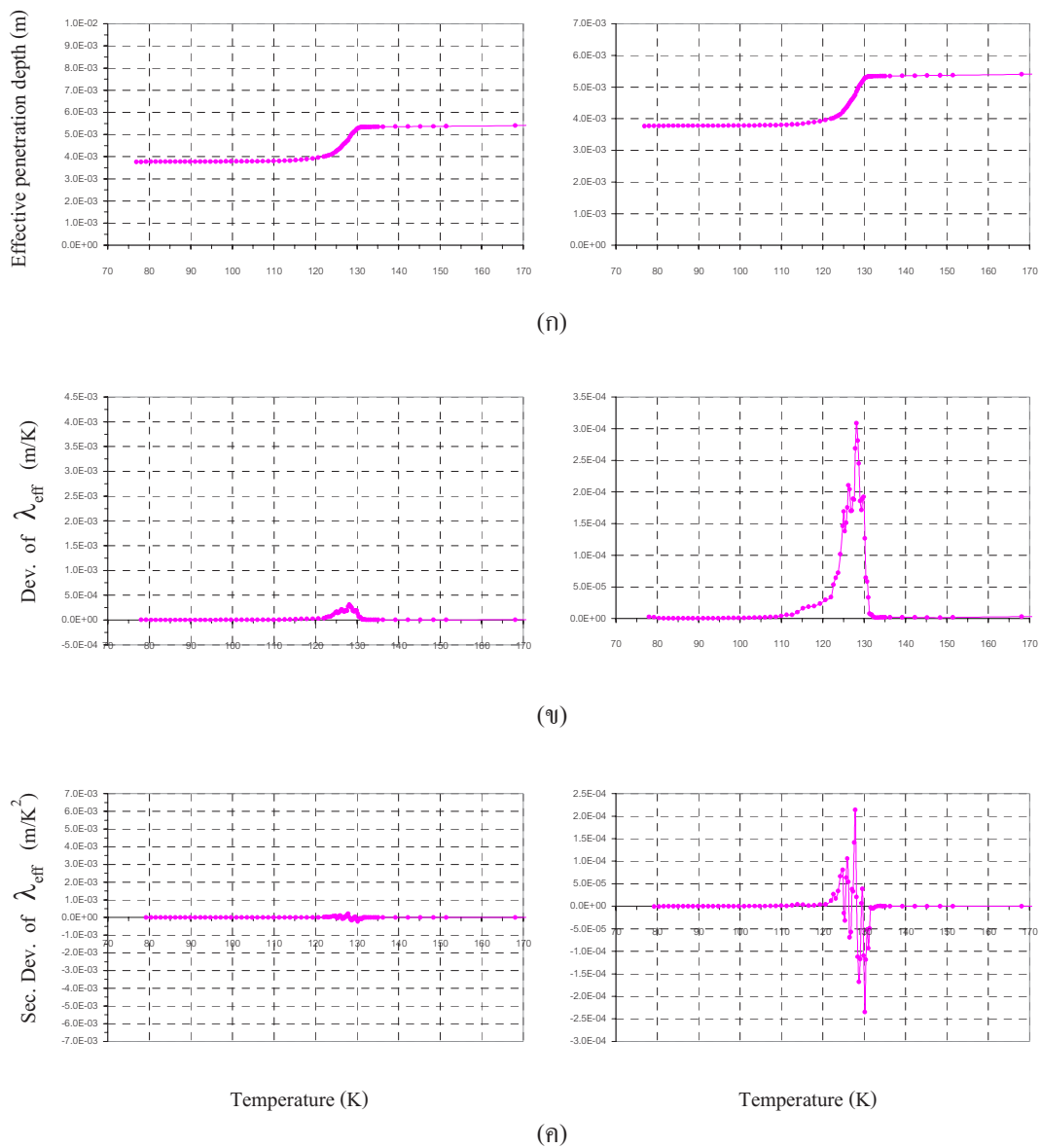
รูป 4.46 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



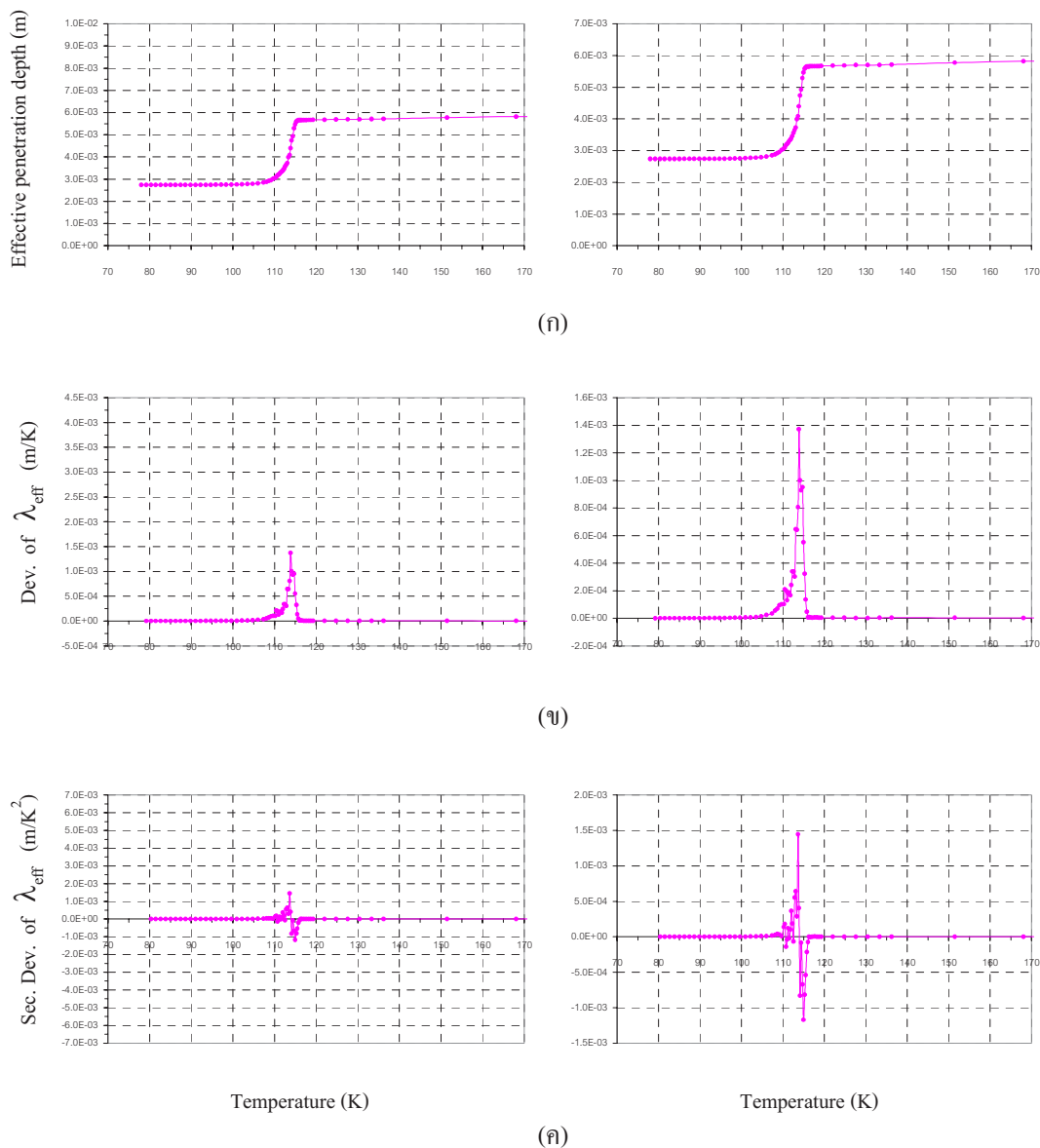
รูป 4.47 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



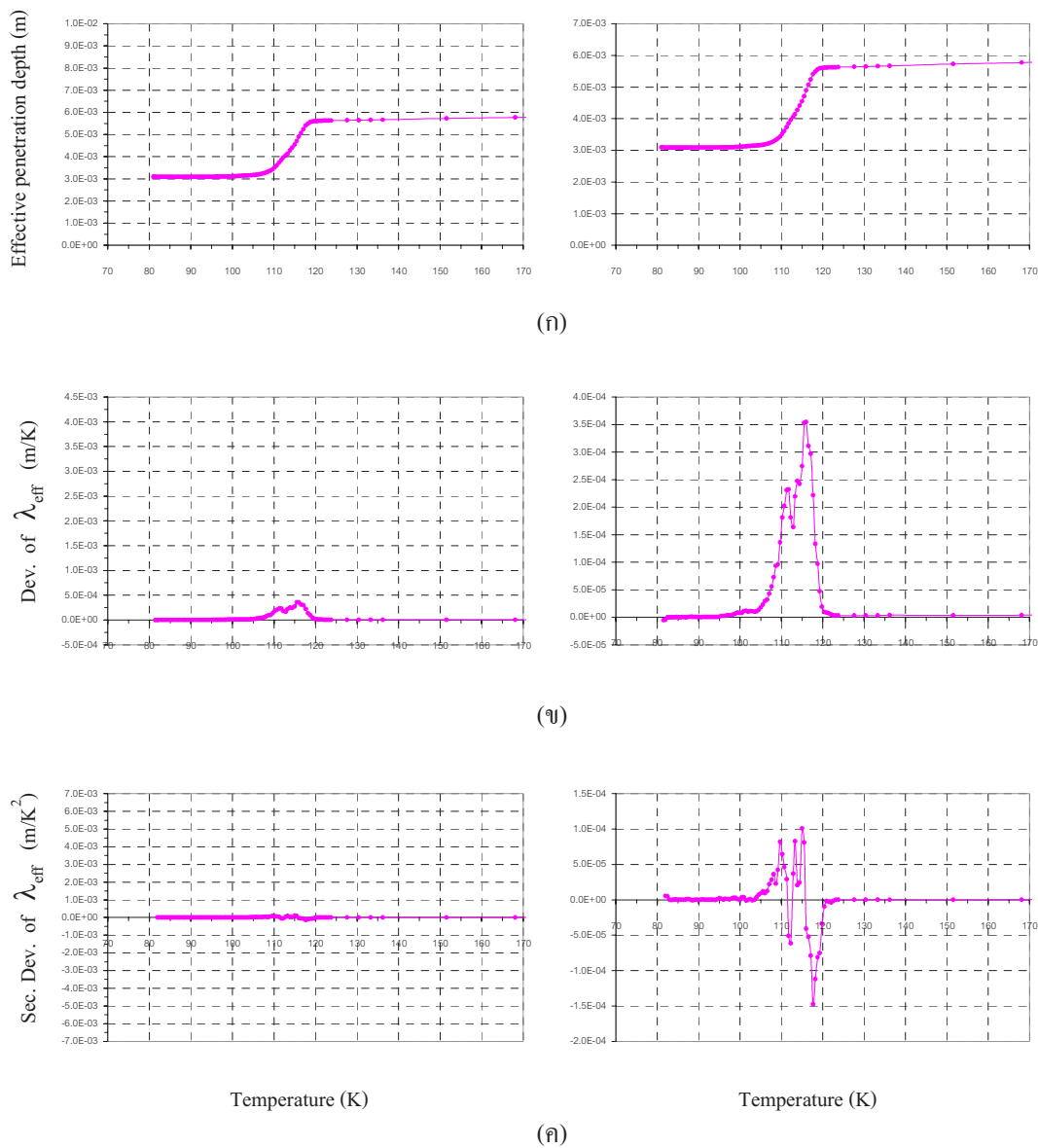
รูป 4.48 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



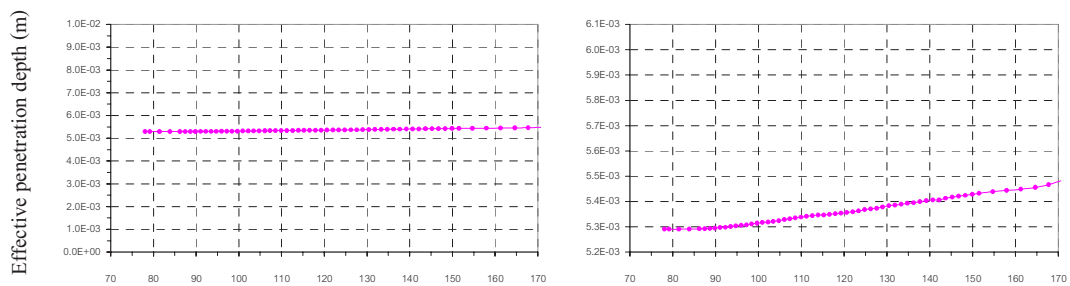
รูป 4.49 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

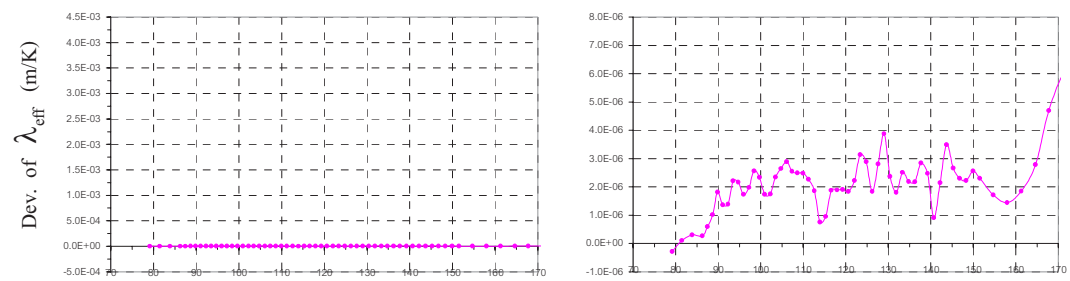
(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

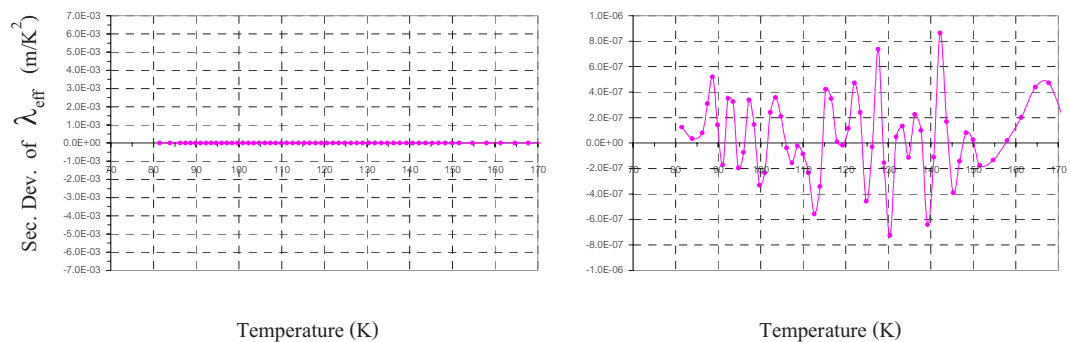
(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 4.50 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 19 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO

เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร

(ก) ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร

(ข) อนุพันธ์ของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

(ค) อนุพันธ์อันดับสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิของสาร

จากการหาค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ สัมพันธ์กับอุณหภูมิของสาร ดังกราฟรูป 4.40 – 4.50 พบว่าค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 13, 15, 18 ร่องลงมา ค่อนข้างชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 6, 10, 14 และไม่ชัดเจน ได้แก่ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 9, 19 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงประมาณ 77 - 170 K จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤต ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ การเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดและตัวแปรอสมมาตร ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 4.14 – 4.15 ดังนี้

ตาราง 4.14 แสดงอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

สารเม็ดที่	อุณหภูมิวิกฤต (K)				ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ (K)		
	$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{inflect})}$	$T_{c(\text{mid})}$	$T_{c(\text{zero})}$	$\Delta\bar{T}$	ΔT	ΔT_{pp}
3	118.448	113.906	113.852	106.054	2.539	1.524	0.532
5	124.832	111.260	113.080	103.517	45.344	9.849	17.536
6	116.556	112.606	111.557	102.196	11.387	7.632	5.294
8	123.663	115.214	115.651	108.617	8.868	8.615	7.154
9	126.457	123.081	119.625	100.957	10.822	4.577	1.609
10	115.991	113.348	112.634	103.466	5.343	3.802	2.626
13	127.331	126.513	126.266	113.933	1.358	0.906	0.815
14	131.290	128.151	126.932	113.880	6.959	5.146	2.304
15	115.777	113.880	113.759	104.769	2.263	1.645	1.306
18	119.809	115.991	114.304	104.513	8.725	7.769	2.662
19	-	-	-	-	-	-	-

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.14 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ พบว่า อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{inflect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง และยังพบอีกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ กับ $T_{c(\text{mid})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 มีค่าแตกต่างกันมาก คือ 3.456 K รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 14, 18 มีค่าแตกต่างกันปานกลาง คือ -1.820, 1.049, 1.219, 1.687 K และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 13, 15 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ 0.054, -0.437, 0.714, 0.247, 0.121 K ทำให้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำไปตามอุณหภูมิของเม็ดสารตัวอย่างดังกล่าวมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ นั่นคือ การเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างแต่ละเม็ดมีความไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร นั่นเอง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้กราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่งไม่สมมาตรและเข้าใกล้สมมาตร กราฟอนุพันธ์อันดับสองไม่สมมาตรและเข้าใกล้แอนติสมมาตร ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน ส่วนเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ไม่สามารถหาอุณหภูมิวิกฤตได้ เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ พบว่า ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($\Delta\bar{T}$), ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะครึ่งพิค (ΔT) และความกว้างในการเปลี่ยนสถานะพิคถึงพิค (ΔT_{pp}) ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 8, 9, 18 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 14 มีค่าปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 13, 15 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากมีปริมาณและสัดส่วนของสารเจือปนชนิดต่าง ๆ ในแต่ละเม็ดสารตัวอย่างไม่เท่ากัน นั่นคือ เม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 8, 9, 18 เม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 14 และเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 13, 15 มีปริมาณสารเจือปนมาก ปานกลางและน้อย ตามลำดับ ส่วนเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ไม่สามารถหาความกว้างในการเปลี่ยนสถานะได้ เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

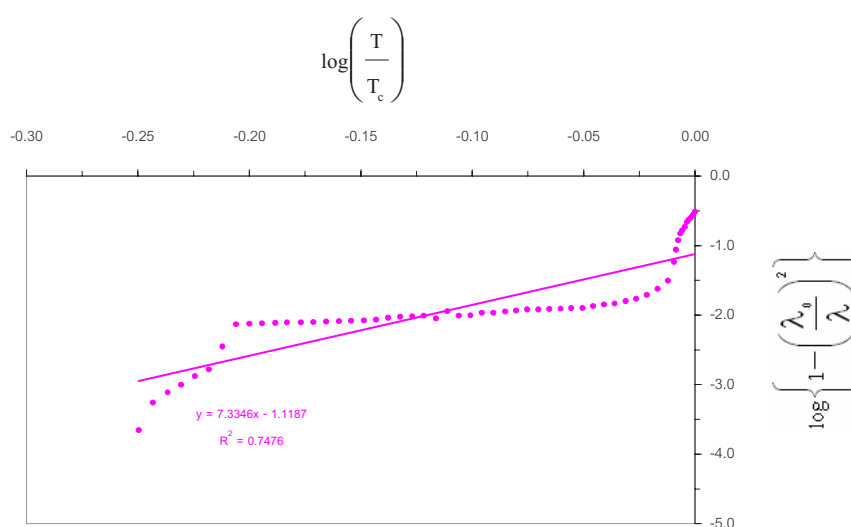
ตาราง 4.15 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ϵ_λ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด $\lambda'_{\max}$ และตัวแปรอสมมาตร $(A-B)/(A+B)$ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

สารเม็ดที่	ϵ_λ	$\lambda'_{\max}$ (m/K)	$(A-B)/(A+B)$
3	0.37	0.000552	-0.008885
5	0.02	0.000010	0.025403
6	0.21	0.000085	-0.302540
8	1.17	0.000364	0.043657
9	0.10	0.000059	-0.168827
10	0.52	0.000358	-0.153617
13	5.83	0.003520	-0.071553
14	0.40	0.000309	-0.047757
15	1.03	0.001371	0.103929
18	0.77	0.000355	-0.187255
19	-	-	-

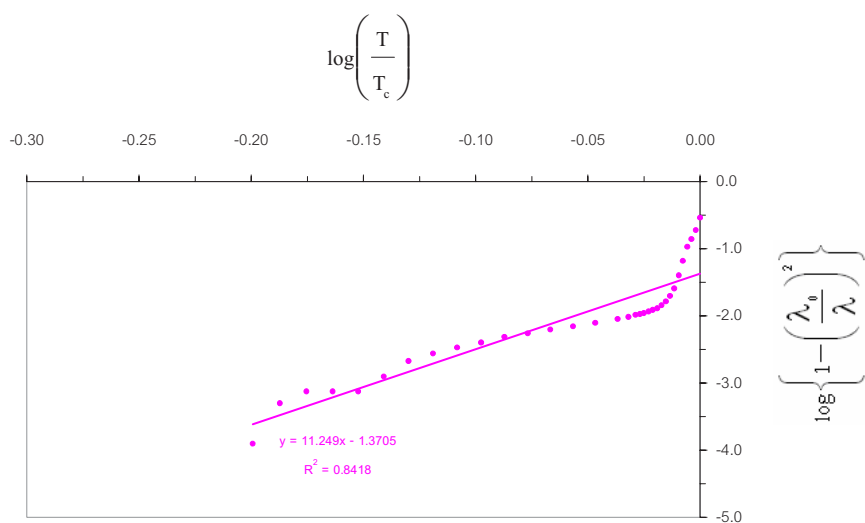
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.15 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ พบว่า ค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 13, 15 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 6, 9, 10, 14, 18 มีค่าปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 มีค่าน้อยมาก ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13, 15 มีค่ามาก รองลงมา เม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 8, 10, 14, 18 มีค่าปานกลาง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9 มีค่าน้อย คาดว่าเกิดจากการมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งในเม็ดสารตัวอย่างที่แตกต่างกัน นั่นเอง นอกจากนี้ ตัวแปรอสมมาตรของแต่ละเม็ดสารตัวอย่างมีค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความไม่สมมาตรของกราฟอนุพันธ์อันดับสอง และเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ไม่สามารถหาค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดและตัวแปรอสมมาตรได้ เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะ

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าระยะเจาะลึกยังผลของสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ตามอุณหภูมิ มาตรการส่วนลอการิทึม

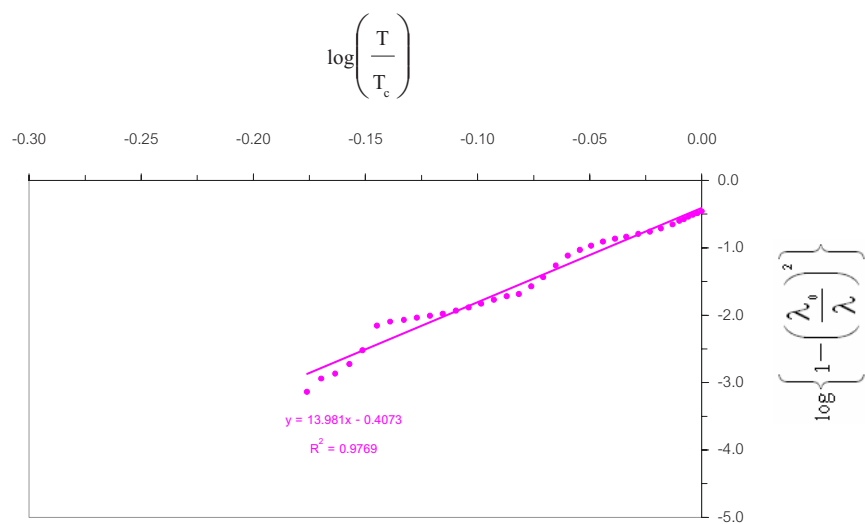
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ มาตรการส่วนลอการิทึม แสดงดังรูป 4.51 – 4.74 และตาราง 4.16 - 4.18 ดังต่อไปนี้



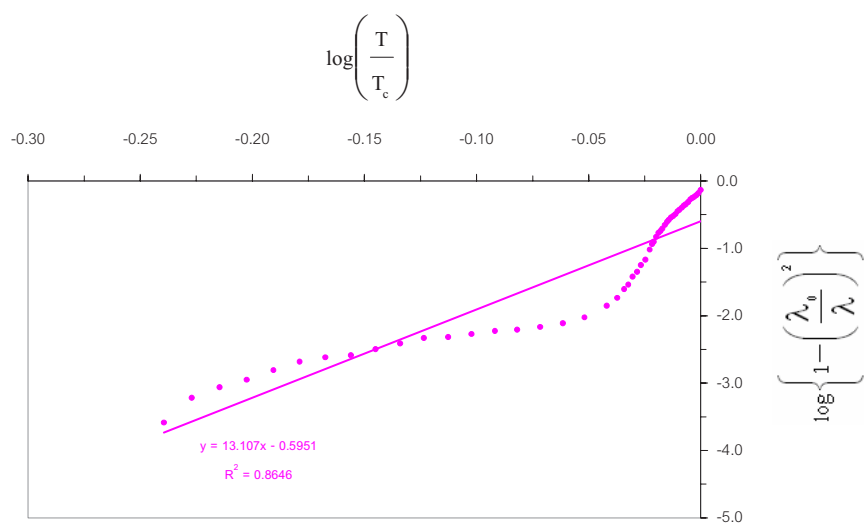
รูป 4.51 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรการส่วนลอการิทึม



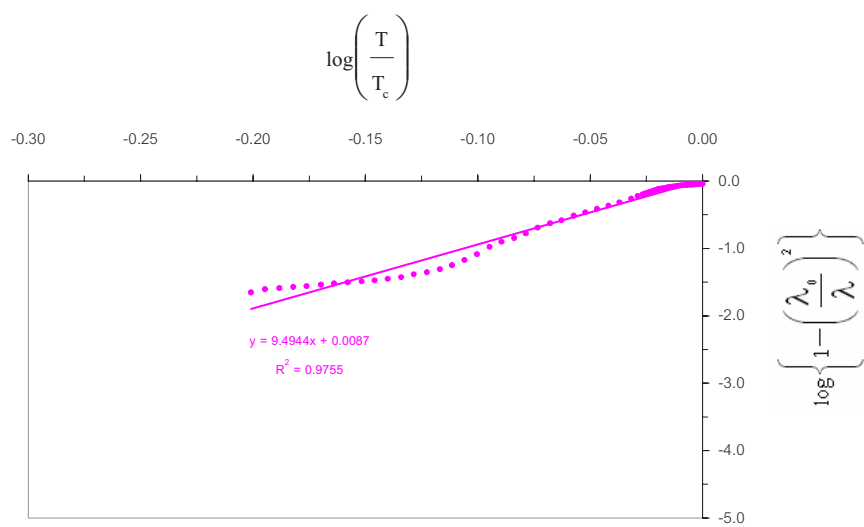
รูป 4.52 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



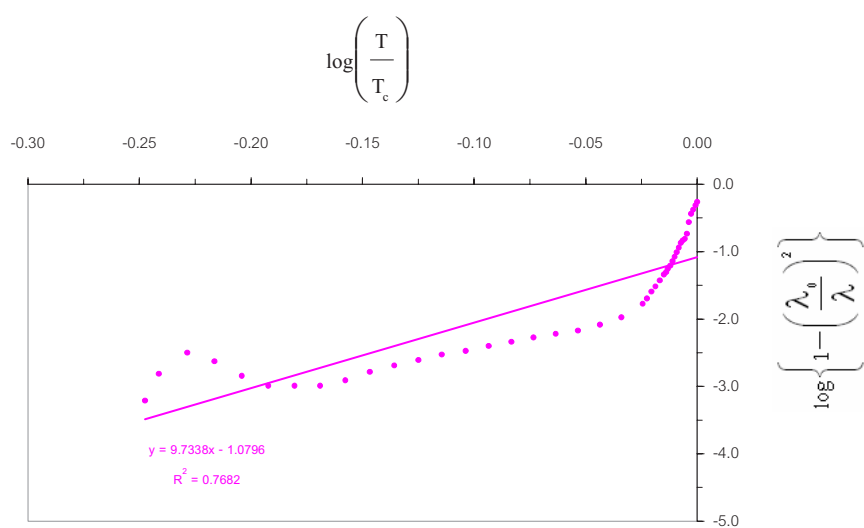
รูป 4.53 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



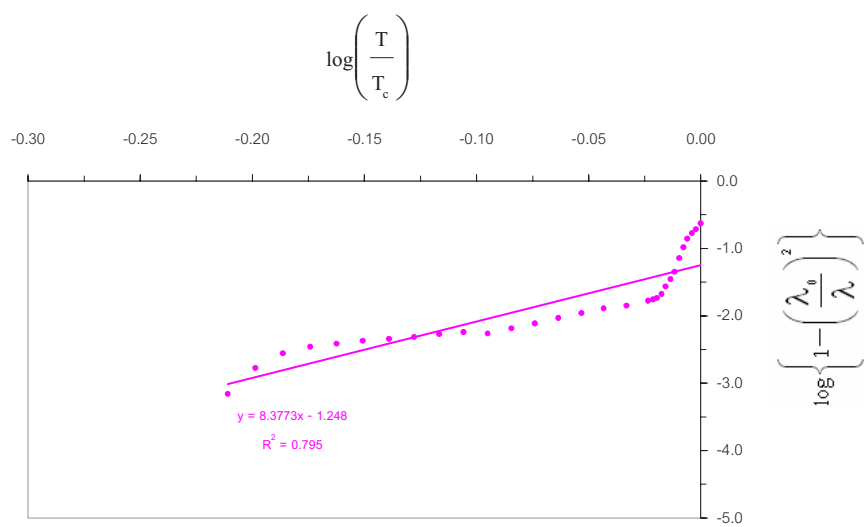
รูป 4.54 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



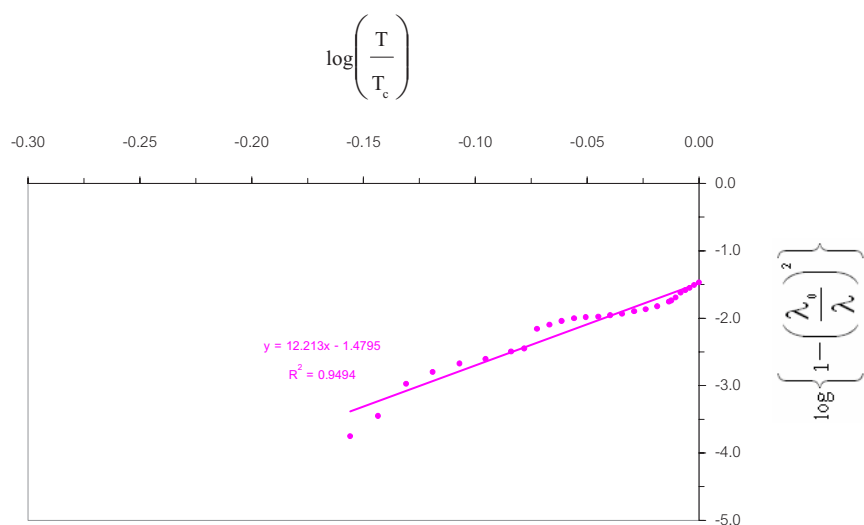
รูป 4.55 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



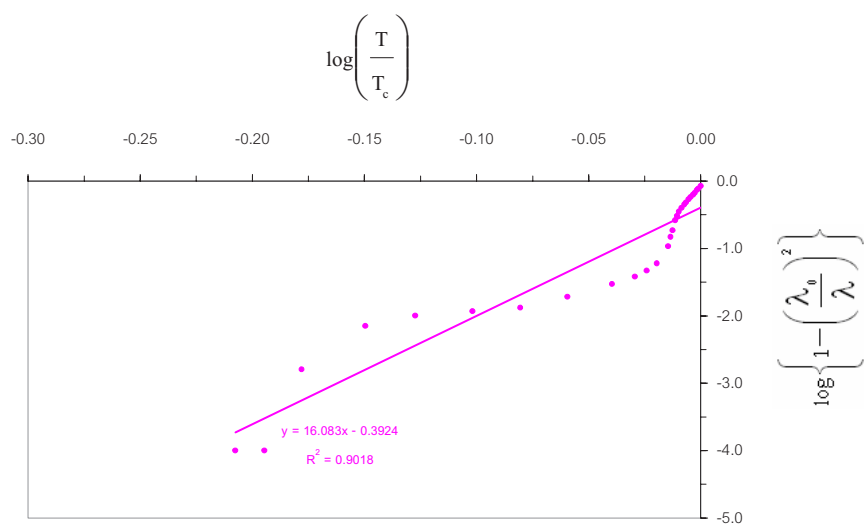
รูป 4.56 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



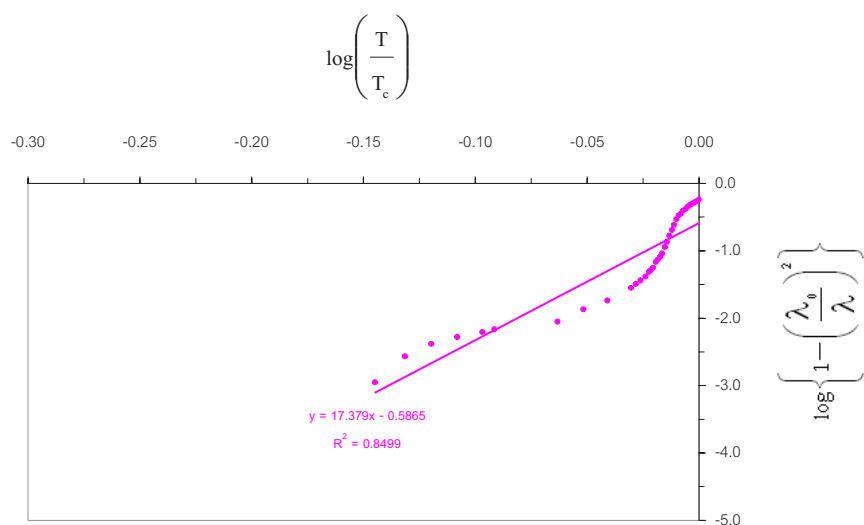
รูป 4.57 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



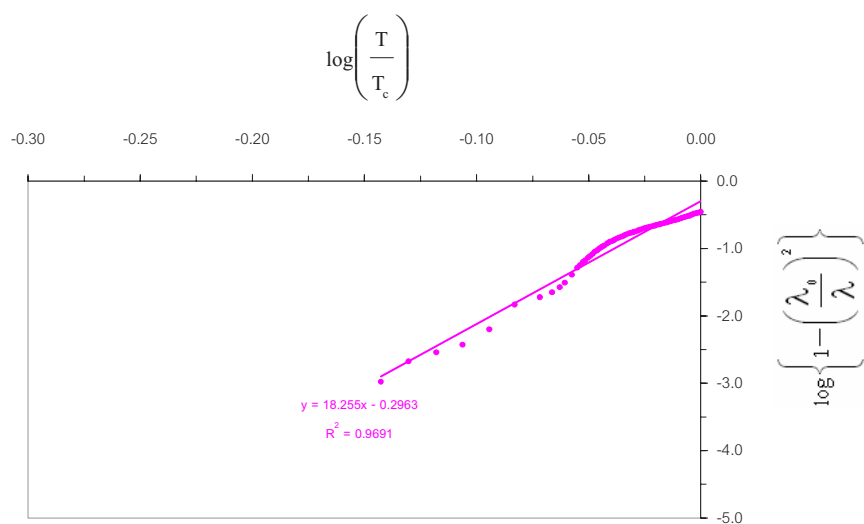
รูป 4.58 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



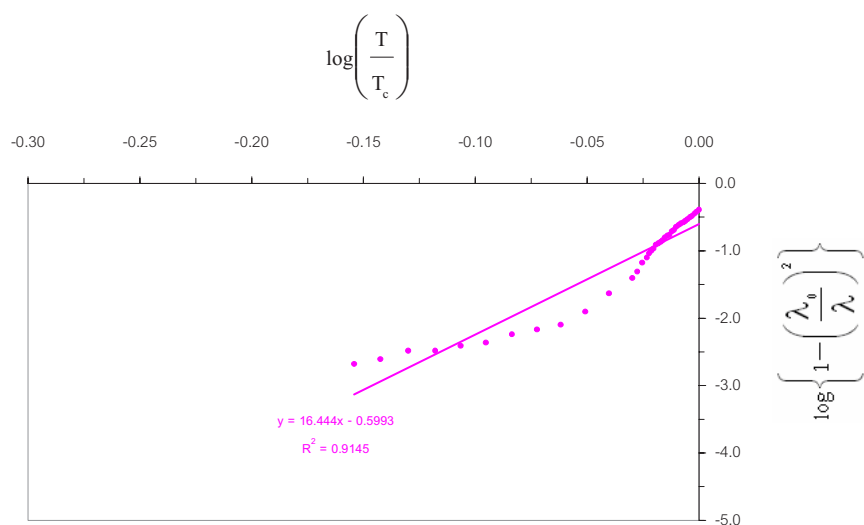
รูป 4.59 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



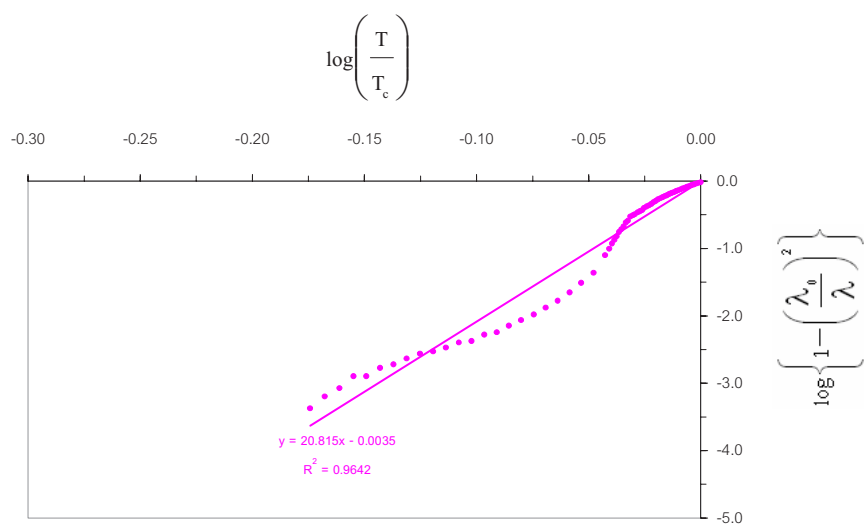
รูป 4.60 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



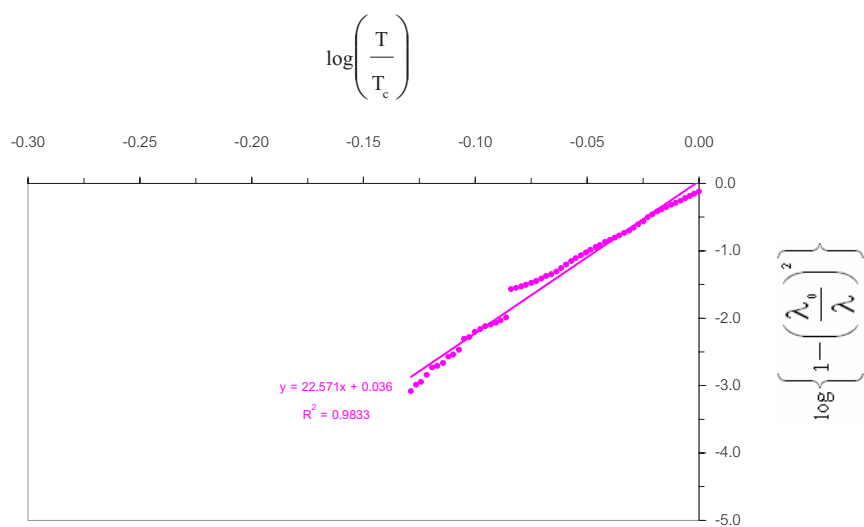
รูป 4.61 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



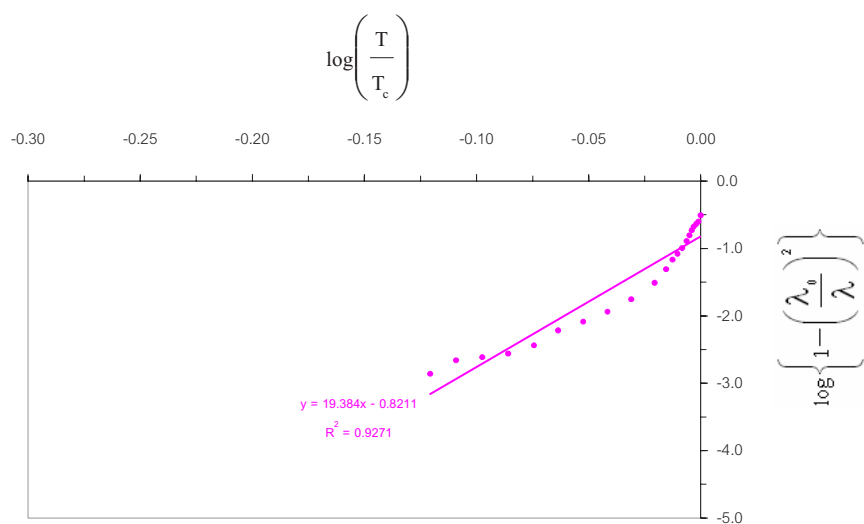
รูป 4.62 แสดงค่าระยะเจาะลึกยิ่งผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



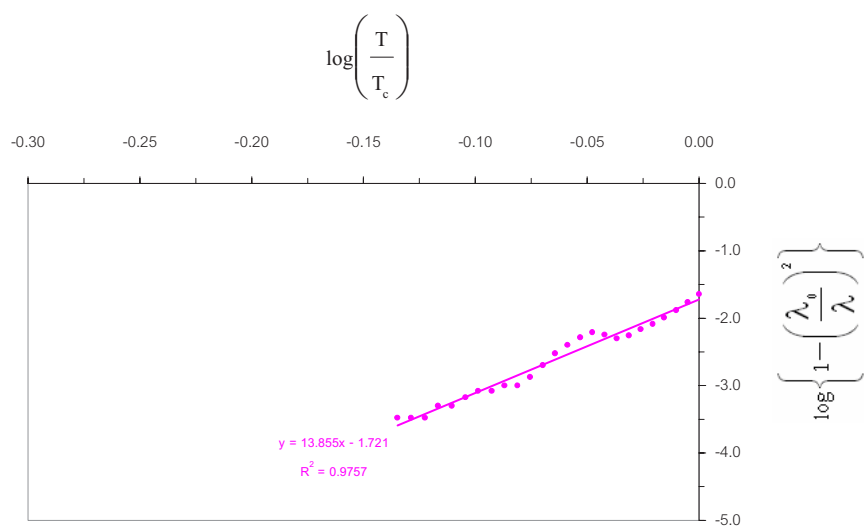
รูป 4.63 แสดงค่าระยะเจาะลึกยิ่งผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



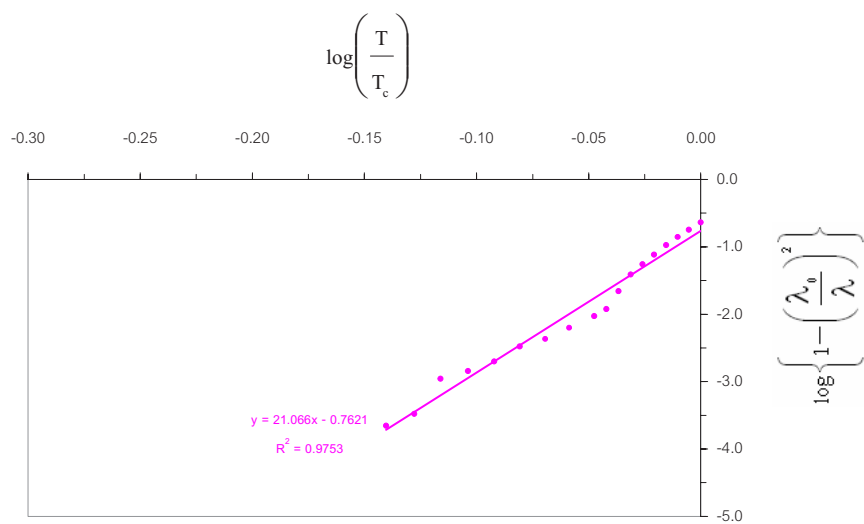
รูป 4.64 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรการส่วนลอการิทึม



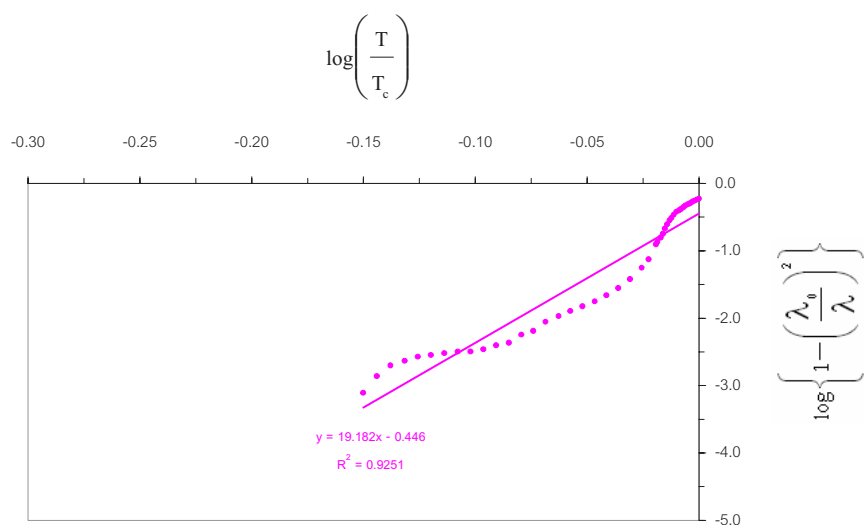
รูป 4.65 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรการส่วนลอการิทึม



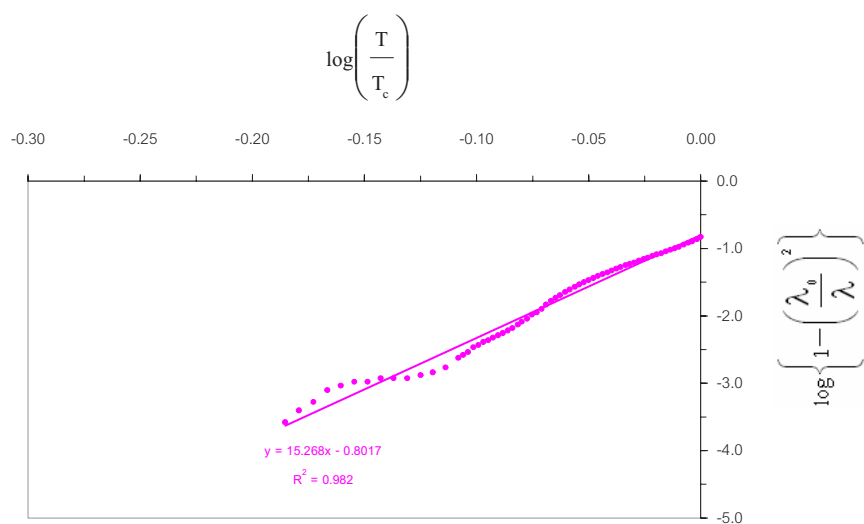
รูป 4.66 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



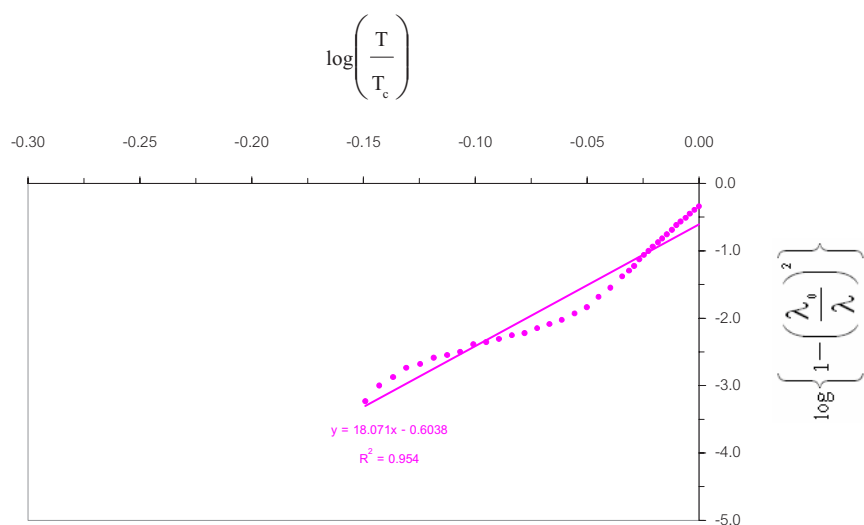
รูป 4.67 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



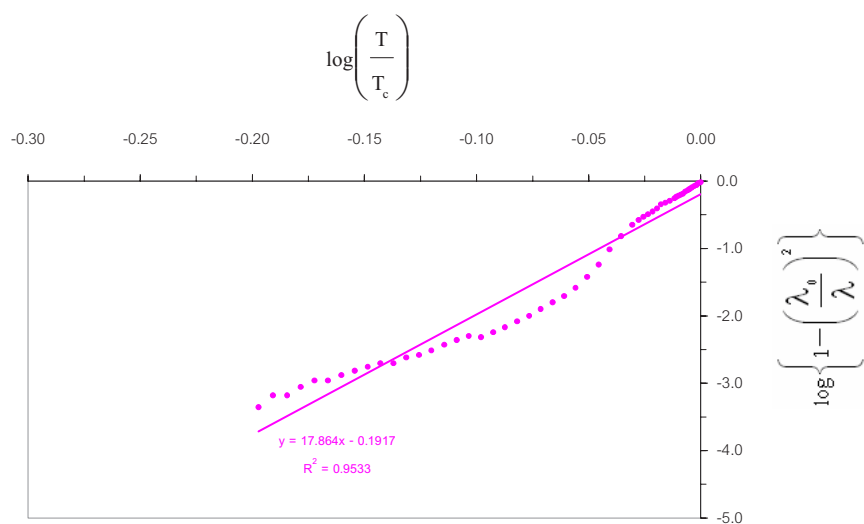
รูป 4.68 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



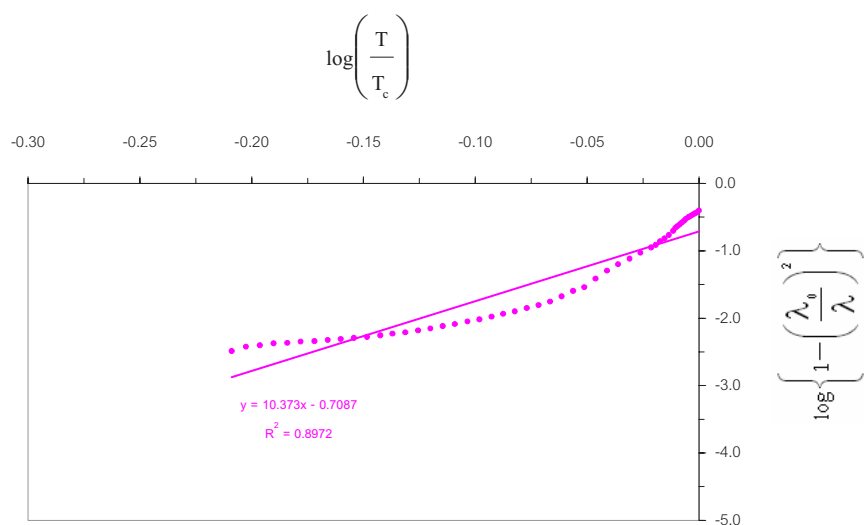
รูป 4.69 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



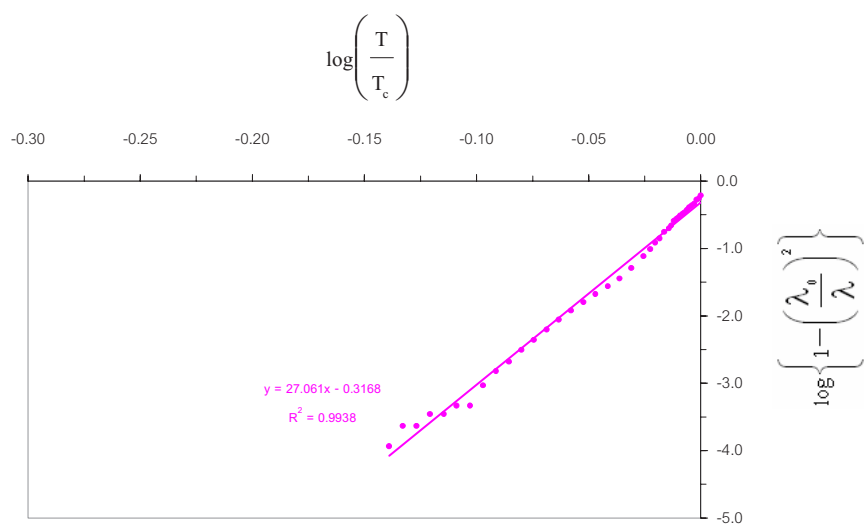
รูป 4.70 แสดงค่าระยะเจาะลึกยิ่งผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



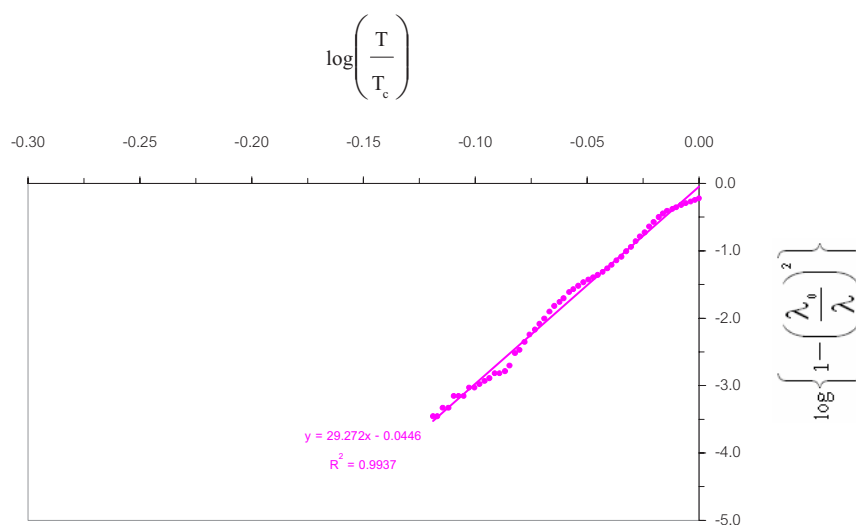
รูป 4.71 แสดงค่าระยะเจาะลึกยิ่งผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



รูป 4.72 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



รูป 4.73 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม



รูป 4.74 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็คสารตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม

ตาราง 4.16 แสดงเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคทอน α และกำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน R^2
ของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

สารเม็คที่	5	6	9	10	13	14
α	7.3346	11.2490	13.9810	13.1070	9.4944	9.7338
R^2	0.7476	0.8418	0.9769	0.8646	0.9755	0.7682

ตาราง 4.17 แสดงเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคทอน α และกำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน R^2
ของเม็คสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

สารเม็คที่	3	5	6	8	9	10	13	14
α	8.3773	12.2130	16.0830	17.3790	18.2550	16.4440	20.8150	22.5710
R^2	0.7950	0.9494	0.9018	0.8499	0.9691	0.9145	0.9642	0.9833

ตาราง 4.18 แสดงเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอน α และกำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน R^2 ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$

สารเม็ดที่	3	5	6	8	9	10	13
α	19.3840	13.8550	21.0660	19.1820	15.2680	18.0710	17.8640
R^2	0.9271	0.9757	0.9753	0.9251	0.9820	0.9540	0.9533

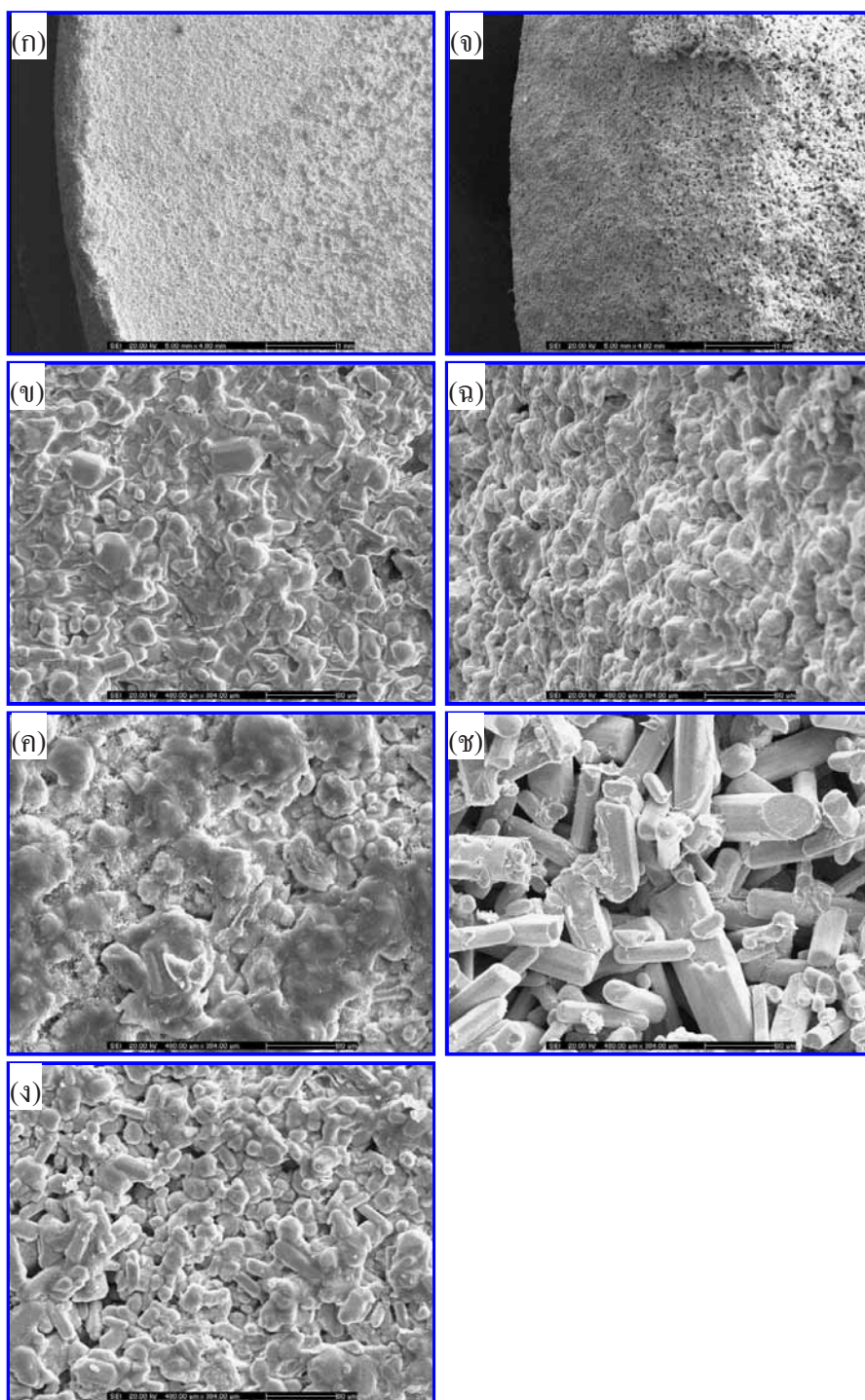
ตาราง 4.18 (ต่อ)

สารเม็ดที่	14	15	18	19
α	10.3730	27.0610	29.2720	-
R^2	0.8972	0.9938	0.9937	-

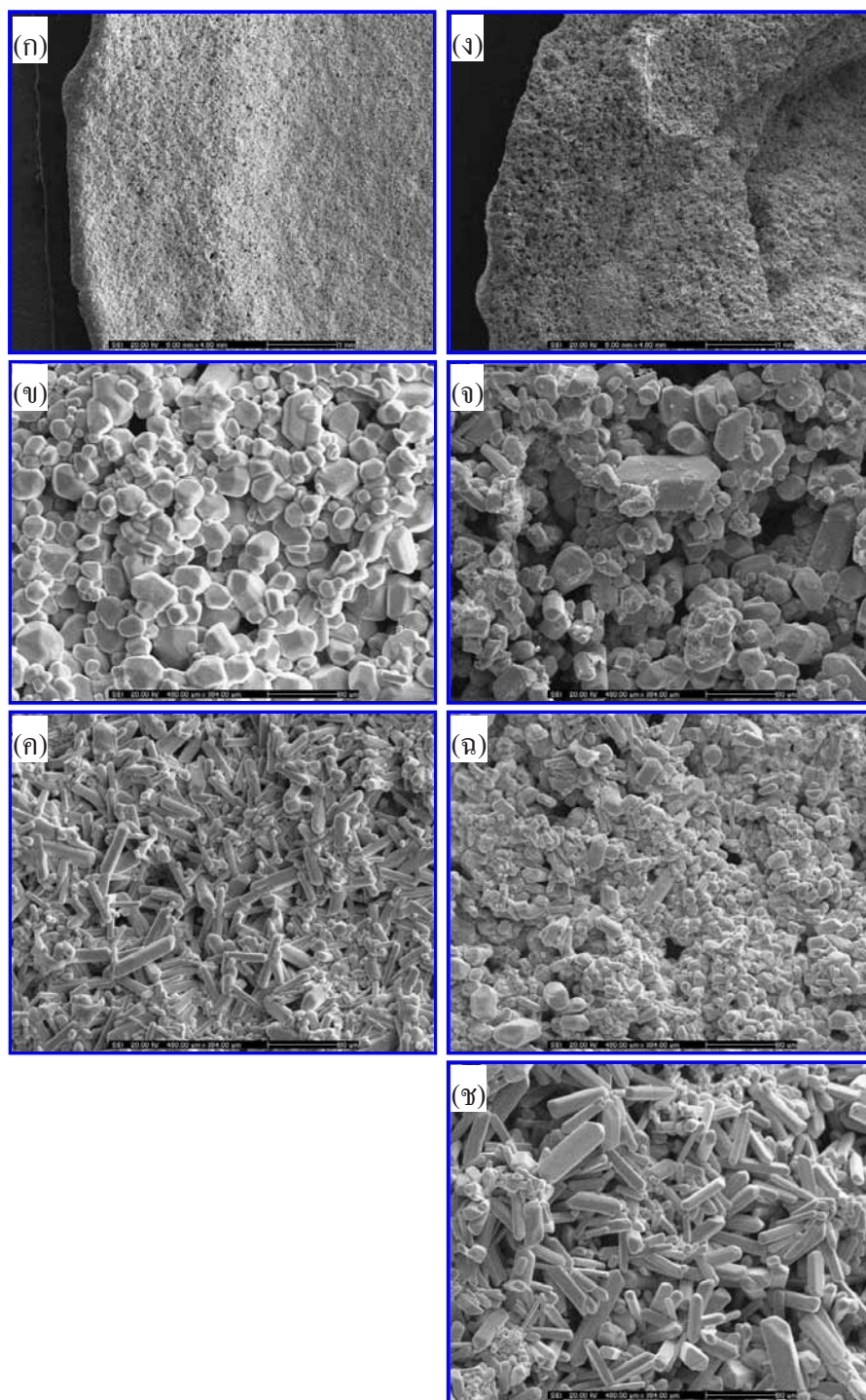
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาราง 4.16, 4.17 และ 4.18 สำหรับเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ พบว่า เลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอนของเม็ดสารตัวอย่างที่แต่ละเม็ดมีค่าไม่เท่ากัน คาดว่าเกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของเนื้อสารตัวนำยวดยิ่งในแต่ละเม็ดสารตัวอย่าง นั่นคือ เม็ดสารตัวอย่างที่มีค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอนน้อยจะมีความไม่บริสุทธิ์สูงกว่าเม็ดสารตัวอย่างที่มีค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอนมาก ส่วนเม็ดสารตัวอย่างที่ 19 ไม่สามารถหาค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิคตอนได้ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

4.3 ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของสารตัวนำยวดยิ่ง

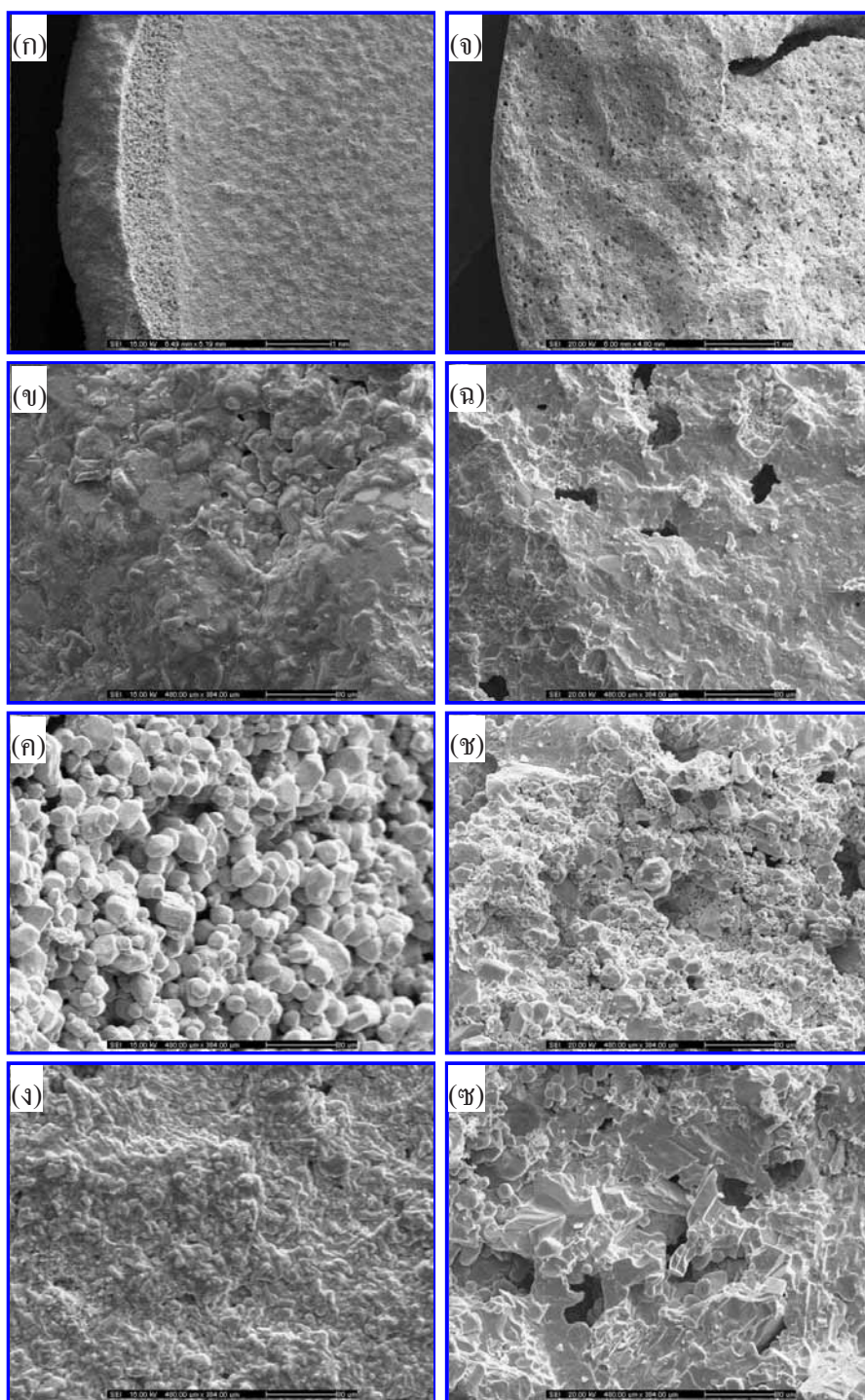
ในการวิเคราะห์ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารของเม็ดยาสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ จากภาพถ่าย SEM รูป 4.75 – 4.100 ซึ่งเป็นผิวด้านนอกและภายในเนื้อเม็ดยาสารตัวนำยวดยิ่ง (แถบมาตราส่วน 1 mm) พร้อมทั้งภาพถ่ายขยาย (แถบมาตราส่วน 80 μm) บริเวณใกล้ๆ ขอบ ถัดเข้าไปจากขอบและบริเวณตรงกลางของผิวด้านนอกและภายในเนื้อเม็ดยาสารตัวนำยวดยิ่ง ตามลำดับ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์รูปลักษณะของเนื้อสาร การจัดเรียงตัวกันของเกรน การเกาะกลุ่มรวมกันของเกรน รูพรุน การเคลือบด้วยเนื้อสารบางส่วนที่หลอมเหลวและขนาดของเกรน ได้ผลการวิเคราะห์ภาพ SEM ของเม็ดยาสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ ดังตาราง 4.19 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ ดังต่อไปนี้



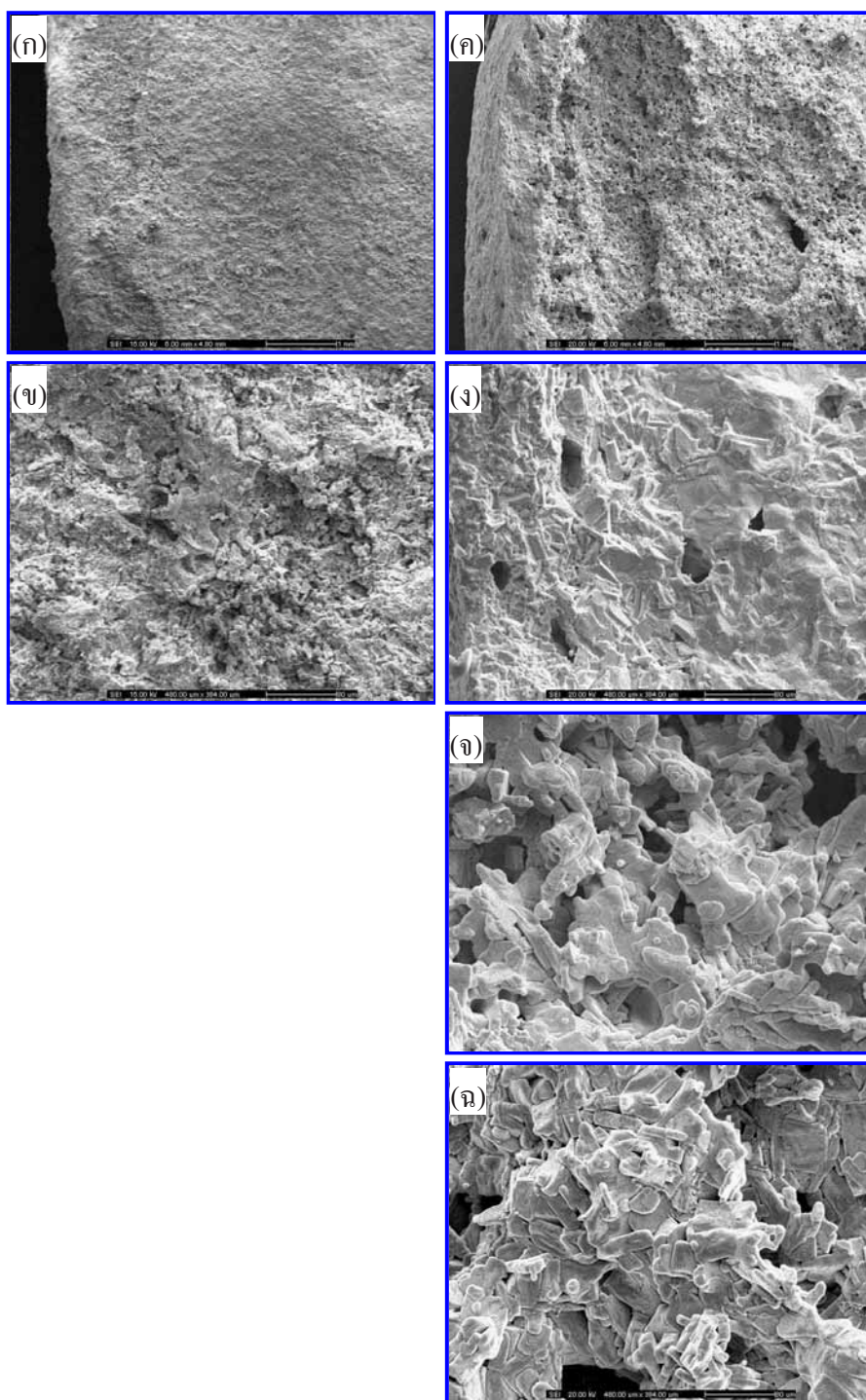
รูป 4.75 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ (ก)–(ง) ผิวด้านนอก (จ)–(ข) ภายในเนื้อเม็คสาร



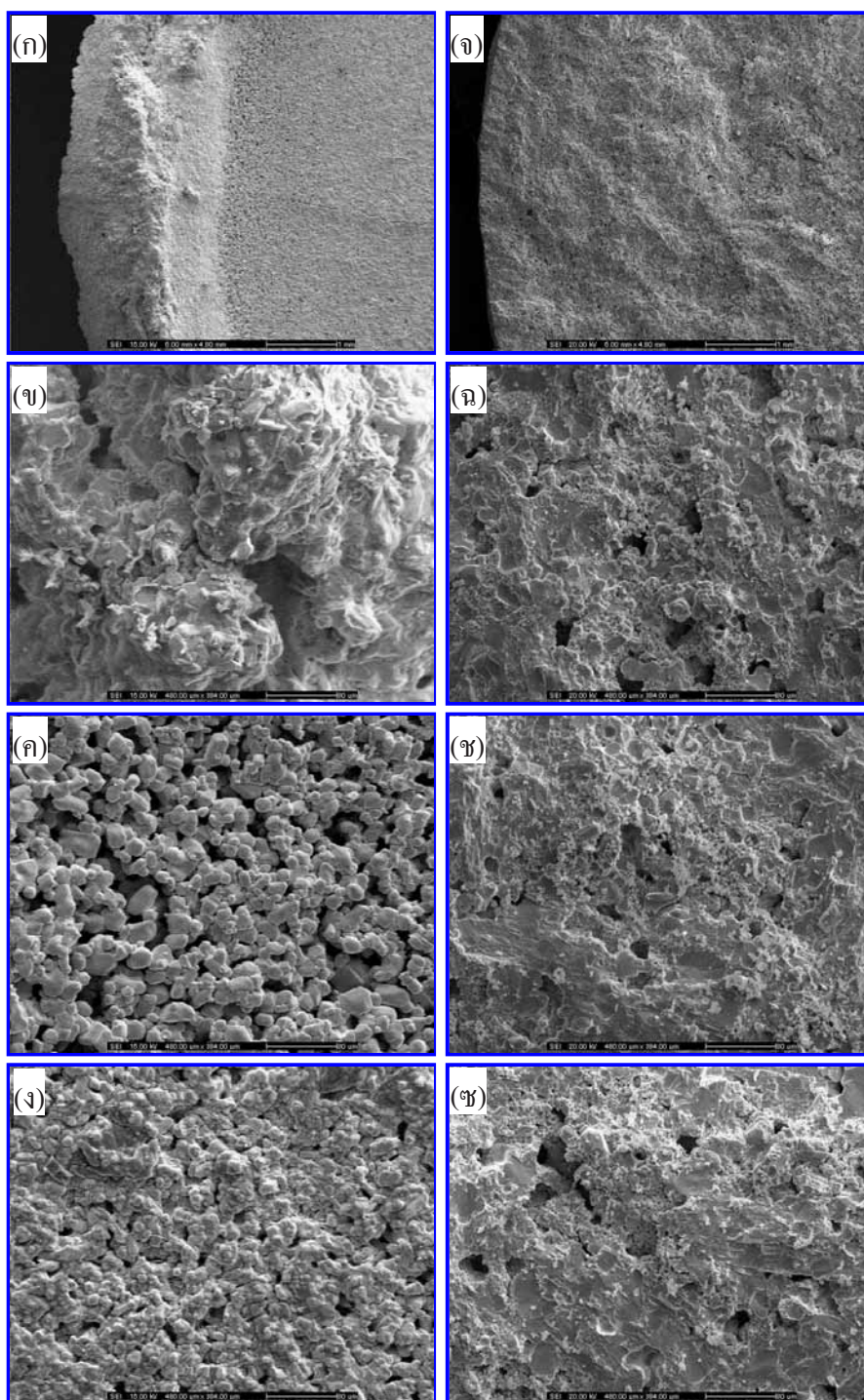
รูป 4.76 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
ไม่เจือ (ก) – (ค) ผิวด้านนอก (ง) – (จ) ภายในเนื้อเม็คสาร



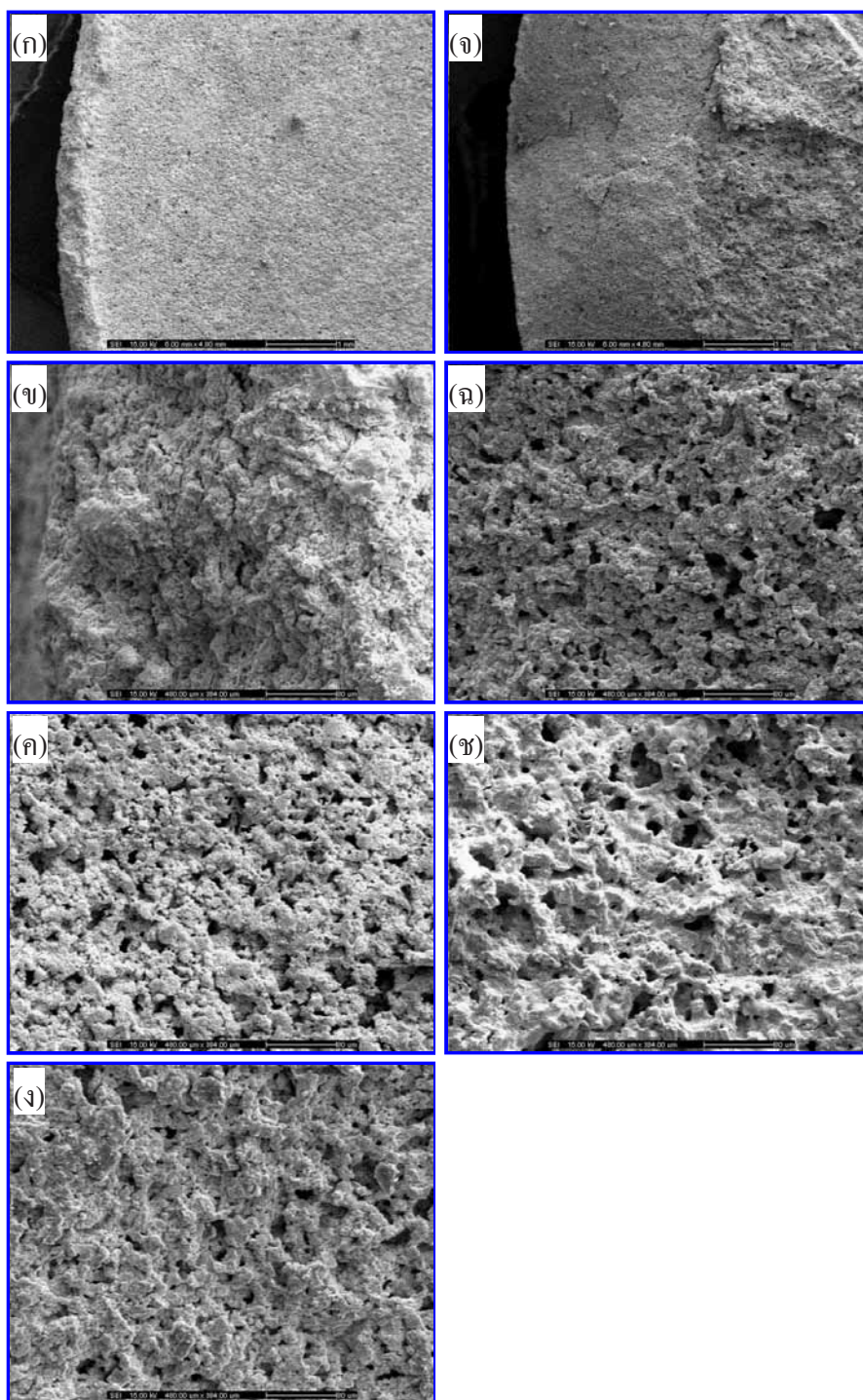
รูป 4.77 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
ไม่เจือ (ก)–(ง) ผิวด้านนอก (จ)–(ข) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.78 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
ไม่เจือ (ก)–(ข) ผิวด้านนอก (ค)–(ง) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.79 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
ไม่เจือ (ก)–(ง) ผิวด้านนอก (จ)–(ข) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.80 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
ไม่เจือ (ก) – (ง) ผิวด้านนอก (จ) – (ข) ภายในเนื้อเม็คสาร

ตาราง 4.19 แสดงผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวตึ้งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่ได้อ

สาร เม็ดที่	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเม็ดสาร							ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *			รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว	
						แน่น	หลวม		มาก	น้อย	เคลื่อน	ไม่เคลื่อน
5	S0	4.75 (ก)	?	?	?	✓	-		-	✓	✓	-
	S1	4.75 (ข)	✓	✓	-	✓	-		-	✓	✓	-
	S2	4.75 (ค)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
	S3	4.75 (ง)	-	✓	✓	✓	-		-	✓	✓	-
	IN0	4.75 (จ)	?	?	?	✓	-		✓	-	✓	✓
	IN1	4.75 (ฉ)	-	✓	-	✓	-		-	✓	✓	-
	IN2											
6	IN3	4.75 (ช)	-	-	✓	-	✓		✓	-	✓	✓
	S0	4.76 (ก)	?	?	?	✓	-		-	✓	✓	✓
	S1	4.76 (ข)	-	✓	-	✓	-		-	✓	✓	✓
	S2											
	S3	4.76 (ค)	-	-	✓	✓	-		-	✓	✓	✓
	IN0	4.76 (ง)	?	?	?	✓	-		✓	-	✓	✓
	IN1	4.76 (จ)	-	✓	✓	-	✓		✓	-	✓	✓
	IN2	4.76 (ฉ)	-	✓	✓	✓	-		-	✓	✓	✓

ตาราง 4.19 (ต่อ)

สาร เมล็ดที่	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะนิสัย										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แห้ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูปร่าง		การเคลื่อนตัวของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลื่อน	ไม่เคลื่อน				
9	IN3	4.76 (ซ)	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	
	S0	4.77 (ก)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	S1	4.77 (ข)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	
	S2	4.77 (ค)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	S3	4.77 (ง)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	
	IN0	4.77 (จ)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
	IN1	4.77 (ฉ)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	
10	IN2	4.77 (ช)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	
	IN3	4.77 (ซ)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	
	S0	4.78 (ก)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	S1														
	S2														
	S3	4.78 (ข)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	IN0	4.78 (ค)	?	?	?	✓	-	✓	-	-	✓	?	?	?	
IN1	4.78 (ง)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-		

ตาราง 4.19 (ต่อ)

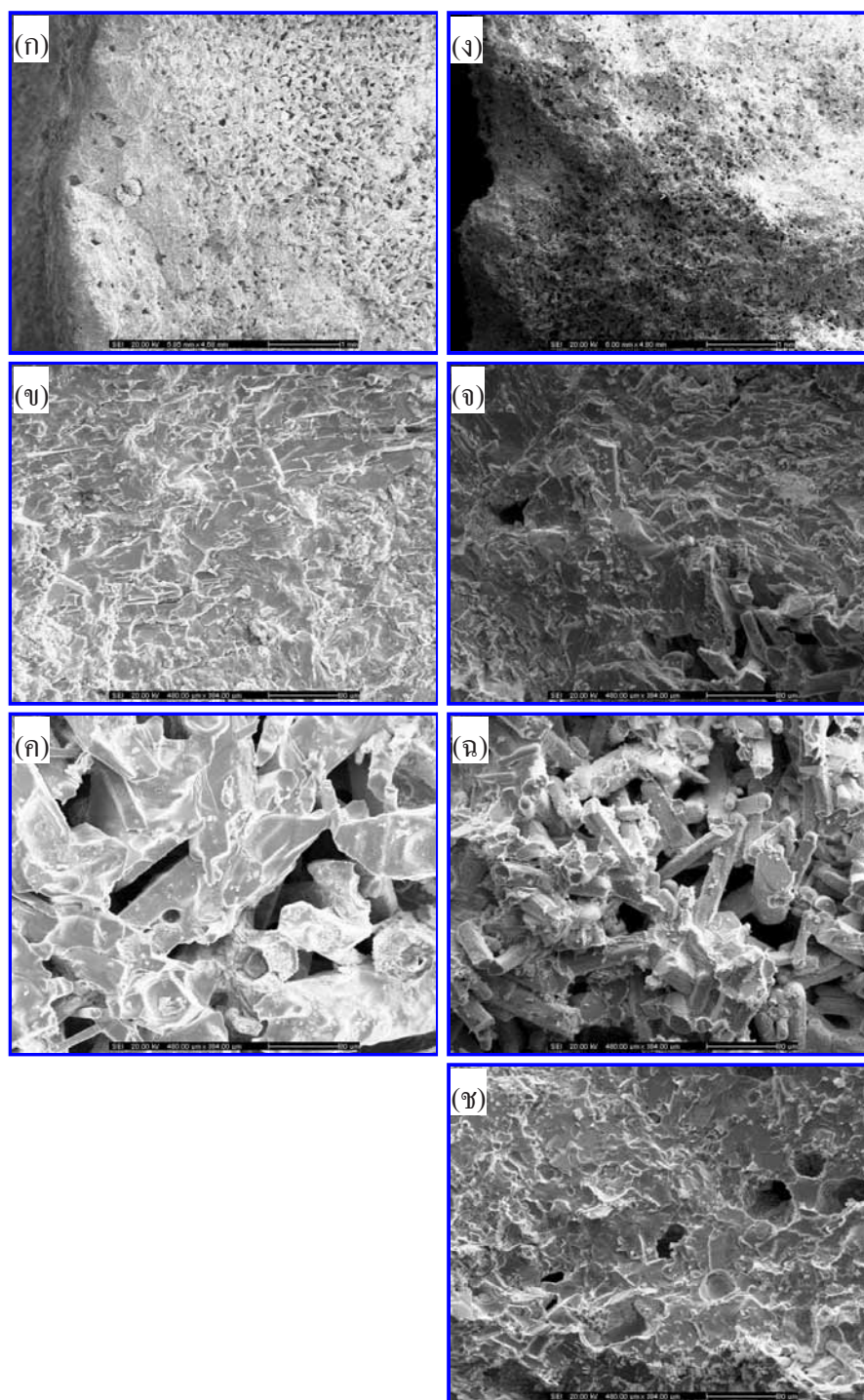
สาร เมล็ดที่	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะนิสัยสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
13	IN2	4.78 (ก)	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-	
	IN3	4.78 (ข)	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	
	S0	4.79 (ก)	?	?	?	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
	S1	4.79 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	
	S2	4.79 (ค)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	
	S3	4.79 (ง)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	
	IN0	4.79 (จ)	?	?	?	✓	-	✓	-	-	✓	?	?	?	
14	IN1	4.79 (ข)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	
	IN2	4.79 (ค)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	
	IN3	4.79 (ง)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	
	S0	4.80 (ก)	?	?	?	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	S1	4.80 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	?	?	?	
	S2	4.80 (ค)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	
	S3	4.80 (ง)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	
IN0	4.80 (จ)	?	?	?	✓	-	✓	-	-	✓	?	?	?		

ตาราง 4.19 (ต่อ)

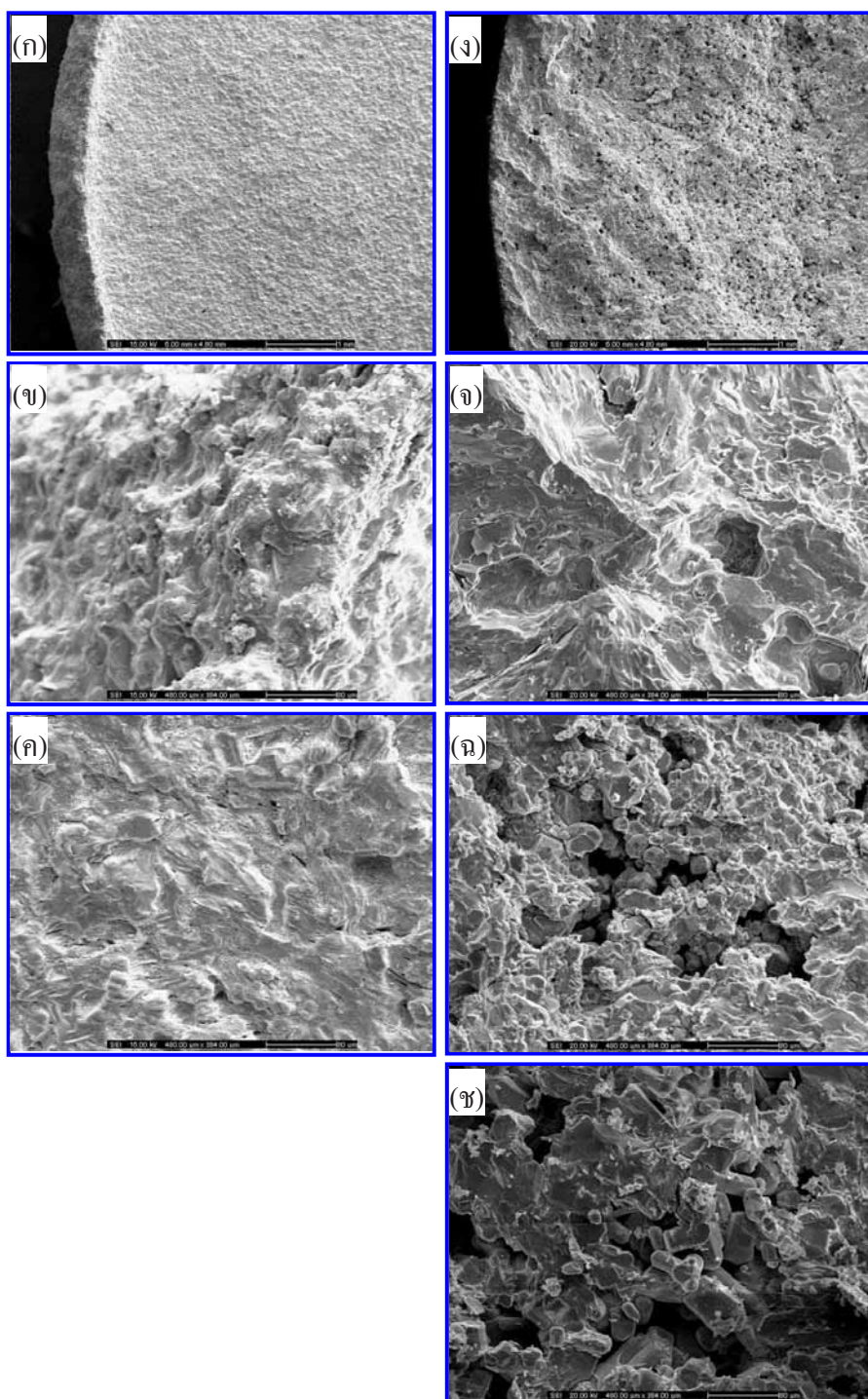
สาร เม็ดที่	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเม็ดสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลือบด้วยของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
	IN1	4.80 (ก)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	
	IN2														
	IN3	4.80 (ข)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	

* เม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดมีการเกาะกลุ่มจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ

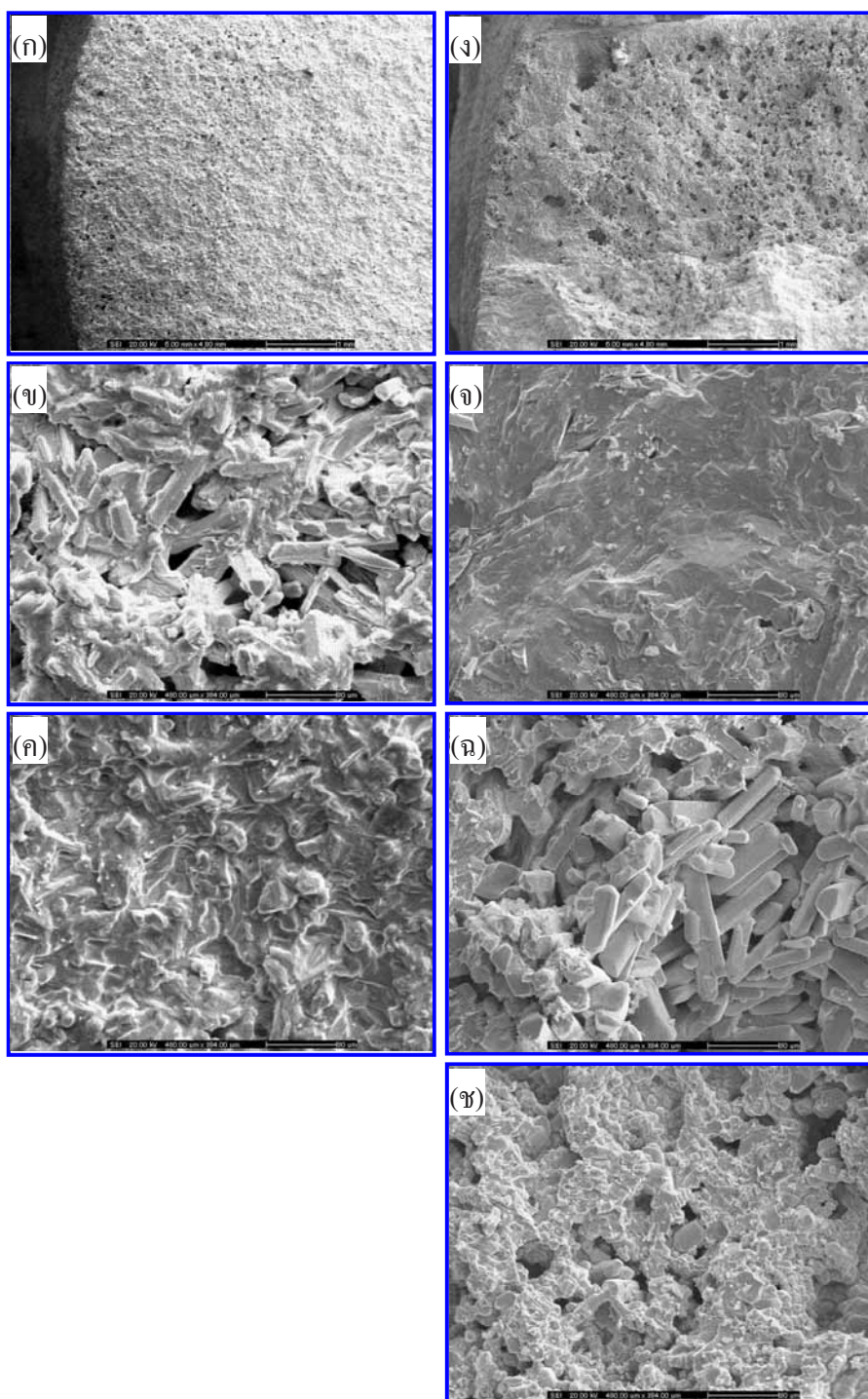
หมายเหตุ S0 หมายถึง ผิวด้านนอกของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายต่ำ (แถบมาตราส่วน 1 mm)
S1, S2, S3 หมายถึง ผิวด้านนอกบริเวณขอบ ถัดจากขอบเข้าไป และตรงกึ่งกลาง ตามลำดับ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายสูง (แถบมาตราส่วน 80 μm)
IN0 หมายถึง ภายในเนื้อสารของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายต่ำ (แถบมาตราส่วน 1 mm)
IN1, IN2, IN3 หมายถึง ภายในเนื้อสารบริเวณขอบ ถัดจากขอบเข้าไป และตรงกึ่งกลาง ตามลำดับ ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายสูง (แถบมาตราส่วน 80 μm)
?, -, ✓ หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ภาพได้หรือไม่แน่ใจ วิเคราะห์ภาพไปแล้วเห็นว่าไม่จริงและจริง ตามลำดับ



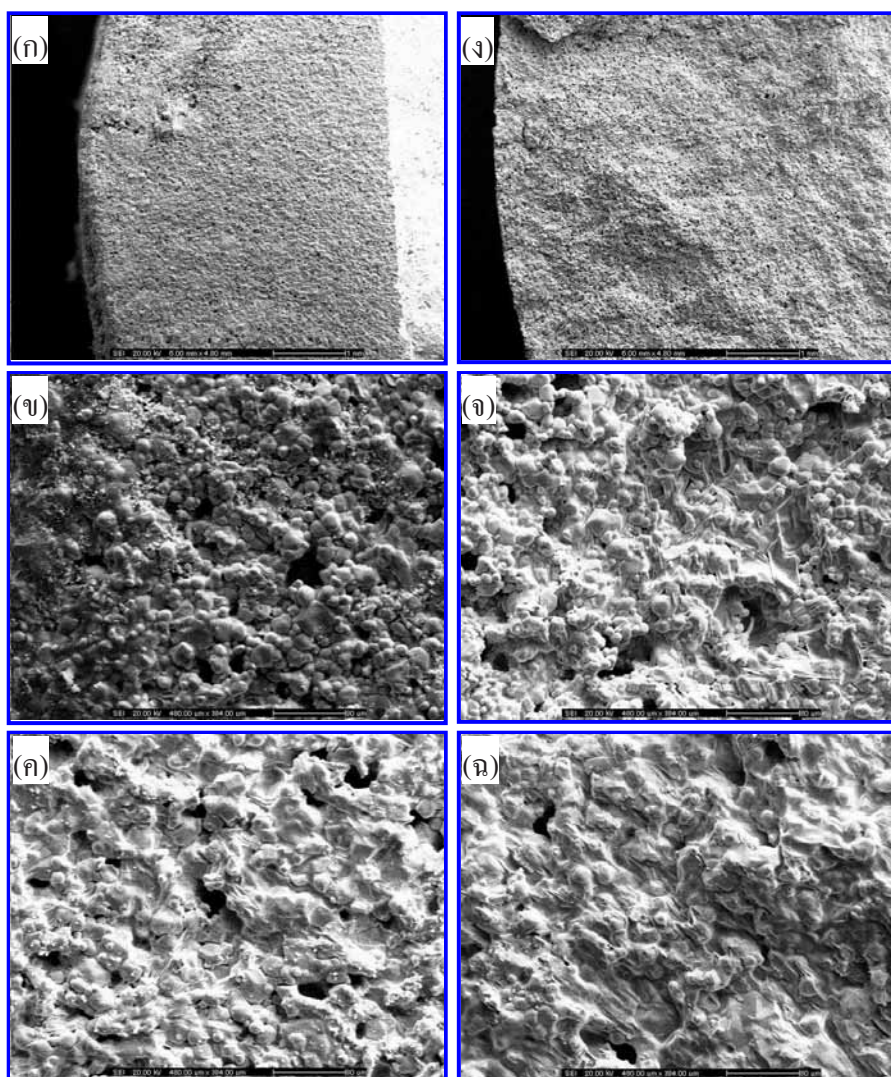
รูป 4.81 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ (ก) – (ค) ผิวค้ำนอก (ง) – (ข) ภายในเนื้อเม็คสาร



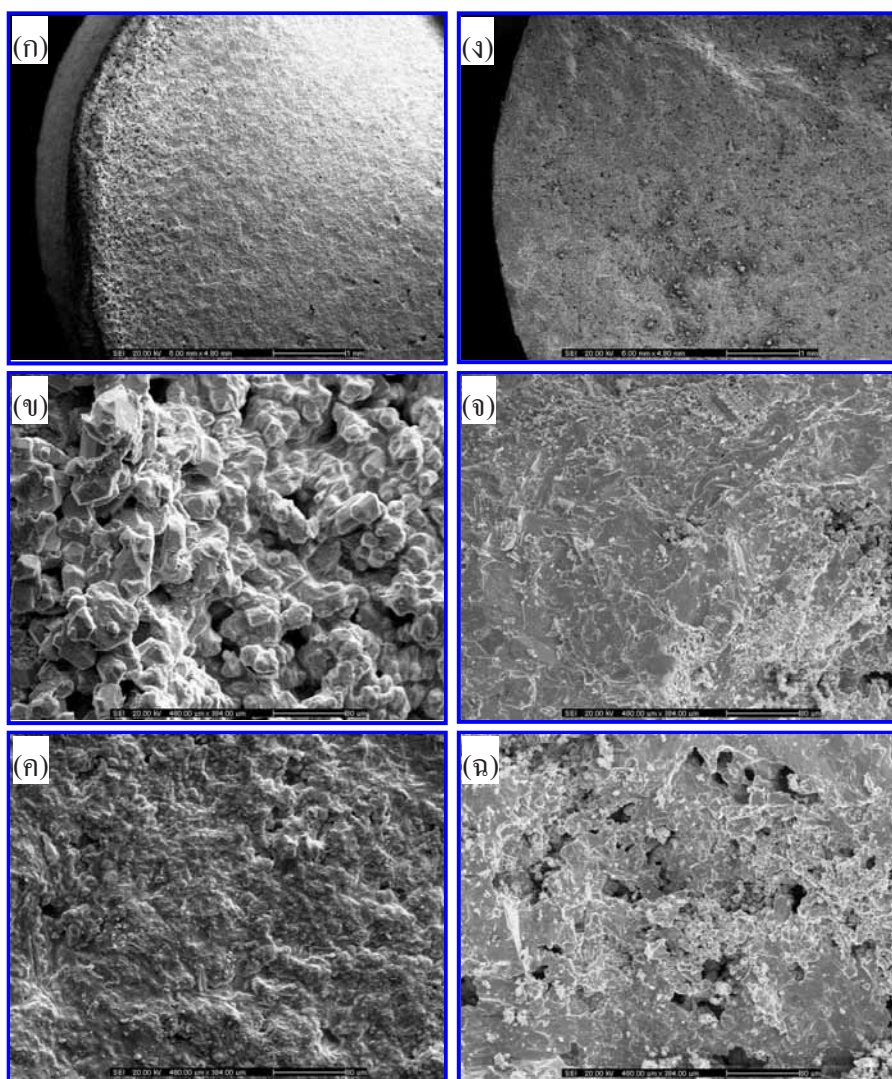
รูป 4.82 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ (ก) – (ค) ผิวค้ำนอก (ง) – (ฉ) ภายในเนื้อเม็คสาร



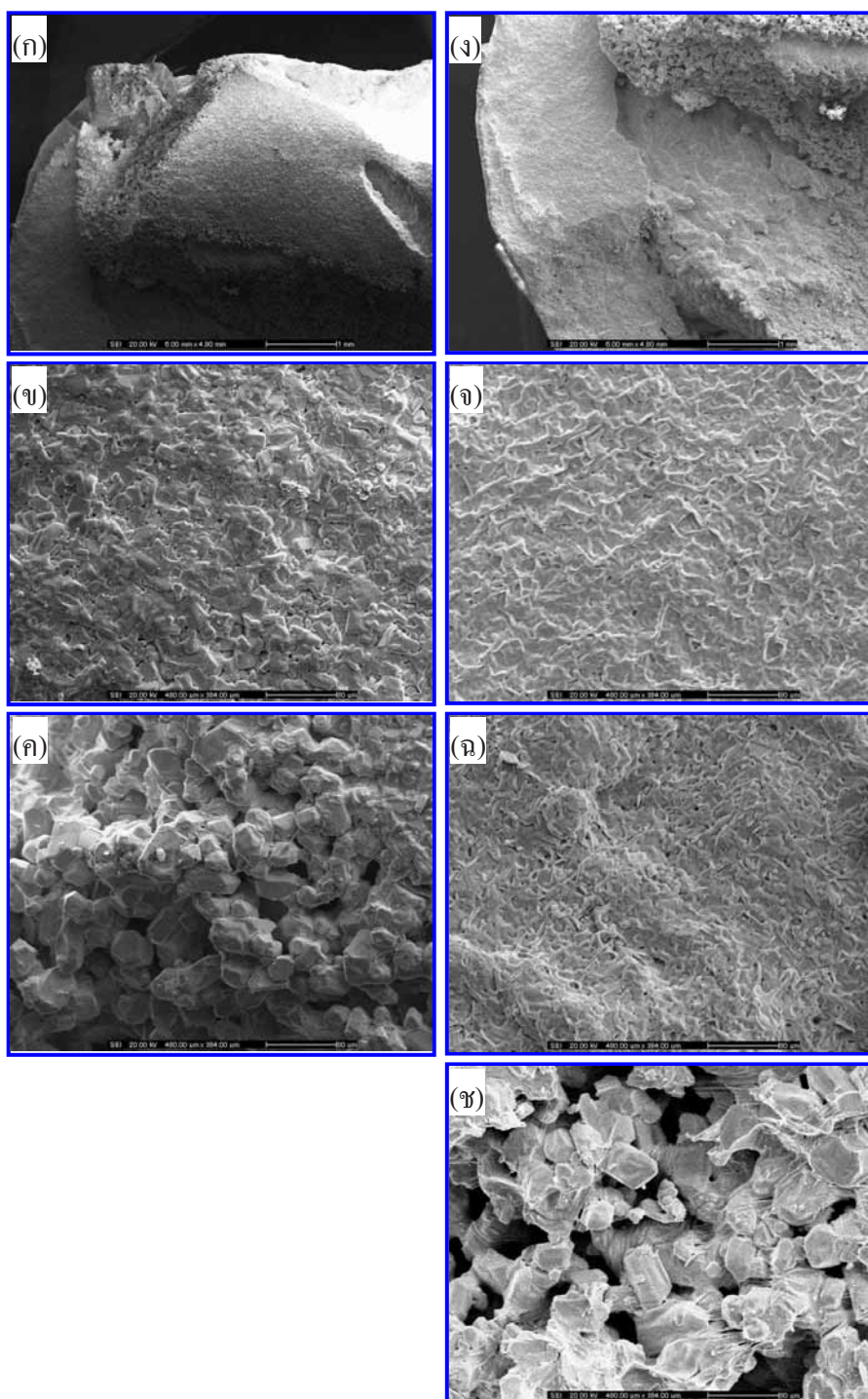
รูป 4.83 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ (ก) – (ค) ฝิวค้ำนอก (ง) – (ข) ภายในเนื้อเม็ดสาร



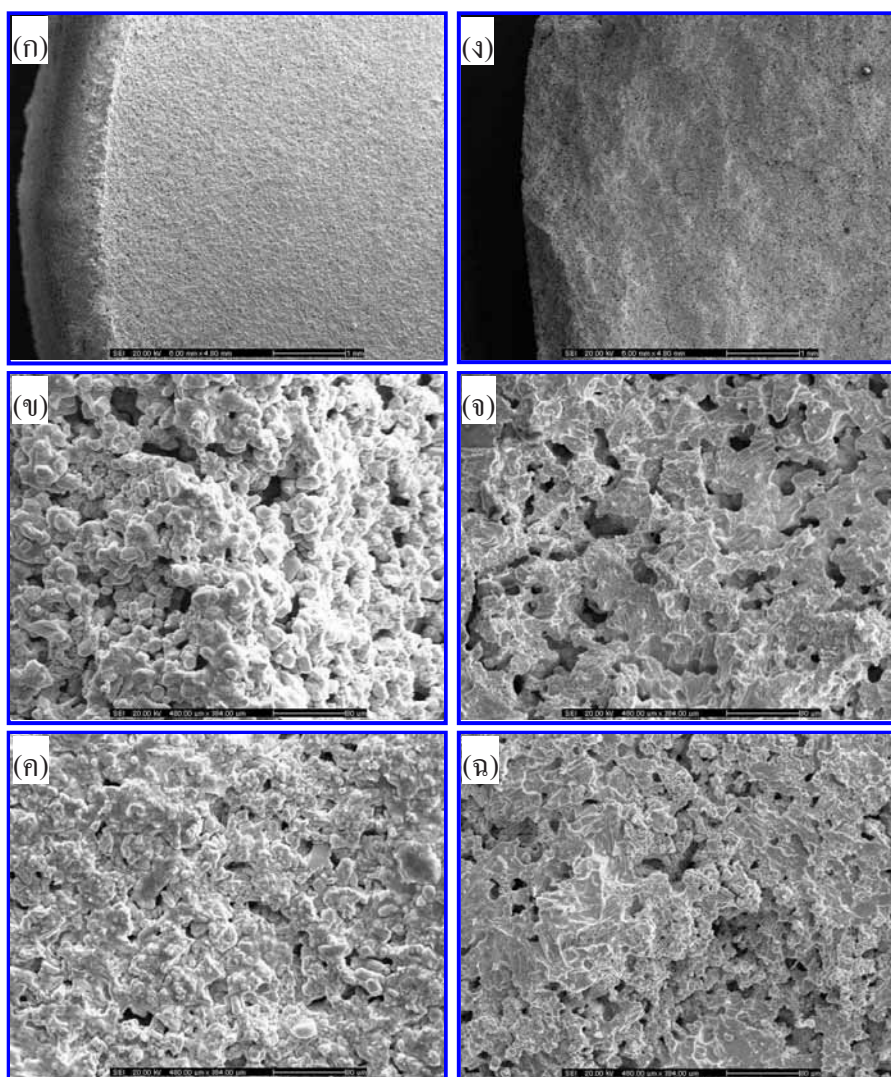
รูป 4.84 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ (ก)–(ค) ผิวด้านนอก (ง)–(ฉ) ภายในเนื้อเม็คสาร



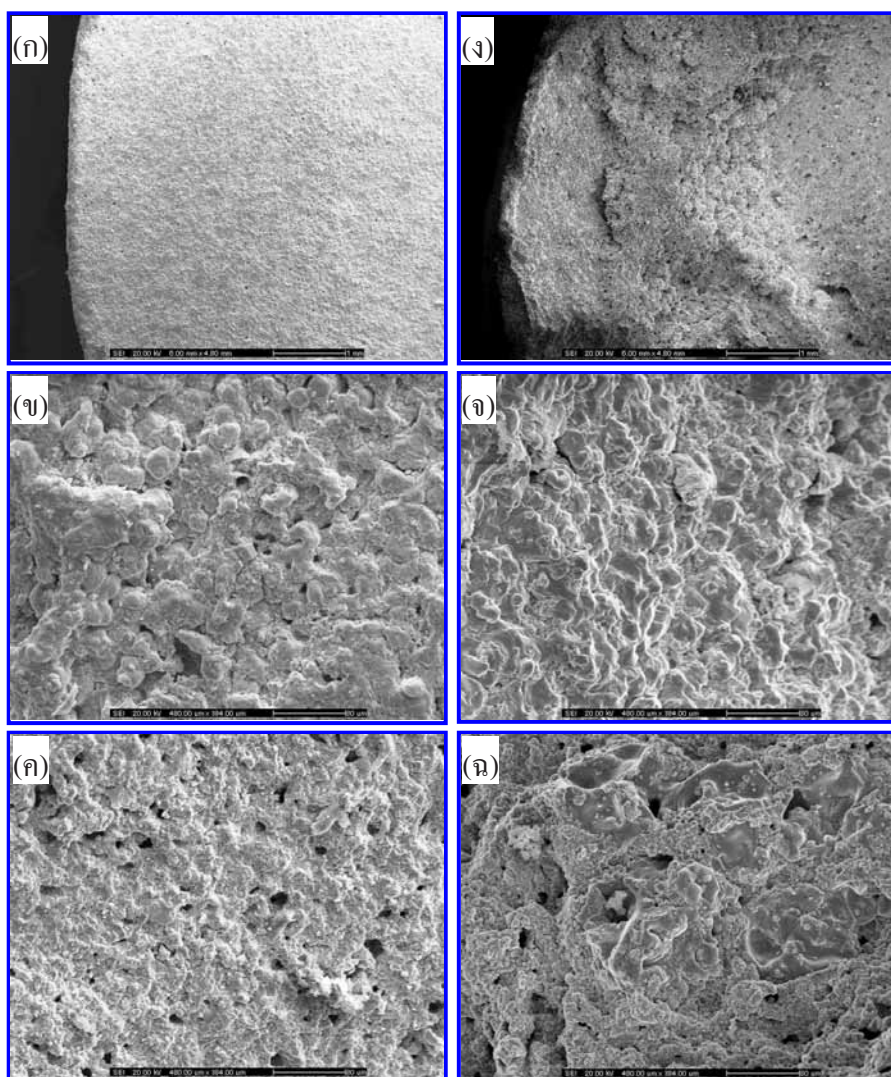
รูป 4.85 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดยึดตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ (ก)–(ค) ผิวด้านนอก (ง)–(ฉ) ภายในเนื้อเม็ดยึด



รูป 4.86 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ (ก)–(ค) ผิวด้านนอก (ง)–(ข) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.87 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ (ก) – (ค) ผิวด้านนอก (ง) – (ฉ) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.88 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดยึดตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ (ก) – (ค) ผิวด้านนอก (ง) – (ฉ) ภายในเนื้อเม็ดยึด

ตาราง 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย (AgO)_{0.1}

สาร เม็ดที่	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเนื้อสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลือบด้วยของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
3	S0	4.81 (ก)	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?
	S1	4.81 (ข)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
	S2														
	S3	4.81 (ค)	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-
	IN0	4.81 (ง)	?	?	?	✓	-	✓	-	✓	-	-	?	?	?
	IN1	4.81 (จ)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
	IN2	4.81 (ฉ)	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-
5	IN3	4.81 (ช)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
	S0	4.82 (ก)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	?	?	?
	S1	4.82 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-
	S2														
	S3	4.82 (ค)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-
	IN0	4.82 (ง)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	?	?	?
	IN1	4.82 (จ)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-
	IN2	4.82 (ฉ)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-

ตาราง 4.20 (ต่อ)

สาร เม็ดสี	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเนื้อสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลือบด้วยของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
6	IN3	4.82 (ข)	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	
	S0	4.83 (ก)	?	?	?	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
	S1	4.83 (ข)	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	S2														
	S3	4.83 (ค)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	
	IN0	4.83 (ง)	?	?	?	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
8	IN1	4.83 (จ)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	
	IN2	4.83 (ฉ)	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	
	IN3	4.83 (ช)	-	✓	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	
	S0	4.84 (ก)	?	?	?	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	S1	4.84 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	
	S2														
	S3	4.84 (ค)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	
	IN0	4.84 (ง)	?	?	?	✓	-	-	✓	-	✓	?	?	?	
	IN1	4.84 (จ)	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	✓	

ตาราง 4.20 (ต่อ)

สาร เมล็ดที่	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะนิสัย						ขนาดของเกรน			
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *			รูพรุน		การเคลือบด้วยของเหลว	
						แน่น	หลวม		มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ
9	IN2											
	IN3	4.84 (ค)	-	✓	-	✓	-		-	✓	✓	-
	S0	4.85 (ก)	✓	✓	-	✓	-		✓	-	✓	-
	S1	4.85 (ข)	-	✓	-	✓	-		✓	-	✓	-
	S2											
10	S3	4.85 (ค)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
	IN0	4.85 (ง)	?	?	?	✓	-		✓	-	✓	-
	IN1	4.85 (ฉ)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
	IN2											
	IN3	4.85 (ค)	✓	✓	-	✓	-		✓	-	✓	-
10	S0	4.86 (ก)	?	?	?	✓	-		-	✓	✓	-
	S1	4.86 (ข)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
	S2											
	S3	4.86 (ค)	-	✓	-	✓	-		-	✓	✓	-
	IN0	4.86 (ง)	✓	✓	-	✓	-		✓	-	✓	-

ตาราง 4.20 (ต่อ)

สาร เมล็ดพืช	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะนิสัย							ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก่อน	แต่ง	การเกาะกลุ่มกัน *			รูพรรณ		การเคลื่อนตัวของเหลว	
						แน่น	หลวม		มาก	น้อย	เคลื่อน	ไม่เคลื่อน
13	IN1	4.86 (ก)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
	IN2	4.86 (ข)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
	IN3	4.86 (ค)	-	✓	-	-	✓		✓	-	-	✓
	S0	4.87 (ก)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
	S1	4.87 (ข)	-	✓	-	✓	-		✓	-	-	✓
	S2											
14	S3	4.87 (ค)	✓	✓	-	✓	-		✓	-	✓	-
	IN0	4.87 (ง)	✓	-	-	✓	-		✓	-	✓	-
	IN1	4.87 (จ)	-	✓	-	✓	-		✓	-	-	✓
	IN2											
	IN3	4.87 (ฉ)	-	✓	-	✓	-		✓	-	✓	-
	S0	4.88 (ก)	✓	-	-	✓	-		-	✓	✓	-
14	S1	4.88 (ข)	-	✓	-	✓	-		-	✓	✓	-
	S2											
	S3	4.88 (ค)	-	✓	-	✓	-		✓	-	✓	-

ตาราง 4.20 (ต่อ)

สาร เม็ดสี	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเนื้อสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว			ใหญ่	กลาง	เล็ก
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลื่อน	ไม่เคลื่อน				
	IN0	4.88 (ง)	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
	IN1	4.88 (จ)	✓	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	
	IN2														
	IN3	4.88 (ฉ)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	

* เม็ดสีตัวอย่างทุกเม็ดมีการเกาะกลุ่มจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ

หมายเหตุ S0 หมายถึง ผิวด้านนอกของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายต่ำ (แถบมาตราส่วน 1 mm)

S1, S2, S3 หมายถึง ผิวด้านนอกบริเวณขอบ ถัดจากขอบเข้าไป และตรงกึ่งกลาง ตามลำดับ ของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง

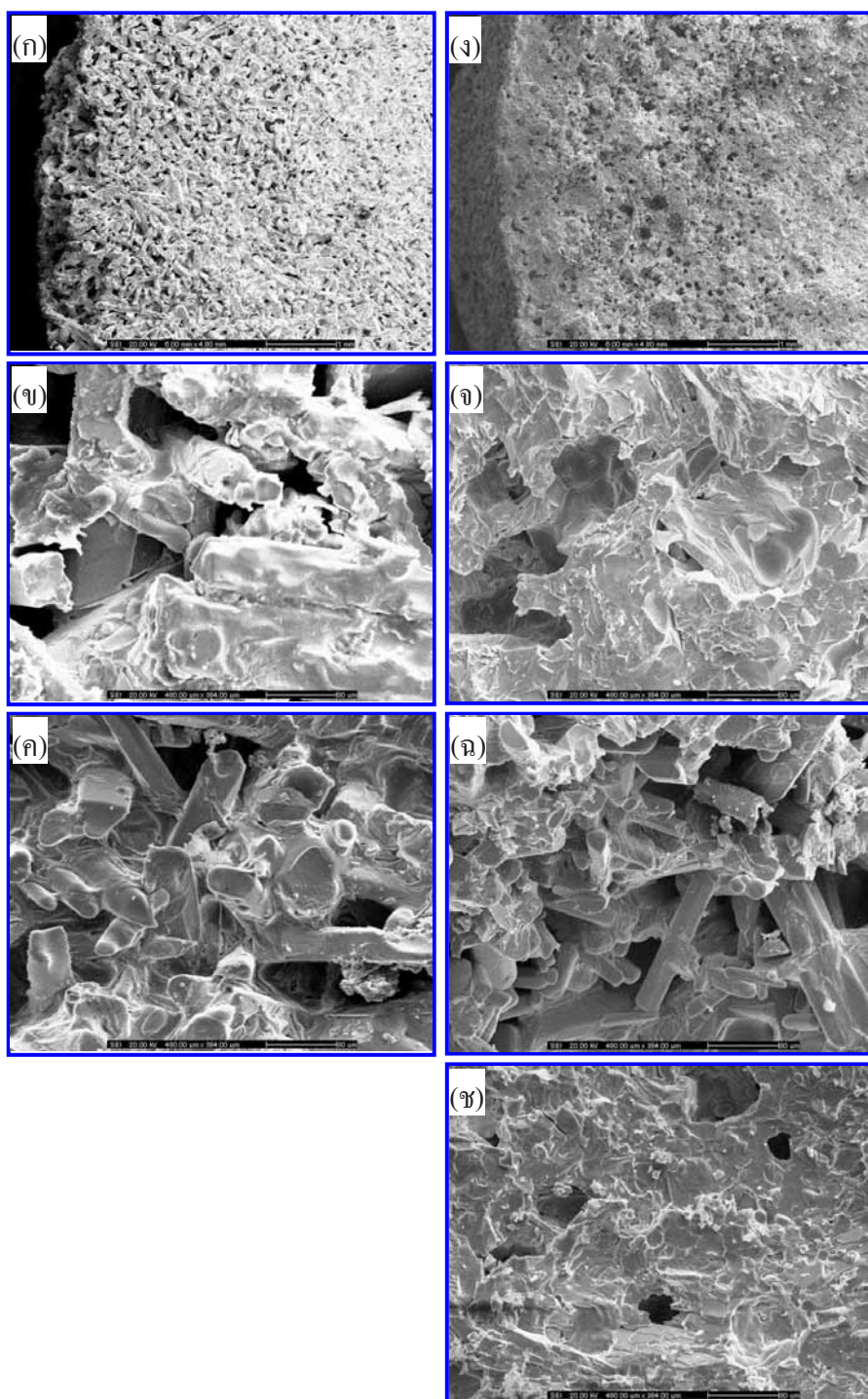
กำลังขยายสูง (แถบมาตราส่วน 80 μm)

IN0 หมายถึง ภายในเนื้อสารของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายต่ำ (แถบมาตราส่วน 1 mm)

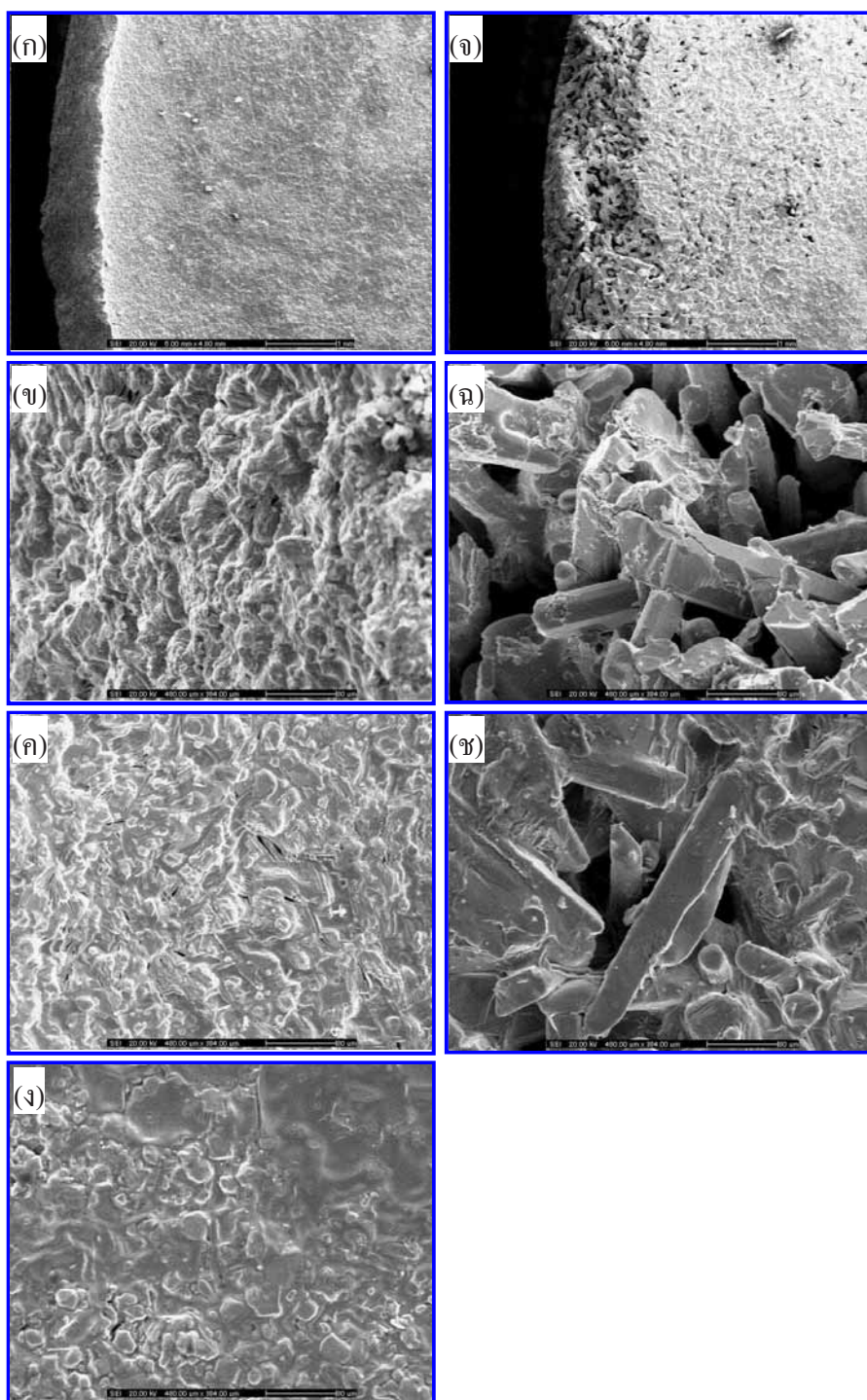
IN1, IN2, IN3 หมายถึง ภายในเนื้อสารบริเวณขอบ ถัดจากขอบเข้าไป และตรงกึ่งกลาง ตามลำดับ ของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง

กำลังขยายสูง (แถบมาตราส่วน 80 μm)

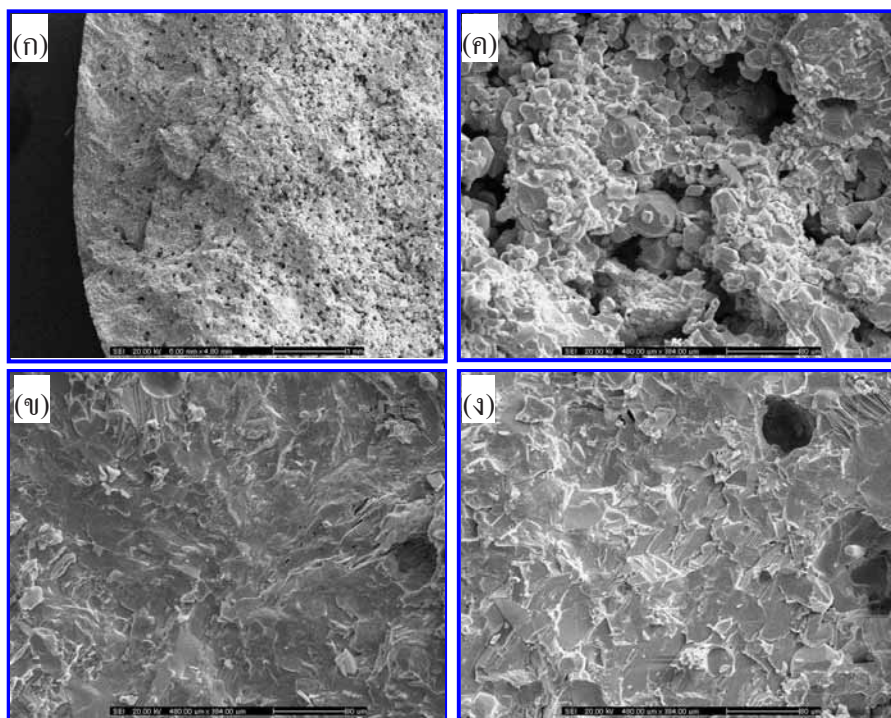
?, -, ✓ หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ภาพได้หรือไม่แน่ใจ วิเคราะห์ภาพแล้วเห็นว่าไม่จริงและจริง ตามลำดับ



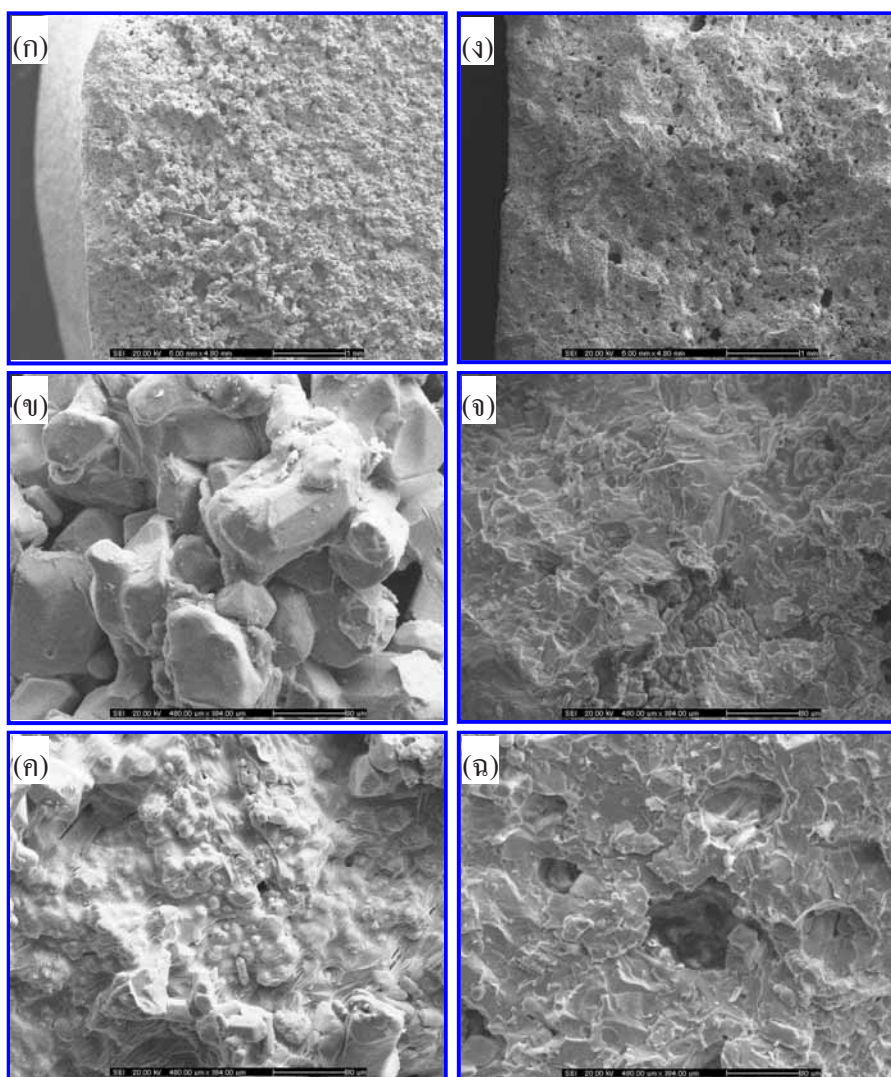
รูป 4.89 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก) – (ค) ผิวค้ำนอก (ง) – (ข) ภายในเนื้อเม็คสาร



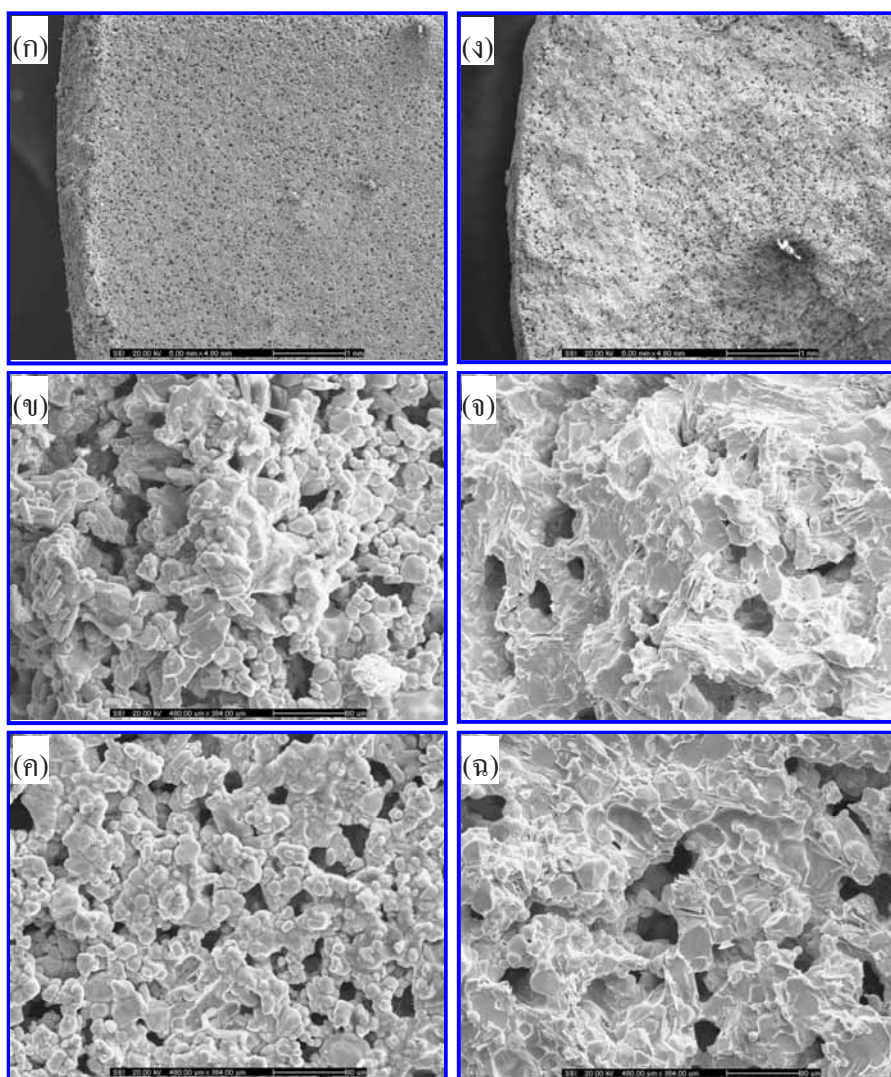
รูป 4.90 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ (ก)–(ช) ผิวค้ำนอก



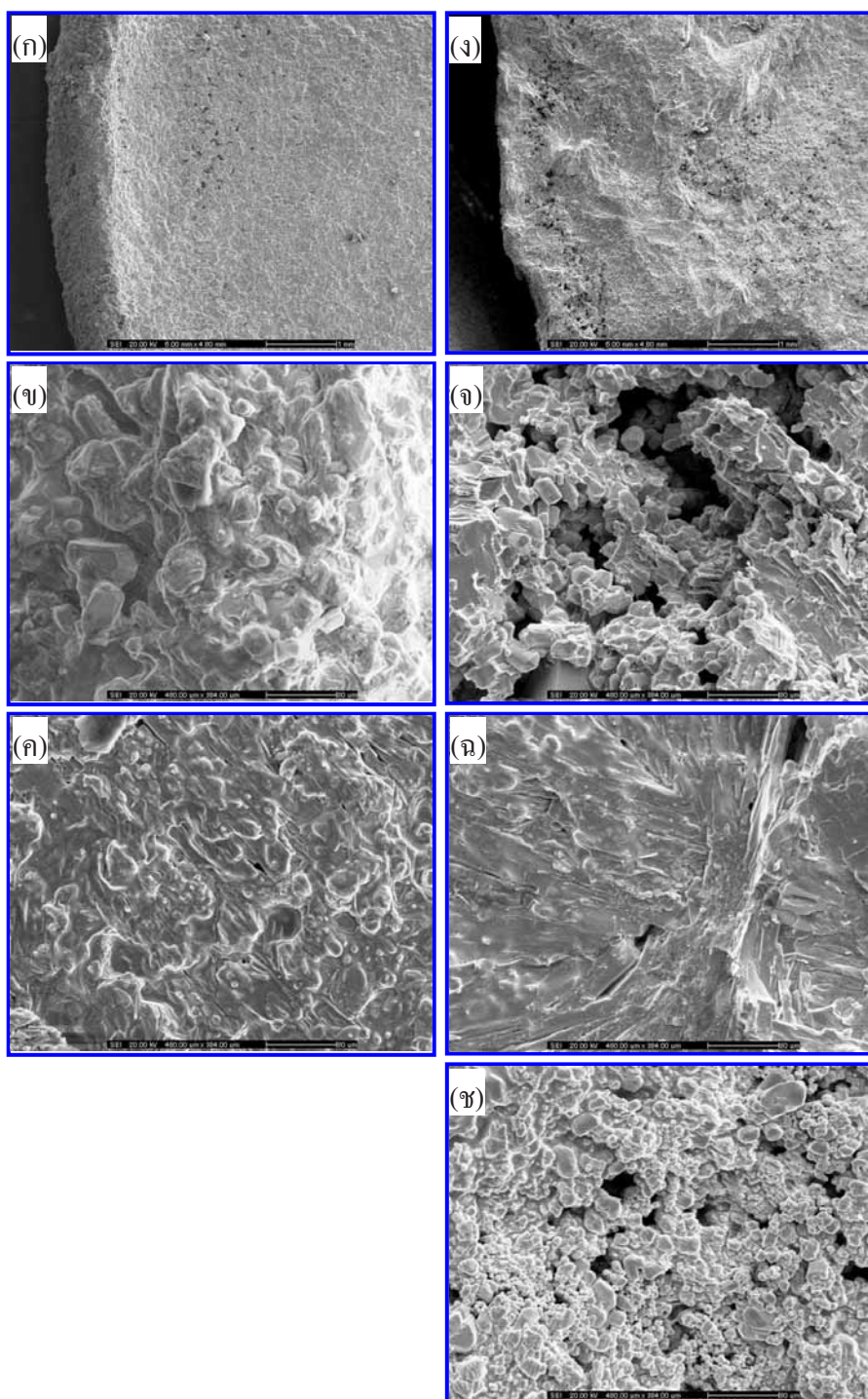
รูป 4.91 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก)–(ง) ภายในเนื้อเม็ดสาร



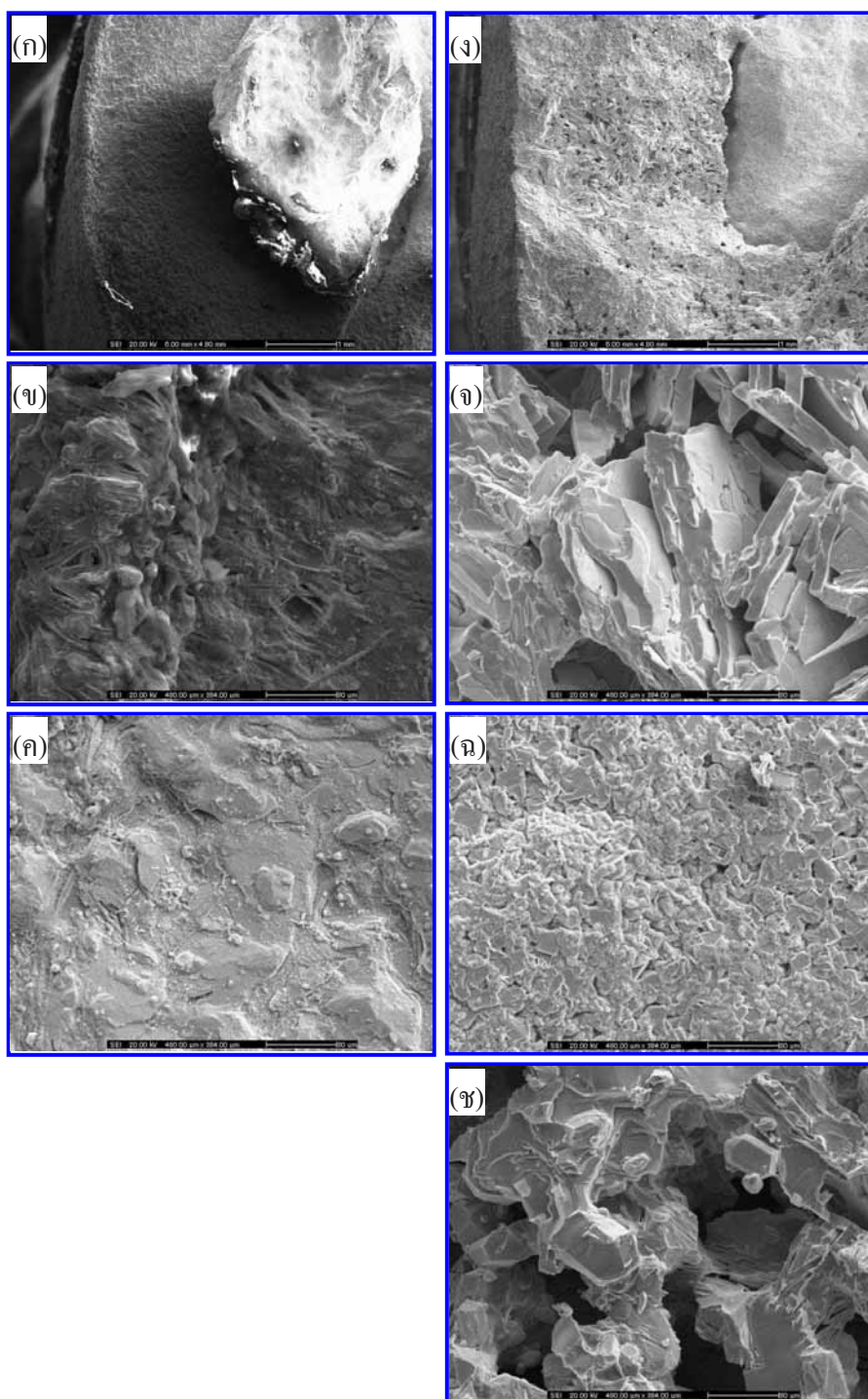
รูป 4.92 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก)–(ค) ผิวด้านนอก (ง)–(ฉ) ภายในเนื้อเม็ดสาร



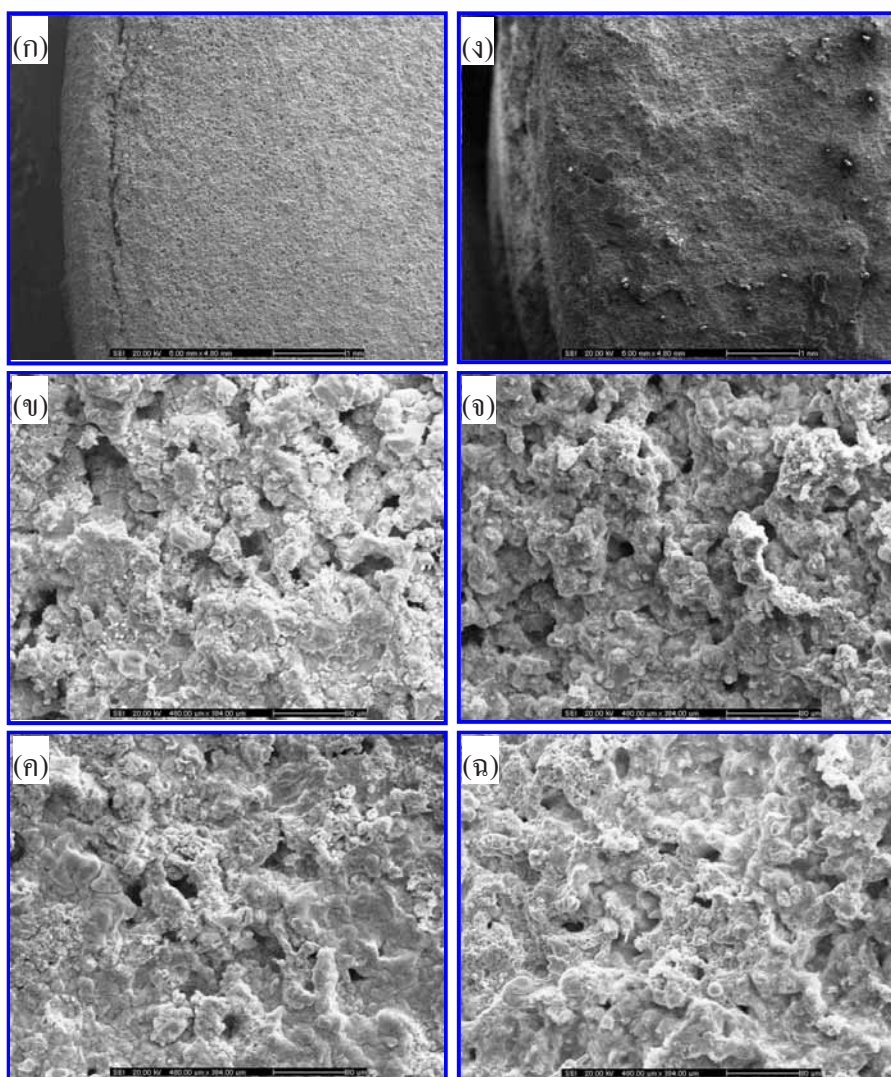
รูป 4.93 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดยาวตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ (ก)–(ค) ผิวด้านนอก (ง)–(ฉ) ภายในเนื้อเม็ดยาว



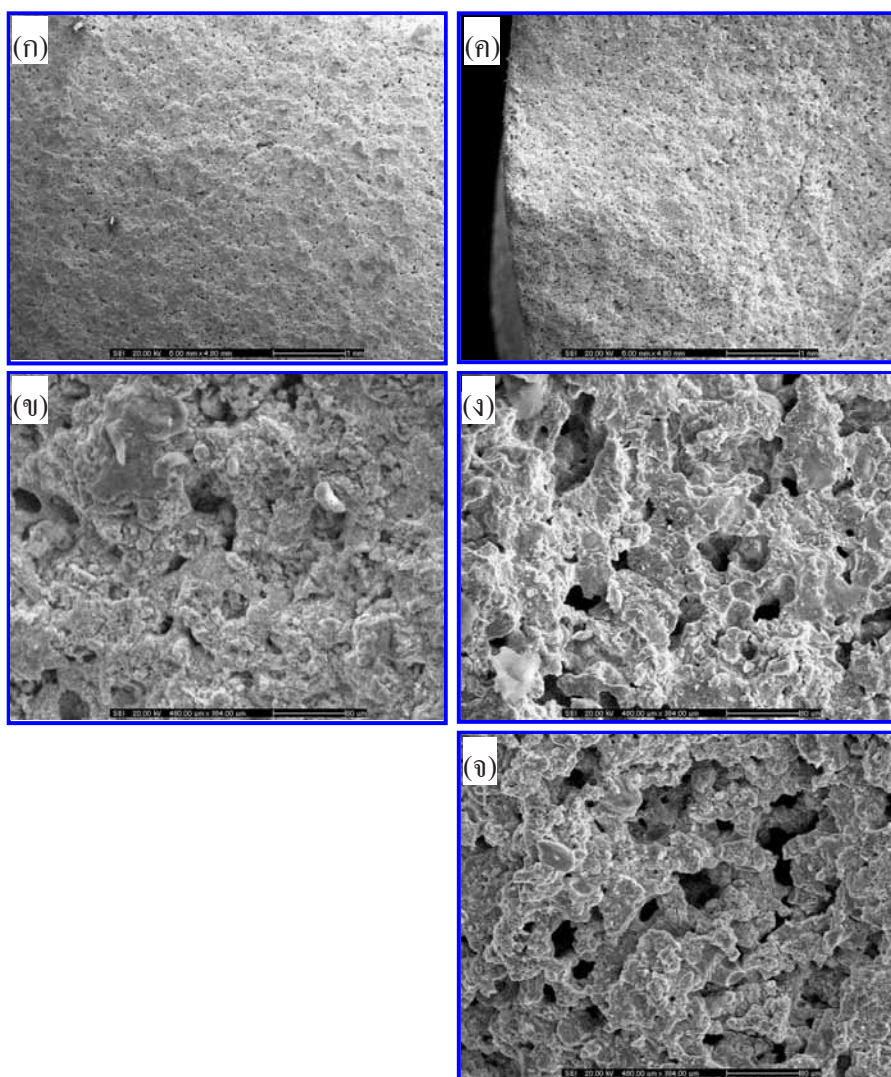
รูป 4.94 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดยาตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก) – (ค) ผิวด้านนอก (ง) – (ช) ภายในเนื้อเม็ดยา



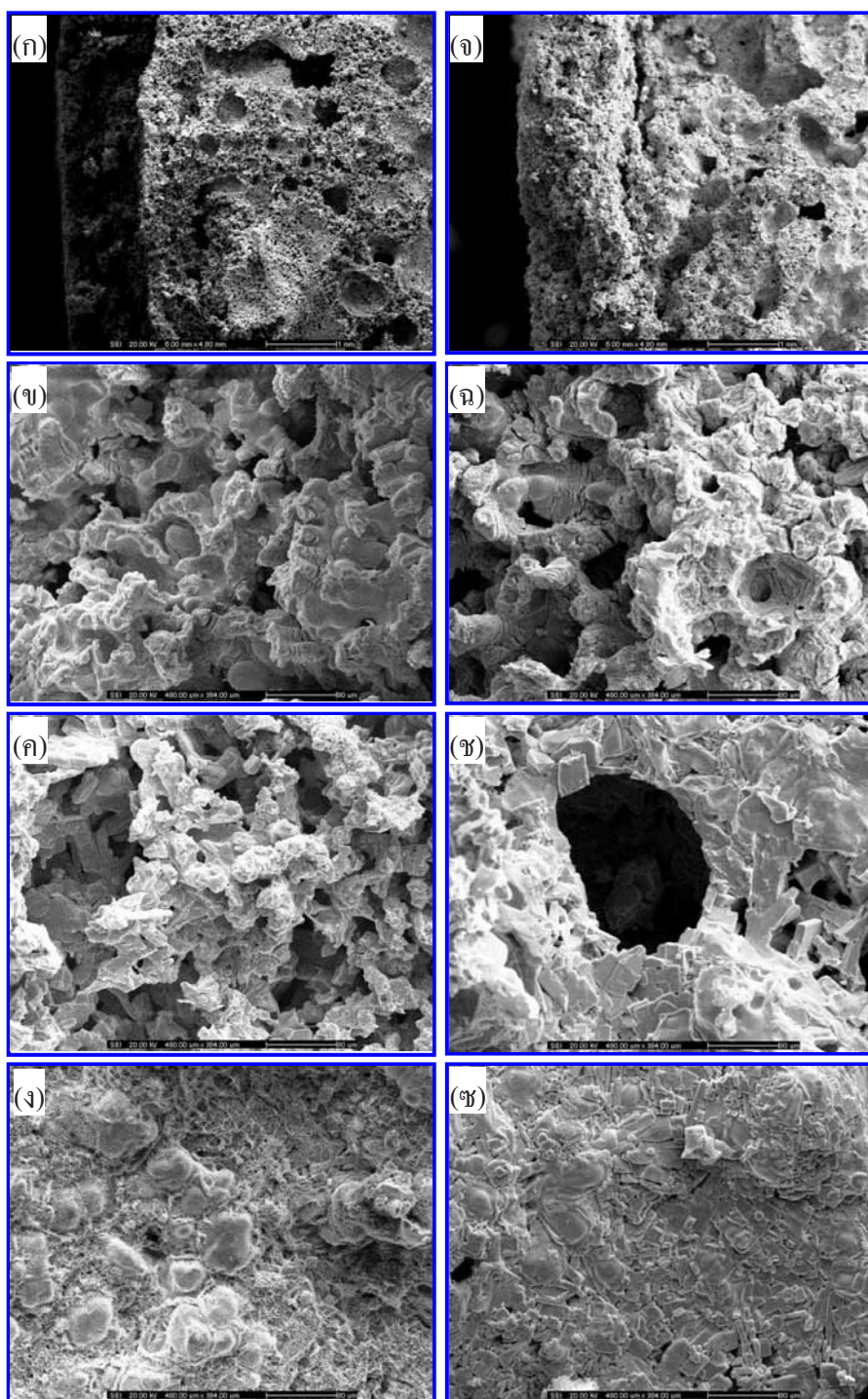
รูป 4.95 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก)–(ค) ผิวด้านนอก (ง)–(ข) ภายในเนื้อเม็ดสาร



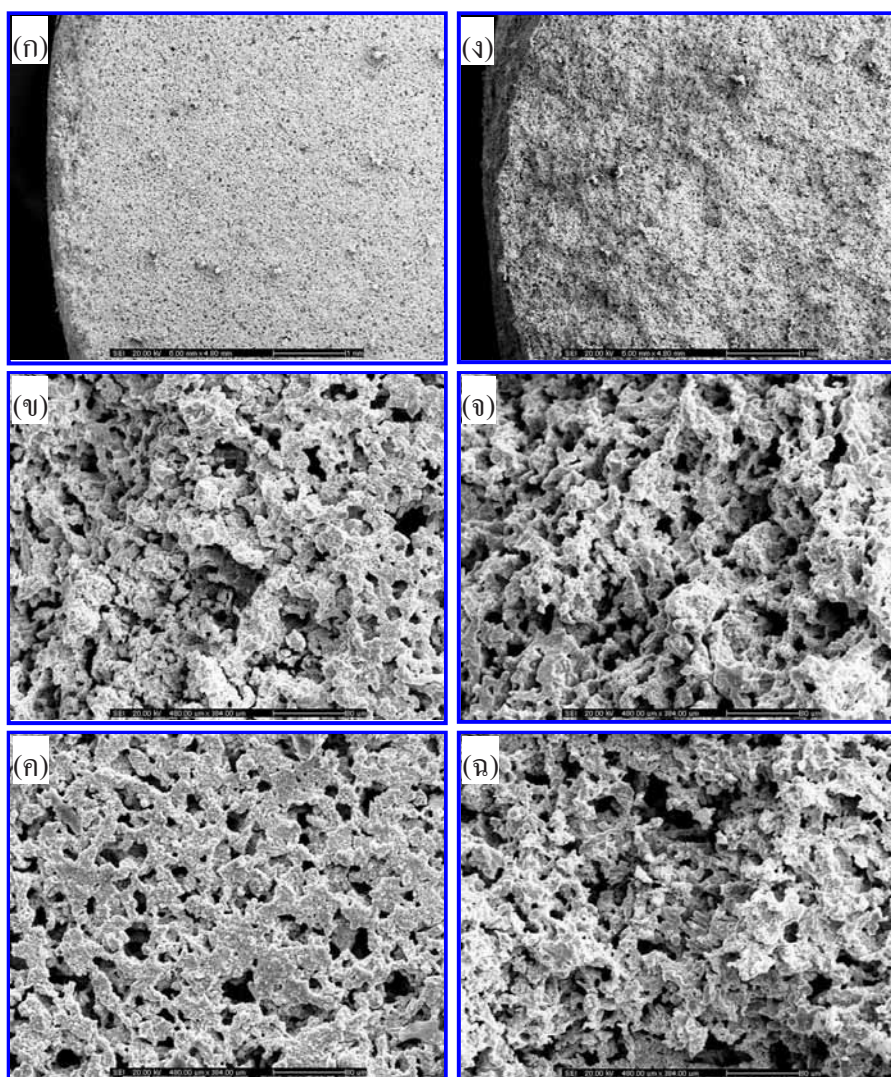
รูป 4.96 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดยาตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก) – (ค) ผิวด้านนอก (ง) – (ฉ) ภายในเนื้อเม็ดยา



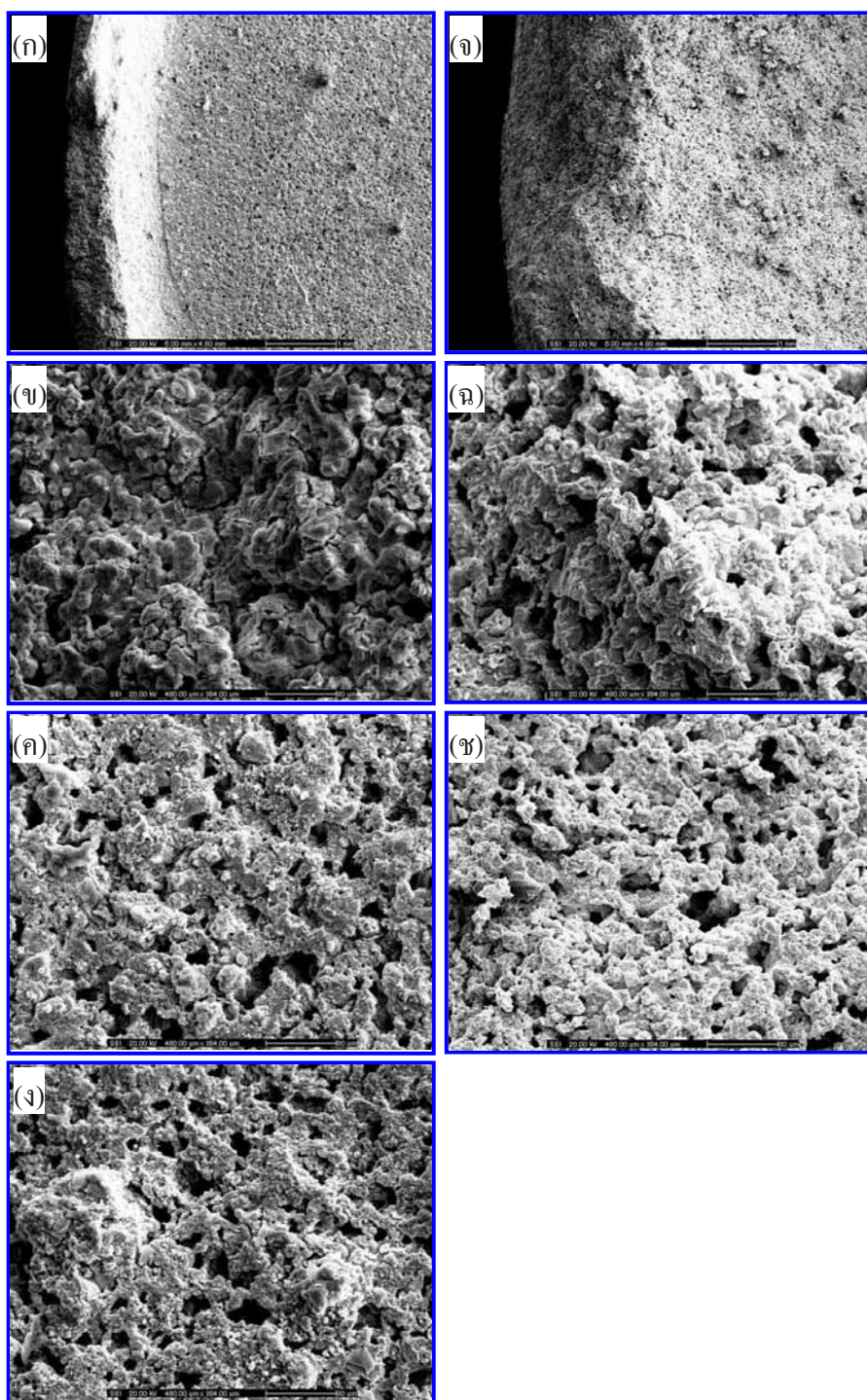
รูป 4.97 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก) – (ง) ผิวด้านนอก (ค) – (ฉ) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.98 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก)–(ง) ผิวด้านนอก (จ)–(ข) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.99 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็ดสารตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก) – (ค) ผิวด้านนอก (ง) – (ฉ) ภายในเนื้อเม็ดสาร



รูป 4.100 แสดงภาพถ่าย SEM ของเม็คสารตัวอย่างที่ 19 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO
 เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ก)–(ง) ผิวด้านนอก (จ)–(ซ) ภายในเนื้อเม็คสาร

ตาราง 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของเม็ดยึดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เชื้อด้วย (Ag₂O)_{0.2}

สาร เม็ดยึด	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเนื้อสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
3	S0	4.89 (ก)	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	S1	4.89 (ข)	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	S2														
	S3	4.89 (ค)	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	IN0	4.89 (ง)	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
	IN1	4.89 (จ)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	IN2	4.89 (ฉ)	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-	
5	IN3	4.89 (ช)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	S0_1	4.90 (ก)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	S1_1	4.90 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	
	S2_1	4.90 (ค)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	
	S3_1	4.90 (ง)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	
	S0_2	4.90 (จ)	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	S1_2	4.90 (ฉ)	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-	

ตาราง 4.21 (ต่อ)

สาร เม็ดสี	ตำแหน่ง	รูป	แผ่น	ก้อน	แฟ้ง	ลักษณะนิสัย						ขนาดของกรน		
						การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลื่อน	ไม่เคลื่อน			
	S2_2													
	S3_2	4.90 (ซ)	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-
	IN0	4.91 (ก)	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?
	IN1	4.91 (ญ)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-
	IN2	4.91 (ค)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓
	IN3	4.91 (ง)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-
	S0	4.92 (ก)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-
6	S1	4.92 (ญ)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	-
	S2													
	S3	4.92 (ค)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-
	IN0	4.92 (ง)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?
	IN1	4.92 (จ)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-
	IN2													
	IN3	4.92 (ฉ)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-

ตาราง 4.21 (ต่อ)

สาร เมดิที	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะนิสัยสาร										ขนาดของกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
8	S0	4.93 (ก)	?	?	?	✓	-	✓	-	✓	?	?	?		
	S1	4.93 (ข)	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	✓		
	S2														
	S3	4.93 (ค)	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓		
	IN0	4.93 (ง)	?	?	?	✓	-	✓	-	✓	?	?	?		
9	IN1	4.93 (จ)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-		
	IN2														
	IN3	4.93 (ฉ)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-		
	S0	4.94 (ก)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	?	?	?		
	S1	4.94 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-		
	S2														
	S3	4.94 (ค)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-		
	IN0	4.94 (ง)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	?	?	?		
	IN1	4.94 (จ)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓		
	IN2	4.94 (ฉ)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-		

ตาราง 4.21 (ต่อ)

สาร เม็ดสี	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเนื้อสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
10	IN3	4.94 (ซ)	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	✓	
	S0	4.95 (ก)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	S1	4.95 (ข)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	
	S2														
	S3	4.95 (ค)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	
	IN0	4.95 (ง)	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	?	?	
13	IN1	4.95 (จ)	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	
	IN2	4.95 (ฉ)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	
	IN3	4.95 (ช)	✓	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	S0	4.96 (ก)	?	?	?	✓	-	-	✓	✓	-	?	?	?	
	S1	4.96 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	
	S2														
	S3	4.96 (ค)	✓	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	
	IN0	4.96 (ง)	?	?	?	✓	-	-	✓	-	✓	?	?	?	
	IN1	4.96 (จ)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	

ตาราง 4.21 (ต่อ)

สาร เม็ดสี	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะนิสัย										ขนาดของกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลือบด้วยของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก	
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
	IN2														
	IN3	4.96 (ก)	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	
	S0	4.97 (ก)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
	S1														
	S2														
	S3	4.97 (ข)	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	
	IN0	4.97 (ค)	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	?	?	?	
	IN1	4.97 (ง)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	
	IN2														
	IN3	4.97 (จ)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	
	S0	4.98 (ก)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	?	?	?	
	S1	4.98 (ข)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	
	S2	4.98 (ค)	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	
	S3	4.98 (ง)	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	
	IN0	4.98 (จ)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	?	?	?	

ตาราง 4.21 (ต่อ)

สาร เม็ดสี	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเนื้อสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *			รูพรุน		การเคลื่อนตัวของเหลว		ใหญ่	กลาง	เล็ก
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
	IN1	4.98 (ก)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-
	IN2	4.98 (ข)	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-
	IN3	4.98 (ข)	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-
	S0	4.99 (ก)	?	?	?	✓	-	✓	-	-	✓	?	?	?	?
	S1	4.99 (ก)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓
18	S2														
	S3	4.99 (ค)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓
	IN0	4.99 (ง)	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	?	?	?	?
	IN1	4.99 (จ)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓
	IN2														
19	IN3	4.99 (ฉ)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓
	S0	4.100 (ก)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	?	?	?	?
	S1	4.100 (ก)	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-
	S2	4.100 (ค)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓
	S3	4.100 (ง)	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓

ตาราง 4.21 (ต่อ)

สาร เม็ดสี	ตำแหน่ง	รูป	ลักษณะเนอสสาร										ขนาดของเกรน		
			แผ่น	ก้อน	แท่ง	การเกาะกลุ่มกัน *		รูพรุน		การเคลือบด้วยของเหลว			ใหญ่	กลาง	เล็ก
						แน่น	หลวม	มาก	น้อย	เคลือบ	ไม่เคลือบ				
	IN0	4.100 (จ)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	?	?	?
	IN1	4.100 (ข)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-
	IN2														
	IN3	4.100 (ง)	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-	✓

* เม็ดสีตัวอย่างทุกเม็ดมีการเกาะกลุ่มจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ

หมายเหตุ S0 หมายถึง ผิวด้านนอกของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายต่ำ (แถบมาตราส่วน 1 mm)

S1, S2, S3 หมายถึง ผิวด้านนอกบริเวณขอบ ถัดจากขอบเข้าไป และตรงกึ่งกลาง ตามลำดับ ของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง

กำลังขยายสูง (แถบมาตราส่วน 80 μm)

IN0 หมายถึง ภายในเนื้อสารของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง กำลังขยายต่ำ (แถบมาตราส่วน 1 mm)

IN1, IN2, IN3 หมายถึง ภายในเนื้อสารบริเวณขอบ ถัดจากขอบเข้าไป และตรงกึ่งกลาง ตามลำดับ ของเม็ดสีตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่ง

กำลังขยายสูง (แถบมาตราส่วน 80 μm)

?, -, ✓ หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ภาพได้หรือไม่แน่ใจ วิเคราะห์ภาพแล้วเห็นว่าไม่จริงและจริง ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ในการเตรียมเม็ดสารตัวอย่างตามสูตร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z+(Ag_2O)_\delta$ เมื่อค่า x, y, z คือ สัดส่วนของสารประกอบ Y_2O_3, BaO, CuO และ $\delta = 0.0, 0.1, 0.2$ ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO โดยถ้าไม่เจือ Ag_2O ($\delta = 0.0$) มีเงื่อนไขสัดส่วนเป็น $1 \leq x \leq 3, 2 \leq y \leq 4, 4 \leq z \leq 6$ ยกเว้น $x = 3, y = 2, z = 5$ มีจำนวน 6 เม็ด, ถ้าเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ ($\delta = 0.1$) มีเงื่อนไขสัดส่วนเป็น $1 \leq x \leq 3, 2 \leq y \leq 4, 4 \leq z \leq 7$ มีจำนวน 8 เม็ด, ถ้าเจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ ($\delta = 0.2$) มีเงื่อนไขสัดส่วนเป็น $1 \leq x \leq 4, 2 \leq y \leq 5, 3 \leq z \leq 7$ มีจำนวน 11 เม็ด หลังจากนั้นนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ $950^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า สารตัวอย่างหลังเผามีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

5.1.1 ลักษณะของเม็ดสารตัวอย่างเมื่อไม่เจือ Ag_2O ลักษณะส่วนใหญ่มีสีดำปนเขียว แว่ววาว เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนใหญ่ลดลง มีความหนา มวลสาร และปริมาตรลดลง แสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ทุกเม็ด

เม็ดสารตัวอย่างที่เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ ลักษณะส่วนใหญ่มีสีดำแว่ววาว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา มวลสาร และปริมาตรลดลง แสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ทุกเม็ด

เม็ดสารตัวอย่างที่เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$ ลักษณะส่วนใหญ่มีสีดำแว่ววาว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาและปริมาตรส่วนใหญ่ลดลง มีมวลสารลดลง ส่วนใหญ่แสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 19)

เนื้อสารสีเขียว คาดว่าเป็นสารประกอบ Y_2BaCuO_5 ส่วนเนื้อสารส่วนใหญ่ที่มีขนาดลดลงนั้น เกิดจากการหลอมเหลวของเนื้อสารติดกันภาชนะขณะทำการเผา

5.1.2 จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงที่พันรอบเม็ดสารตัวอย่างเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 77 K ไปจนถึงอุณหภูมิห้อง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของค่าความเหนี่ยวนำสัมพันธ์กับการเพิ่มอุณหภูมิและมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหรือมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะนำยวดยิ่งไปสู่สถานะปกติที่จุดอุณหภูมิวิกฤต โดย

5.1.2.1 ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ไม่เจือ Ag_2O , เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ ที่หาได้โดยวิธีนี้ พบว่า ทุกเม็ดมีค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ มากกว่าค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ที่หาได้จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (ภาคผนวก ข) คาดว่าเกิดจากการกักเก็บฟลักซ์แม่เหล็กไว้ภายในบริเวณที่มีความบกพร่องโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างในขณะที่ใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปภายในเนื้อสารตัวอย่างขณะทำการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

5.1.2.2 ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ และ $T_{c(\text{mid})}$ พบว่า เม็ดสารตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่า $T_{c(\text{inflect})}$ มากกว่า $T_{c(\text{mid})}$ (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 และ 8) คาดว่าเกิดจากการที่เม็ดสารตัวอย่างมีรูปร่างเป็นรูปทรงกระบอกและค่าความจุความร้อนรวมของเม็ดสารตัวอย่างที่เกิดจากค่าความจุความร้อนของเนื้อสารตัวนำยวดยิ่ง เนื้อสารที่กำลังเปลี่ยนสถานะและเนื้อสารที่เปลี่ยนสถานะเป็นสถานะปกติแล้ว มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารตัวนำยวดยิ่งกำลังมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะนำยวดยิ่งไปยังสถานะปกติ จากผิวนอกสุดไปยังภายในเนื้อสาร เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากผิวด้านนอกไปยังภายในเนื้อสารในแนวรังสี ซึ่งค่าความจุความร้อนรวมที่มีค่าเพิ่มขึ้นนี้มีผลทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลงเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดง ส่งผลทำให้ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิมียูค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{inflect})}$ หลังจากนั้นค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนสถานะได้หมดพอดี

5.1.2.3 ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{inflect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ มีค่าลดลงเมื่อเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 9 และ 13 มีค่าเพิ่มขึ้น) คาดว่าเกิดจากการกักเก็บฟลักซ์แม่เหล็กไว้ภายในบริเวณที่มีความบกพร่องโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างน้อยลง เนื่องจากสารตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้นเมื่อมีการเจือด้วย Ag_2O

5.1.3 เมื่อทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับอุณหภูมิ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ไม่เจือ Ag_2O , เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ พบว่า

5.1.3.1 ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ΔT ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า ΔT และมากกว่า ΔT_{pp} ตามลำดับ (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 มีค่า ΔT น้อยกว่า ΔT_{pp}) คาดว่าเกิดจากการกระจายตัวของเนื้อสารตัวนำวยดยั้งที่ไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ได้พีคที่ไม่สมมาตรและฐานของพีคกว้าง

5.1.3.2 ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ΔT , ΔT และ ΔT_{pp} พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 9 และ 13 มีค่าลดลง) เมื่อมีการเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ คาดว่าเกิดจากมีปริมาณสารเจือปนมากขึ้นเมื่อเจือด้วย Ag_2O

5.1.3.3 ค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำ $\mathcal{E}_L$ กับค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด $L'_{\max}$ พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ΔT มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป 10 – 12 (ภาคผนวก ก) คาดว่าเกิดจากการที่มีสัดส่วนปริมาณเนื้อสารตัวนำวยดยั้งลดลงและมีสัดส่วนปริมาณเนื้อสารเจือปนมากขึ้นภายในเนื้อของเม็ดสารตัวอย่าง

5.1.3.4 ค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำ $\mathcal{E}_L$ พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 และ 10 มีค่าลดลง) เมื่อมีการเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ คาดว่าเกิดจากสารตัวอย่างมีโครงสร้างที่สมบูรณ์มากขึ้นเมื่อมีการเจือด้วย Ag_2O ทำให้มีการกักเก็บฟลักซ์แม่เหล็กน้อยลง ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด $L'_{\max}$ มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 9 และ 13 และมีค่าลดลงสำหรับเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 10 และ 14

5.1.3.5 เม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดมีค่าตัวแปรอสมมาตรไม่เป็นศูนย์ ทำให้ทราบว่ามีความไม่สมมาตรในการเปลี่ยนสถานะของสารตัวอย่างทุกเม็ด คาดว่าเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนรวมของเม็ดสารตัวอย่างรูปร่างทรงกระบอกที่ไม่สมมาตรตามแนวรังสี ดังเช่นข้อ 5.1.2.2

5.1.4 จากการหาค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 77 K ไปจนถึงอุณหภูมิห้อง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของค่าระยะเจาะลึกยังผลสัมพันธ์กับการเพิ่มอุณหภูมิและมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหรือมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะนำวยดยั้งไปสู่สถานะปกติที่จุดอุณหภูมิวิกฤต โดย

5.1.4.1 ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ ที่หาได้โดยวิธีนี้ มีค่าเท่ากับกับในข้อ 5.1.2.1 ดังนั้นเม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดจึงมีค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ มากกว่าค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ที่หาได้

จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (ภาคผนวก ข) ด้วยเช่นกัน อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.2.1

5.1.4.2 ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{infect})}$ และ $T_{c(\text{mid})}$ มีค่าแตกต่างจากข้อ 5.1.2.2 เพียงเล็กน้อย แต่ก็ยังพบว่า เม็ดสารตัวอย่างส่วนใหญ่ยังคงมีค่า $T_{c(\text{infect})}$ มากกว่า $T_{c(\text{mid})}$ (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 และ 8) อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.2.2

5.1.4.3 ค่าอุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$, $T_{c(\text{infect})}$, $T_{c(\text{mid})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ มีค่าลดลงเมื่อเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 9 และ 13 มีค่าเพิ่มขึ้น) เช่นกัน อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.2.3

5.1.5 เมื่อทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลเทียบกับอุณหภูมิ ของเม็ดสารตัวอย่างที่ไม่เจือ Ag_2O , เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ พบว่า

5.1.5.1 ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ΔT , ΔT และ ΔT_{pp} มีค่าแตกต่างจากข้อ 5.1.3.1 แต่อย่างไรก็ตามยังคงพบว่า ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ΔT ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า ΔT และมากกว่า ΔT_{pp} ตามลำดับ (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 มีค่า ΔT น้อยกว่า ΔT_{pp}) อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.3.1

5.1.5.2 ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ΔT , ΔT และ ΔT_{pp} พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 9 และ 13 มีค่าลดลง) เมื่อมีการเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.3.2

5.1.5.3 ค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ϵ_λ กับค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด λ'_{max} พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ ΔT มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป 22 – 24 (ภาคผนวก ก) อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.3.3

5.1.5.4 ค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผล ϵ_λ พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น (ยกเว้น เม็ดสารตัวอย่างที่ 5 และ 10 มีค่าลดลง) เมื่อมีการเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.3.4 ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด λ'_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับเม็ดสารตัวอย่างที่ 6, 9 และ 13 และมีค่าลดลงสำหรับเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 10 และ 14

5.1.5.5 เม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดมีค่าตัวแปรอสมมาตรไม่เป็นศูนย์ ทำให้ทราบว่ามีความไม่สมมาตรในการเปลี่ยนสถานะของสารตัวอย่างทุกเม็ดเช่นกัน อธิบายได้ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับข้อ 5.1.3.5

5.1.6 การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของค่าระยะเจาะลึกยังผลสัมพันธ์กับการเพิ่มอุณหภูมิ มาตรการส่วนลอการิทึม พบว่า เม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดมีค่าความชันหรือค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิ ลดทอน α มากกว่า 4 (สมการ (2.47), (2.91) และ รูป 2.24) และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ คาดว่าเกิดจากสารตัวอย่างมีรูปร่างทรงกระบอกและมีโครงสร้างผลึกที่ สมบูรณ์มากขึ้นเมื่อเจือด้วย Ag_2O ทำให้ค่าระยะเจาะลึกยังผลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่มี การเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่าง

5.1.7 จากการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM พบว่า ลักษณะเกรนและลักษณะเนื้อสารตัวอย่าง เมื่อไม่เจือ Ag_2O เนื้อสารผิวด้านนอกส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นก้อนและเป็นแผ่นเกาะกลุ่มรวมกัน แน่น มีรูพรุนเล็กน้อย เคลือบด้วยเนื้อสารที่หลอมเหลว เกรนมีขนาดปานกลางและเล็ก ภายใน เนื้อสารตัวอย่างเนื้อสารมีลักษณะเป็นแผ่น เป็นก้อนและเป็นแท่ง ส่วนใหญ่มีการเกาะกลุ่มรวมกัน แน่น มีรูพรุนมาก ไม่มีการเคลือบด้วยเนื้อสารที่หลอมเหลว เกรนมีขนาดปานกลางและเล็ก

เม็ดสารตัวอย่างที่เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เนื้อสารผิวด้านนอกส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่น และเป็นก้อนเกาะกลุ่มรวมกันแน่น มีรูพรุน เคลือบด้วยเนื้อสารที่หลอมเหลว เกรนมีขนาด ปานกลางและเล็ก ภายในเนื้อสารตัวอย่างเนื้อสารส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่นและเป็นก้อน เกาะกลุ่มรวมกันแน่น มีรูพรุนมาก เคลือบด้วยเนื้อสารที่หลอมเหลว เกรนมีขนาดปานกลางและ เล็ก

เม็ดสารตัวอย่างที่เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เนื้อสารผิวด้านนอกส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นก้อน เกาะกลุ่มรวมกันแน่น มีรูพรุน เคลือบด้วยเนื้อสารที่หลอมเหลว เกรนมีขนาดใหญ่ ภายในเนื้อ สารตัวอย่างเนื้อสารส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นก้อนและเป็นแผ่น มีการเกาะกลุ่มรวมกันแน่น มีรูพรุน มาก เคลือบด้วยเนื้อสารที่หลอมเหลว เกรนมีขนาดปานกลางและเล็ก

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการที่อุณหภูมิวิกฤต $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเม็ดสารตัวอย่างทุกเม็ดที่ได้จากวัด ค่าความเหนี่ยวนำเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมีค่ามากกว่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ที่หาได้จากการวัดค่า ความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (ภาคผนวก ข) อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุ 1 ใน 2 ประการนี้ คือ

5.2.1 ความผิดพลาดเชิงระบบในการควบคุมอุณหภูมิขณะกำลังทดลอง หรือ

5.2.2 จากการที่สารตัวอย่างมีการเปลี่ยนสถานะทางแม่เหล็กและสถานะทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิวิกฤตแตกต่างกัน โดยมีอุณหภูมิวิกฤตของการเปลี่ยนสถานะทางแม่เหล็กสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของการเปลี่ยนสถานะทางไฟฟ้า

ดังนั้น จึงควรมีการวัดและวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิวิกฤตของการเปลี่ยนสถานะทางแม่เหล็กและสถานะทางไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขของระบบและเวลาเดียวกัน

บรรณานุกรม

- กำชัย ศรีชัยรัศมี, จำนงค์ ฉายเชิด, พุศศักดิ์ อินทวิ และ สวณศิริ รุ่งเกียรติสกุล, “แผนภาพ
สมมูลของระบบ Y-Ba-Cu-O ที่ 950°C ,” วารสารโลหะ วัสดุ และแร่ 5, 2 (มิถุนายน
2539) : 57 – 64.
- คูสิต เครื่องาม. **โซลิตสเททฟิสิกส์**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2535.
- เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. **วัสดุศาสตร์มูลฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2546.
- Bardeen, J., L.N. Cooper, and J.R. Schrieffer. “Theory of Superconductivity.” **Physical
Review**, 108 (1957) : 1175 – 1204.
- Bonalde, Ismardo, Brian D. Yanoff, Myron B. Salamon, and Elbert E.M. Chia.
“Nonlocality in superconducting metals : an ultra-high precision magnetic
penetration depth study.” **Physica B**, 329 – 333 (2003) : 1373 – 1374.
- Bourdillon, A., and N.X. Tan Bourdillon. **High Temperature Superconductors : Processing
and Science**. Boston : Academic Press, 1994.
- Buckel, Werner, and Reinhold Kleiner. **Superconductivity : Fundamentals and
Applications**. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2004.
- Burns, Gerald. **High-Temperature Superconductivity : An Introduction**. Boston :
Academic Press, 1992.
- Casalbuoni, Roberto. **Lecture Notes on Superconductivity : Condensed Matter and QCD**
[Online]. Lectures at the University of Barcelona, Spain, September–October
2003. Available from <http://theory.fi.infn.it/casalbuoni/barcellona.pdf>
- Delayen, Jean. **SRF for Accelerators : Basics** [Online]. Accessed 24 April 2006. Available
from [http://casa.jlab.org/publications/viewgraphs/lecture/delayen_uva_2006_lect4_24](http://casa.jlab.org/publications/viewgraphs/lecture/delayen_uva_2006_lect4_24.pdf)
.pdf
- Hook, J.R., and H.E. Hall. **Solid State Physics**. 2nd ed. Chichester : John Wiley, 1999.
- Huebener, R.P. **Magnetic Flux Structures in Superconductors**. 2nd ed. Berlin : Springer,
2001.
- Ibach, Harald, and Hans Luth. **Solid-state physics : an Introduction to Principle of
Materials Science**. 2nd ed. Berlin : Springer, 1995.

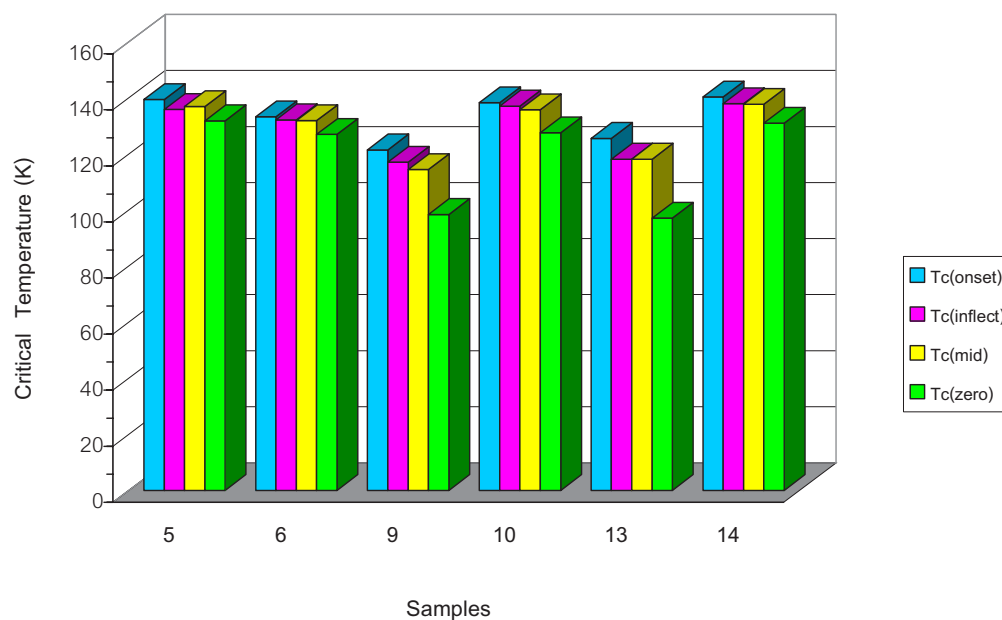
- Kittel, Charles. **Introduction to solid state physics**. 8th ed. Hoboken, N.J. : John Wiley, 2005.
- Neff, Thomas. **BCS Theory** [Online]. GSI PhD Seminar 31 January 2001. Available from <http://theory.gsi.de/~tneff/publications/bcs.pdf>
- O'Reilly, Eoin P. **Quantum Theory of Solids**. London : Taylor & Francis, 2002.
- Parker, D., S. Haas, and K. Maki. "BCS theory of unconventional superconductivity in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$." **Physica B**, 378 – 380 (2006) : 902 – 903.
- Poole, Charles P., Jr., Timir Datta, and Horacio A. Farach. **Copper oxide superconductors**. New York : John Wiley & Sons, 1988.
- Rose-Innes, A.C., and E.H. Rhoderick. **Introduction to superconductivity**. 2nd ed. Oxford : Pergamon Press, 1980.
- Saito, K. **Theoretical Critical Field in RF Application** [Online]. Accessed 21 October 2005. Available from <http://www.aps.anl.gov/conferences/RFSC-Limits/saito.pdf>
- Schawlow, A.L., and G.E. Devlin. "Effect of the Energy Gap on the Penetration Depth of Superconductors." **Physical Review**, 113 (1959) : 120 – 126.
- Serway, Raymond A., and John W. Jewett, Jr. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**. 6th ed. Belmont : Thomson, 2004.
- Taylor, A.W.B. **Superconductivity**. London : Wykeham, 1970.
- Tepe, M., I. Avci, H. Kocoglu, and D. Abukay. "Investigation of the variation in weak-link profile of $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Ag}_x\text{O}_{7-\delta}$ superconductors by Ag doping concentration." **Solid State Communications**, 131 (2004) : 319 – 323.
- Tink ham, Michael. **Introduction to superconductivity**. New York : McGraw-Hill, 1975.
- Wahab, M.A. **Solid State Physics : Structure and Properties of Materials**. New Delhi : Narosa, 1999.

ภาคผนวก

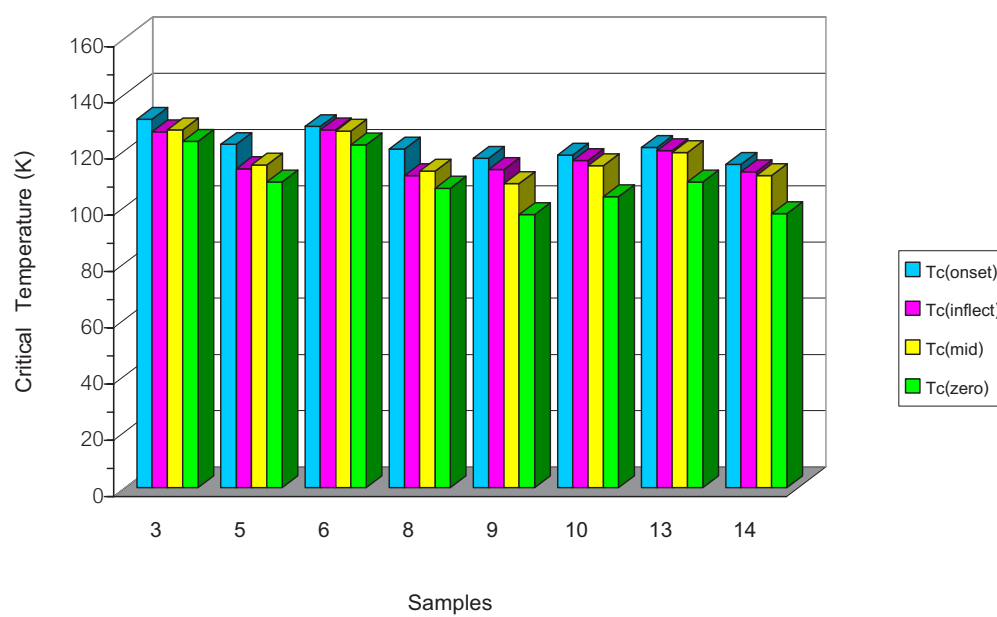
ภาคผนวก ก
กราฟผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ก.1 กราฟผลการวิเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

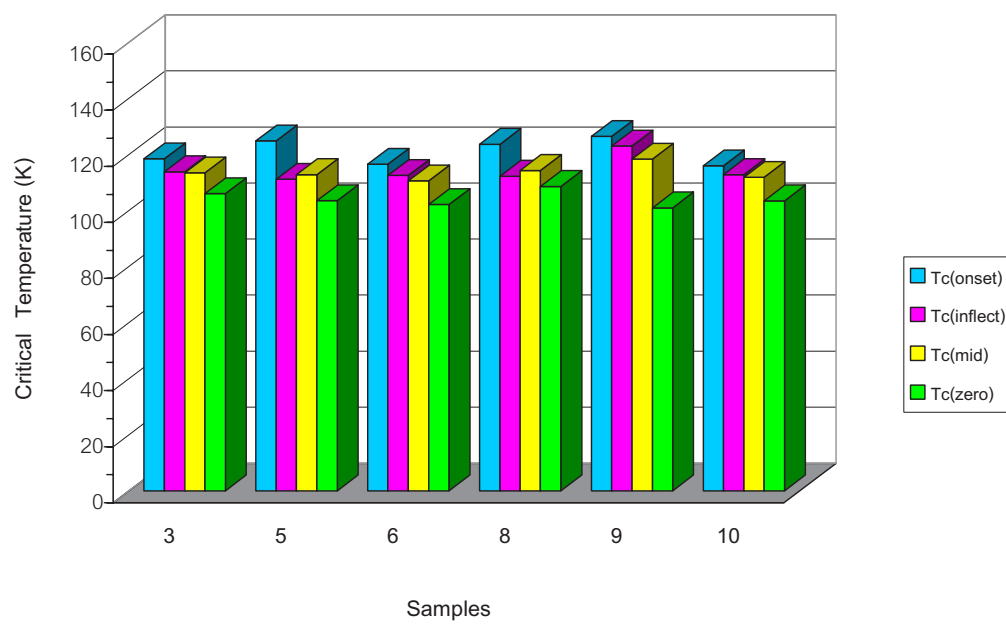
ก.1.1 อุณหภูมิวิกฤต



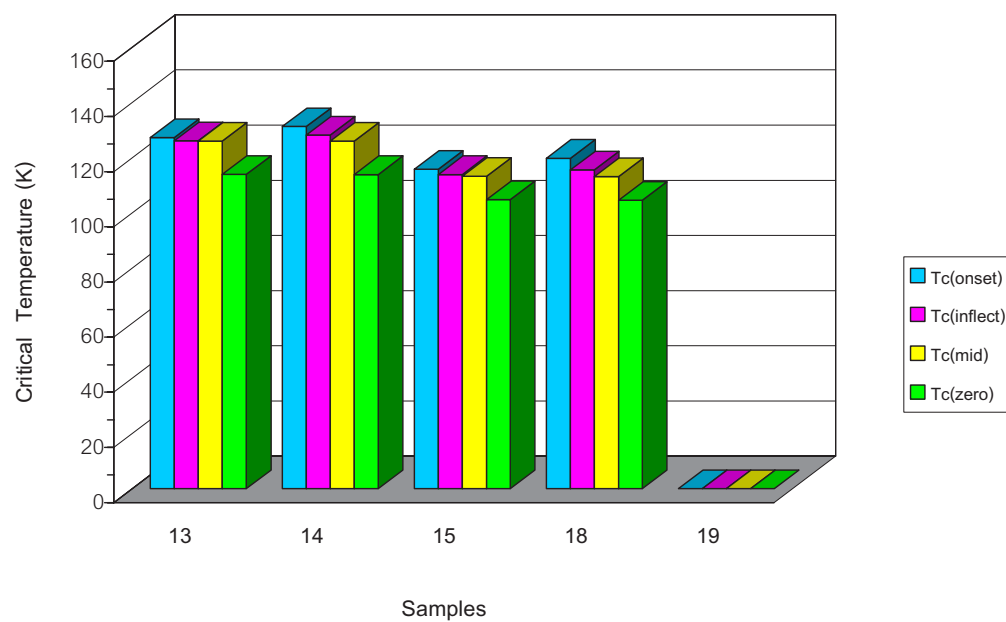
รูป ก.1 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเมดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



รูป ก.2 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเมดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

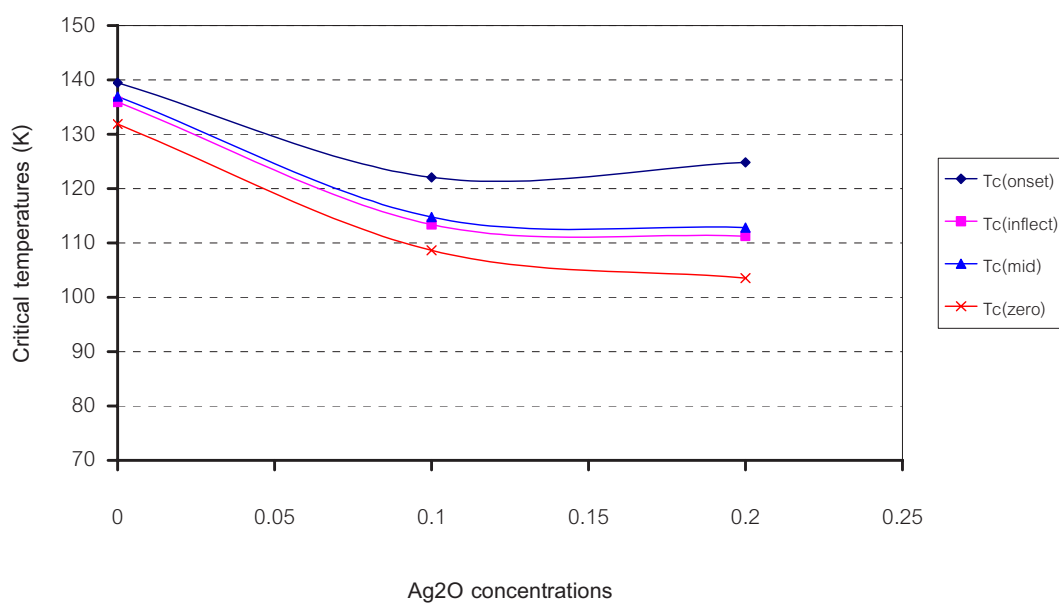


(ก)

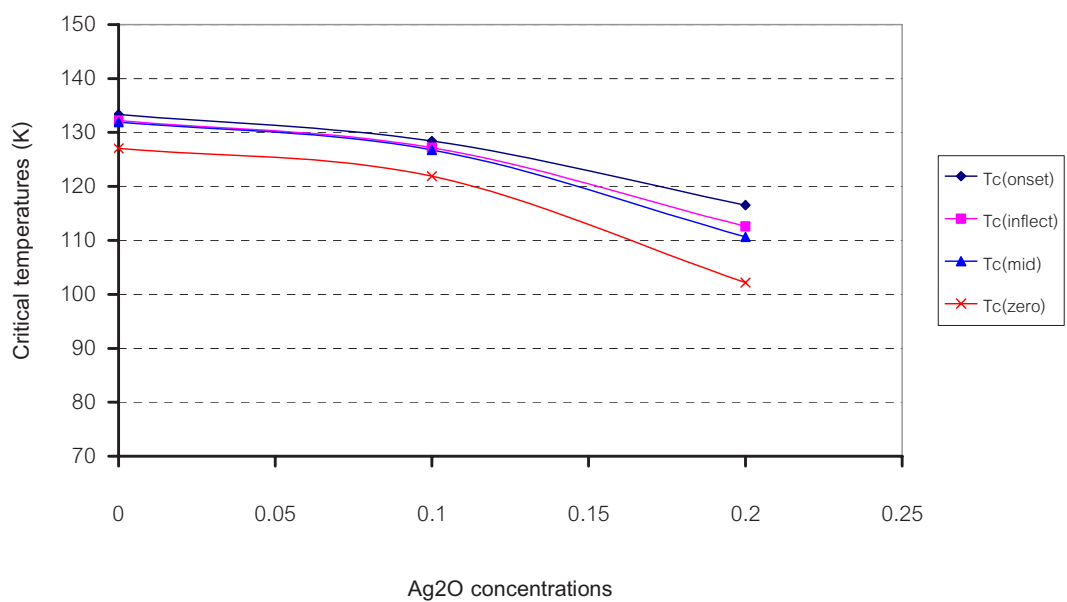


(ข)

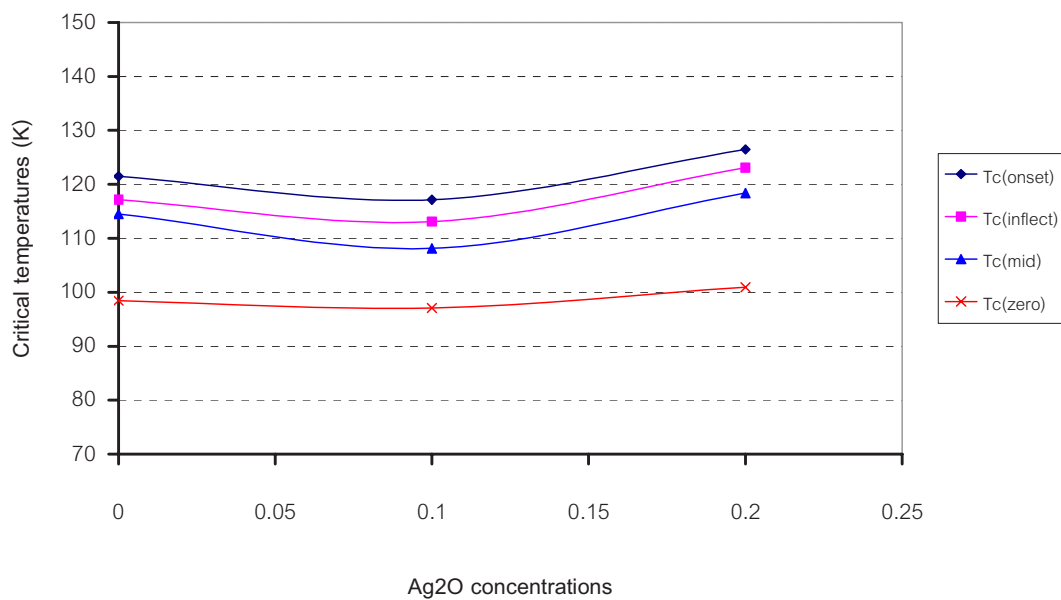
รูป ก.3 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



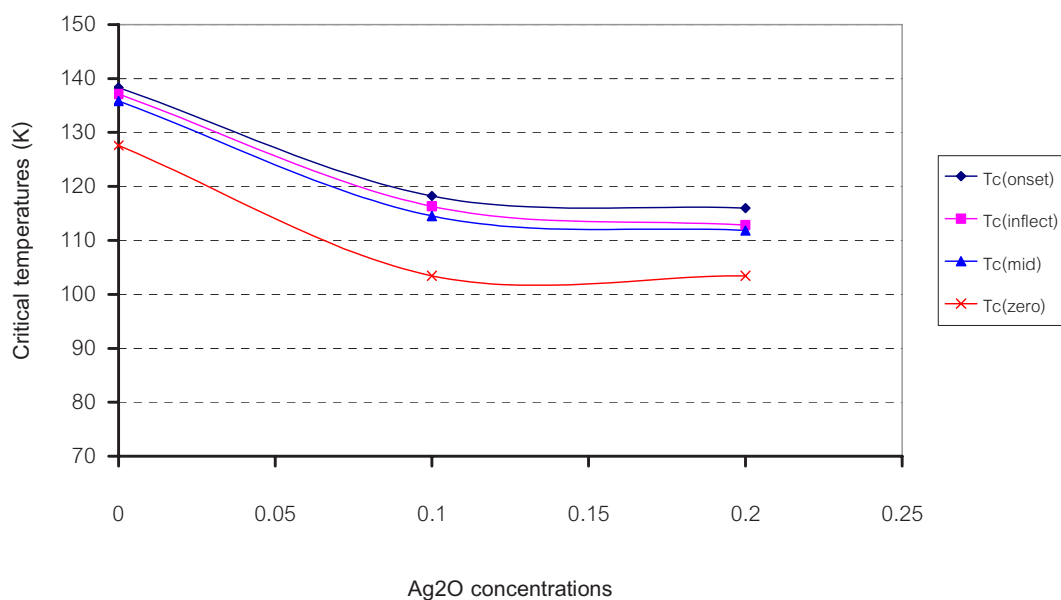
รูป ก.4 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



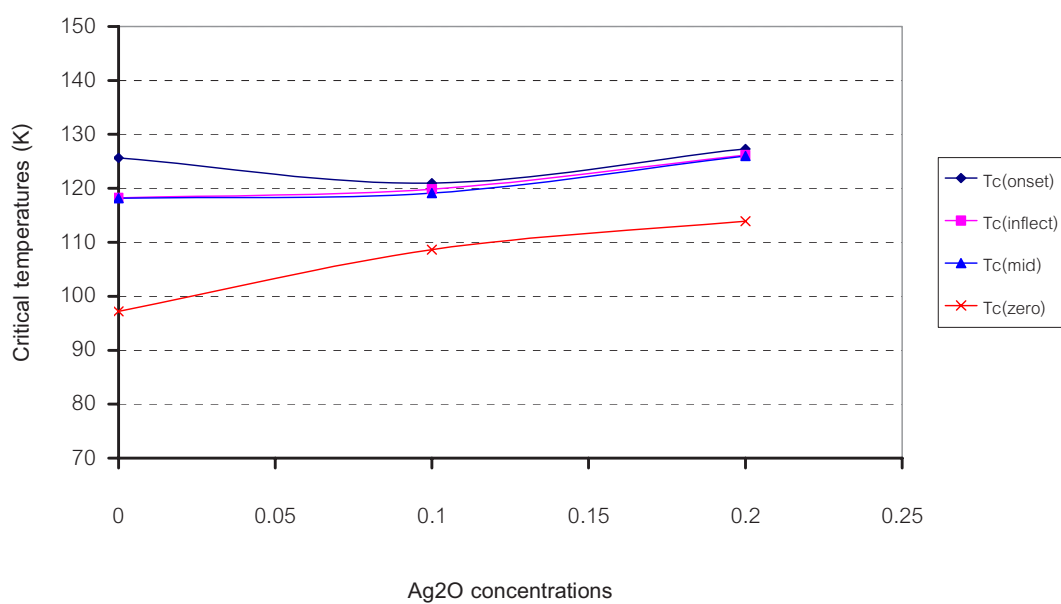
รูป ก.5 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



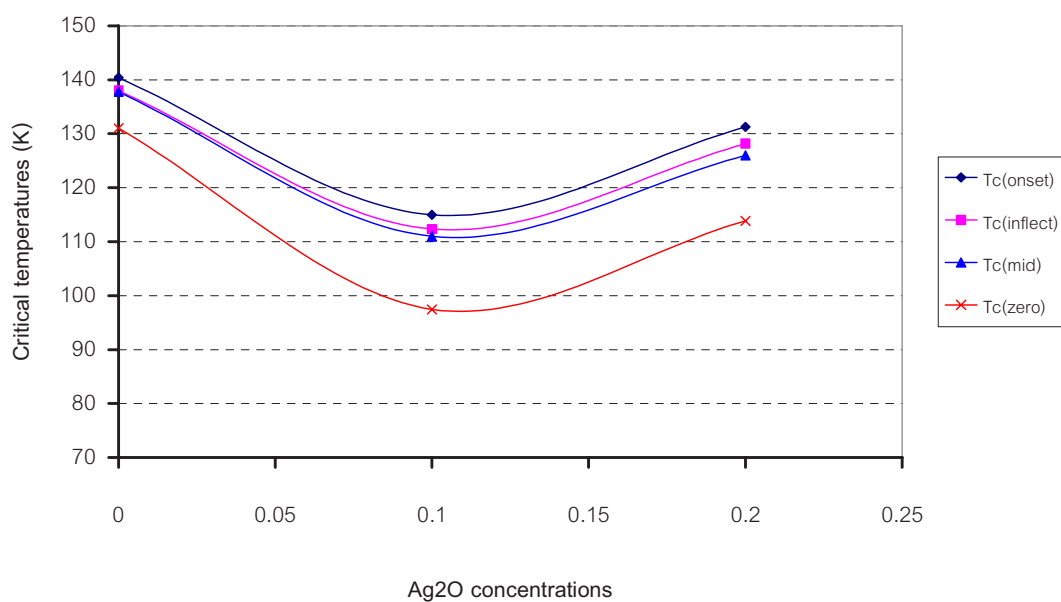
รูป ก.6 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



รูป ก.7 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

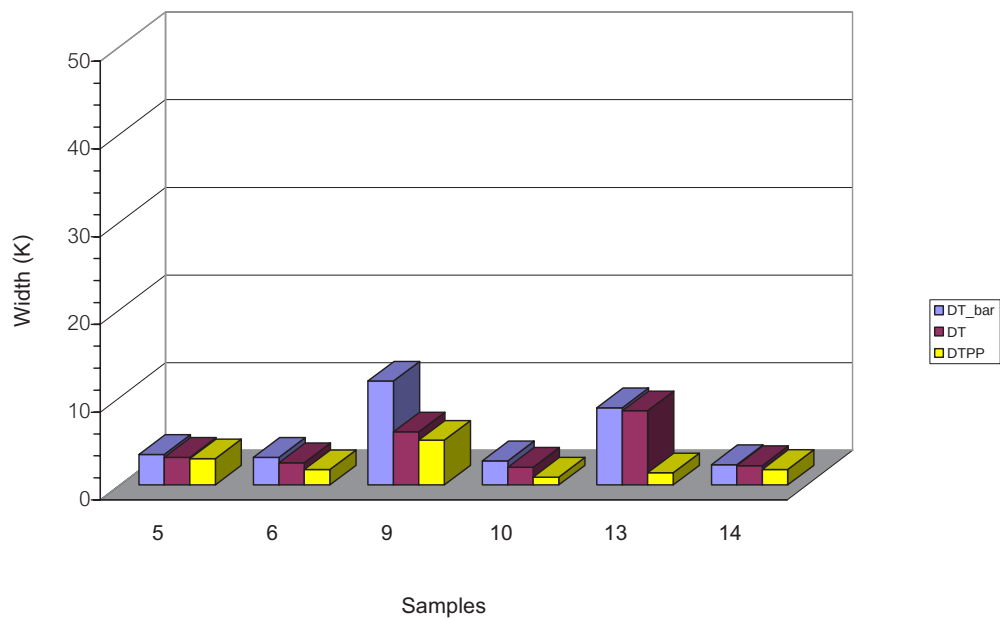


รูป ก.8 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

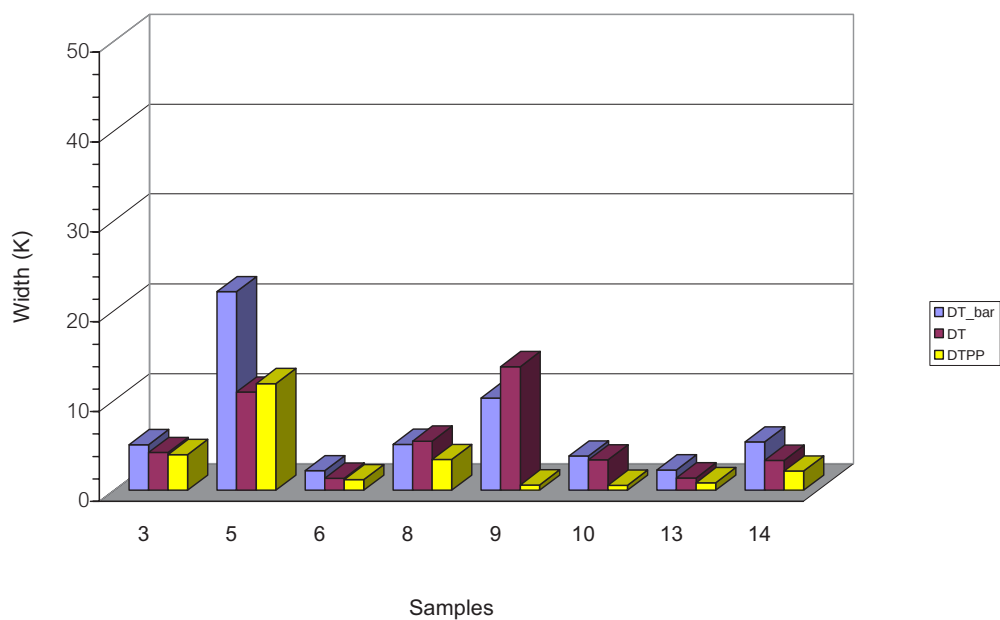


รูป ก.9 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

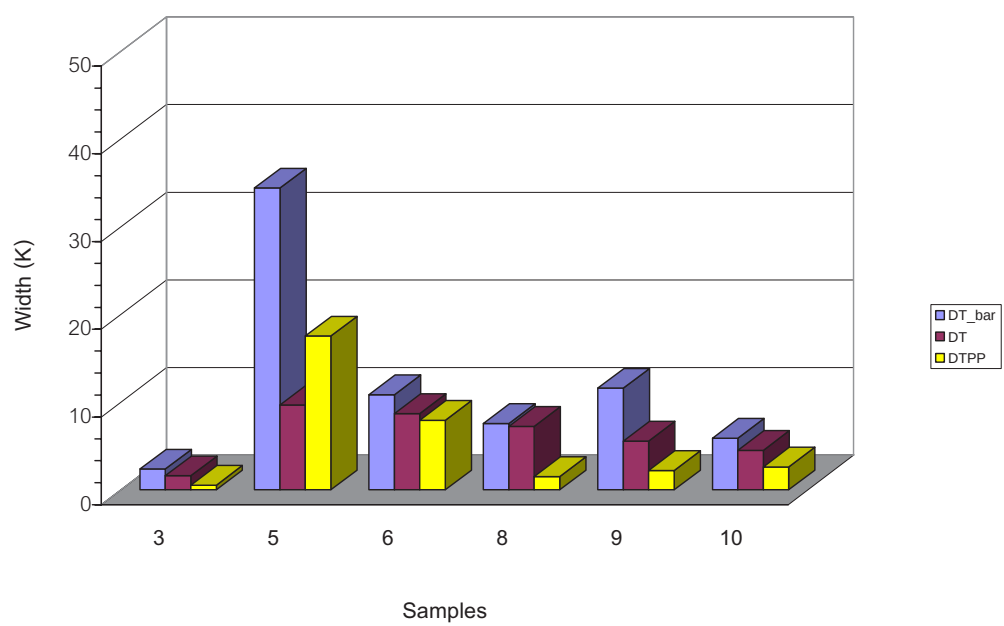
ก.1.2 ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ



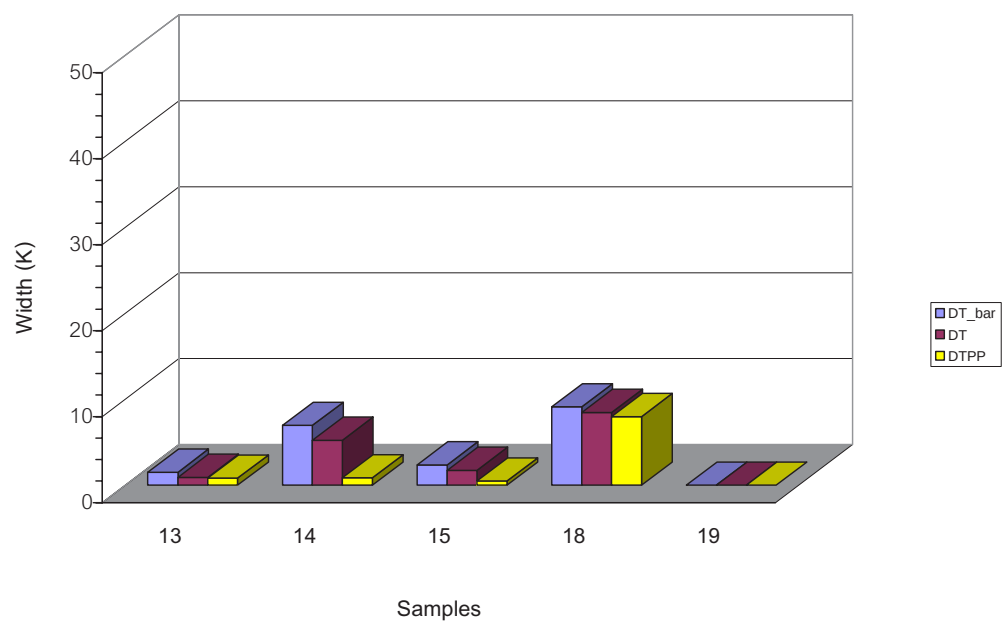
รูป ก.10 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



รูป ก.11 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

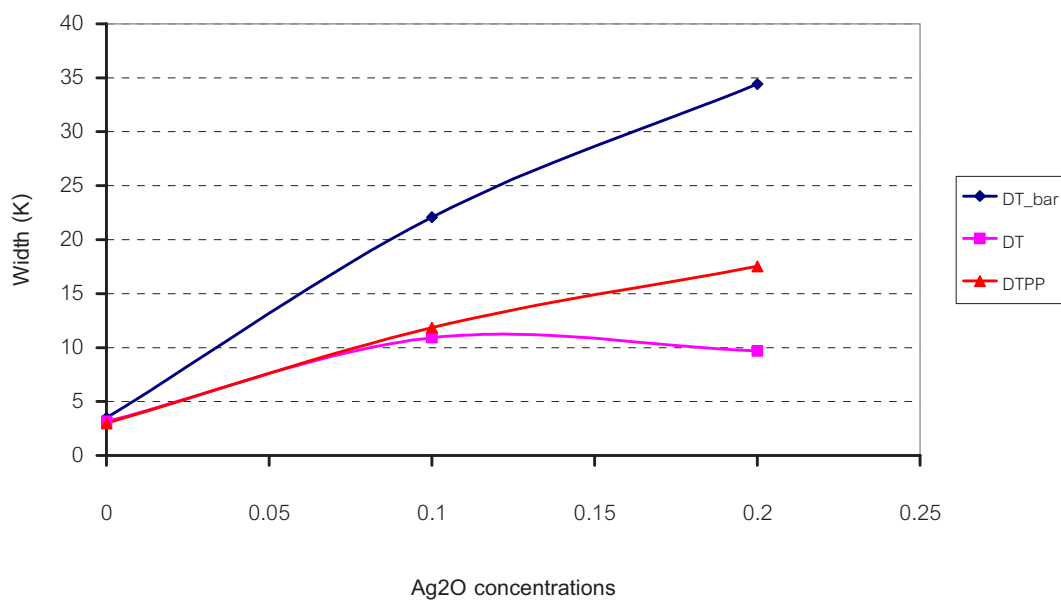


(ก)

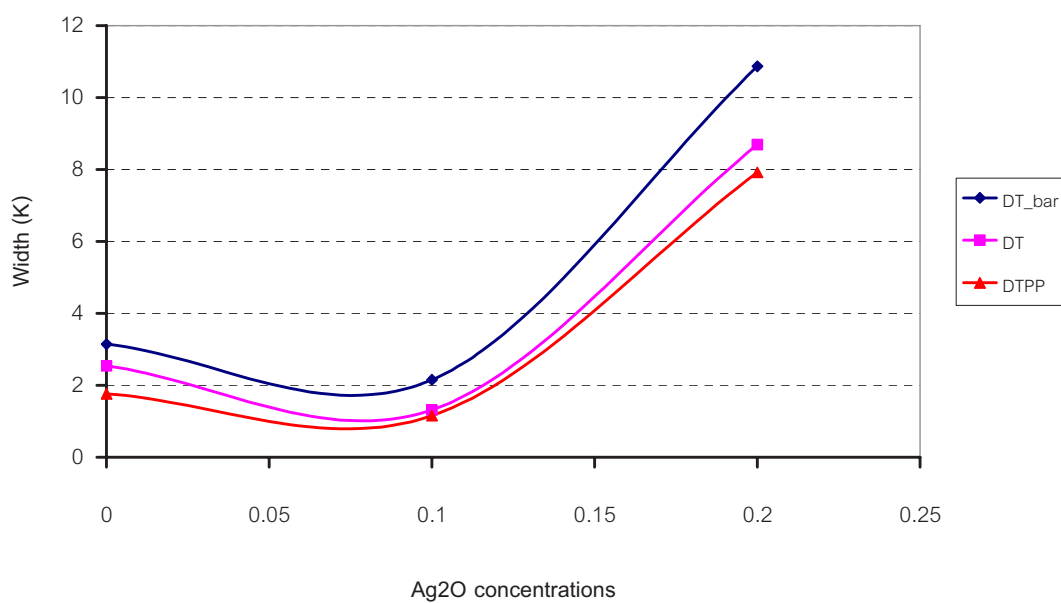


(ข)

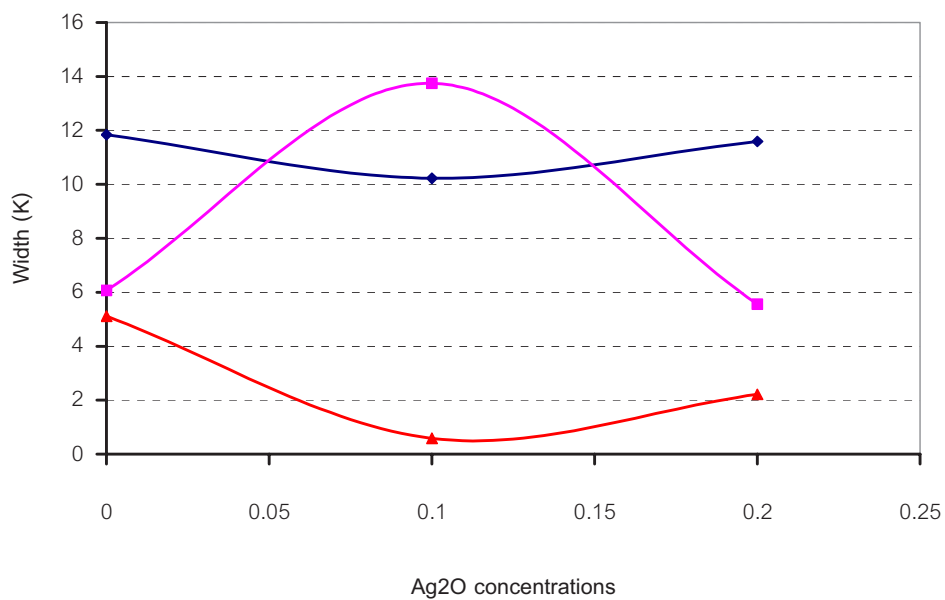
รูป ก.12 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุล
ของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



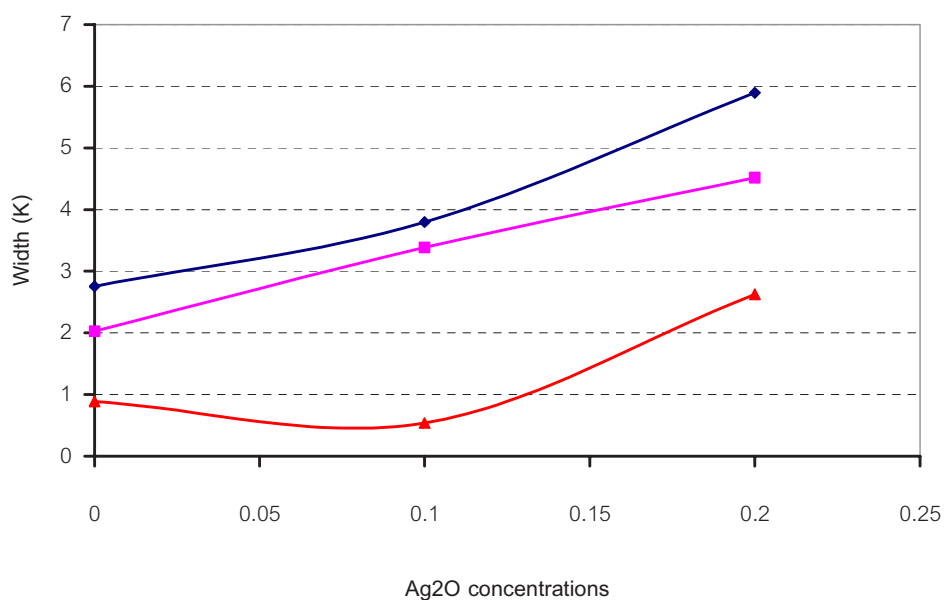
รูป ก.13 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



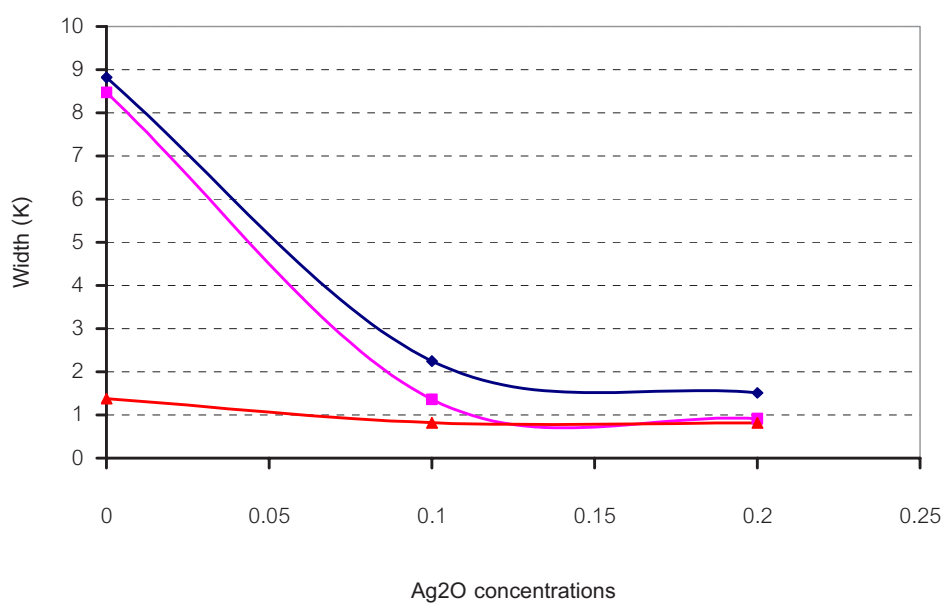
รูป ก.14 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



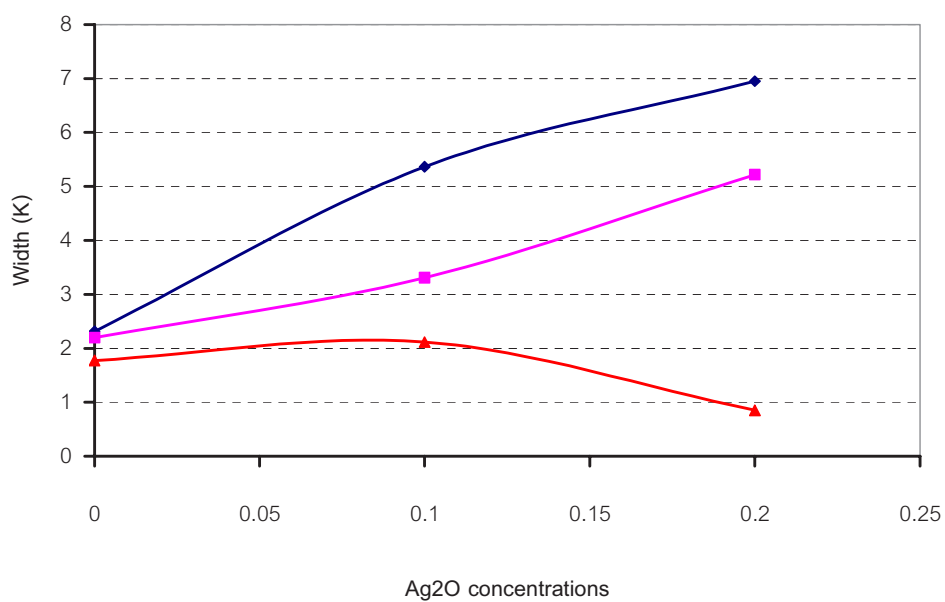
รูป ก.15 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



รูป ก.16 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

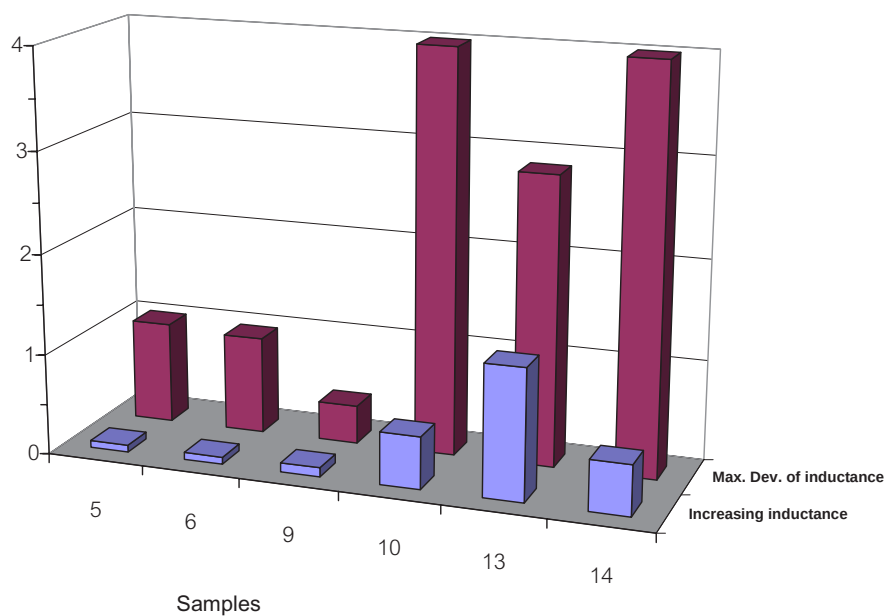


รูป ก.17 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

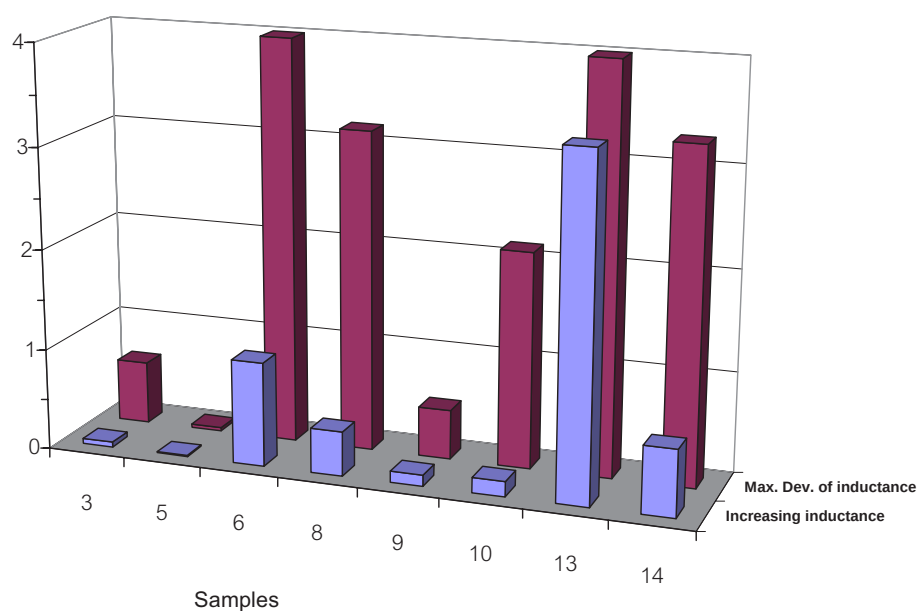


รูป ก.18 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

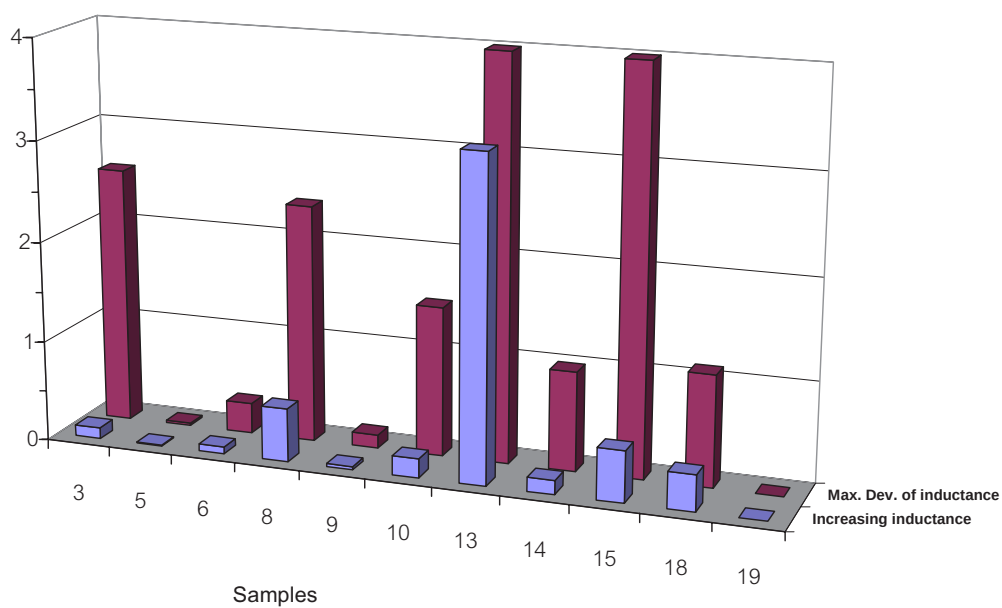
ก.1.3 ค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด



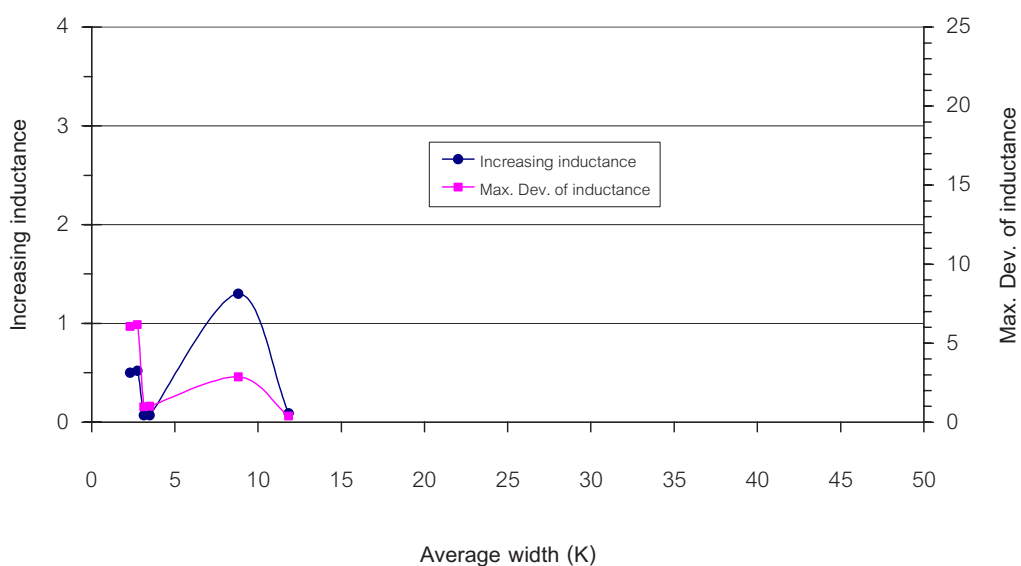
รูป ก.19 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเมดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



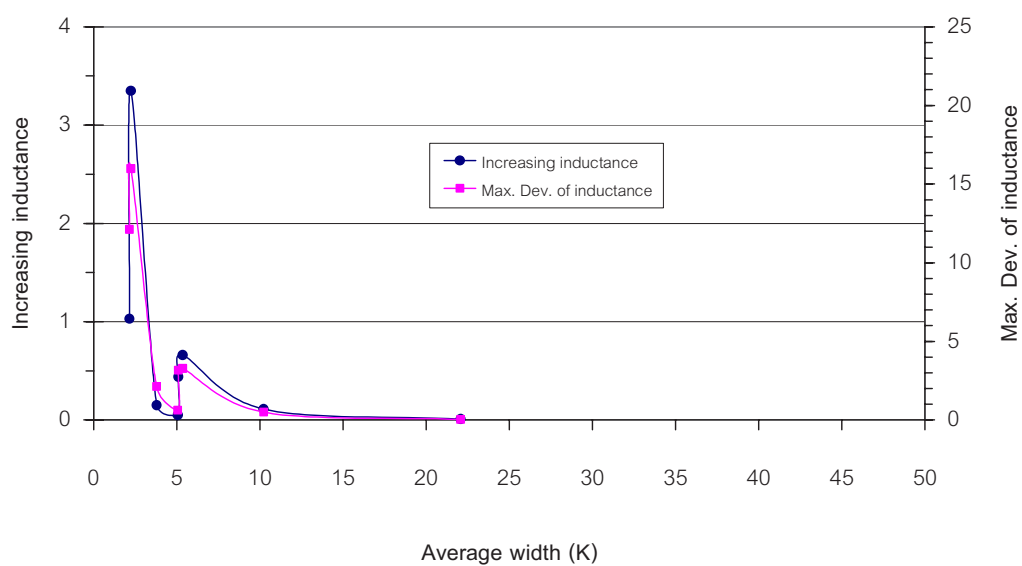
รูป ก.20 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเมดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$



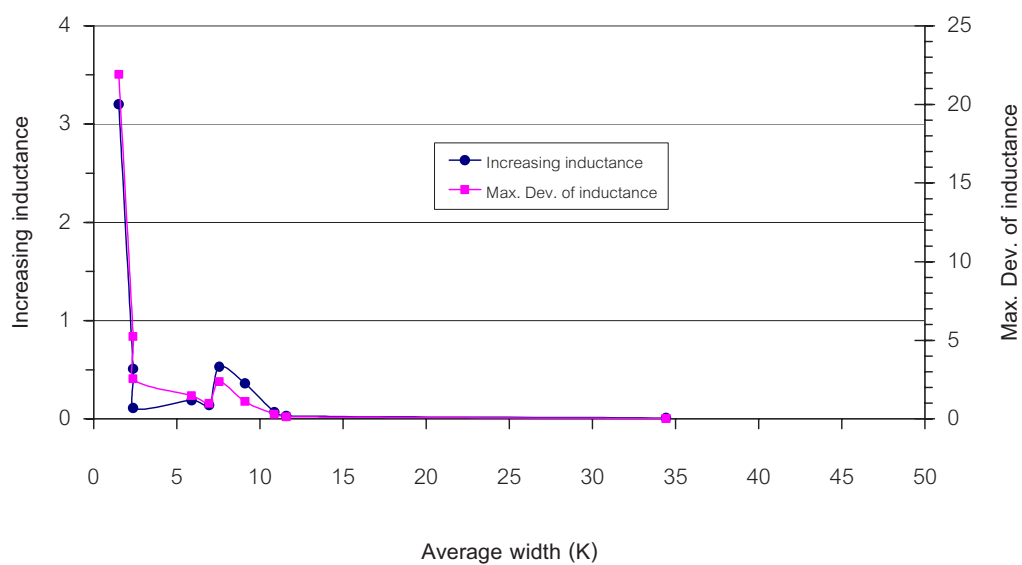
รูป ก.21 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเมดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



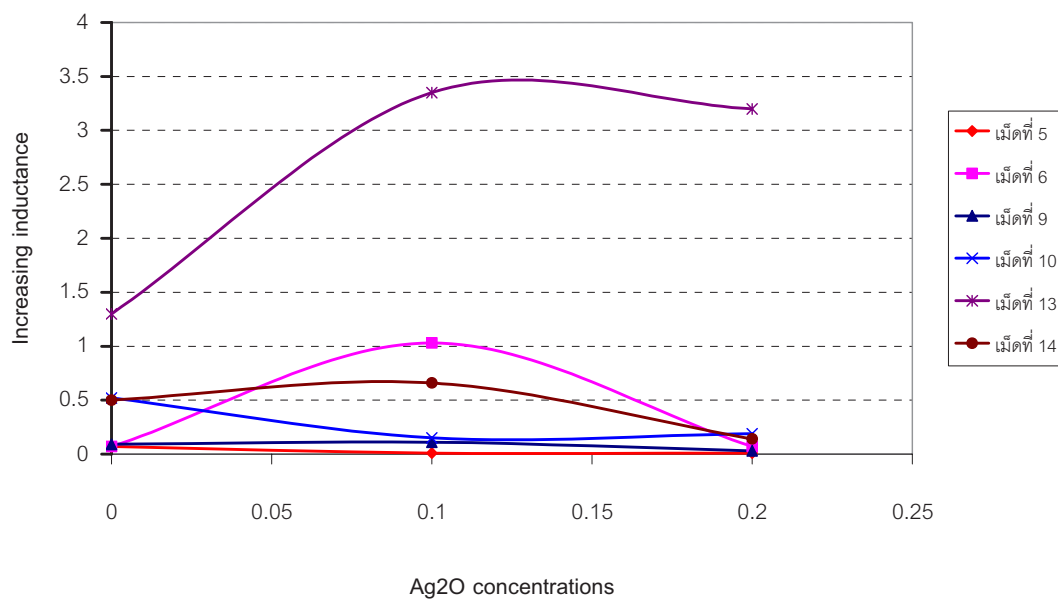
รูป ก.22 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยของเมดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



รูป ก.23 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

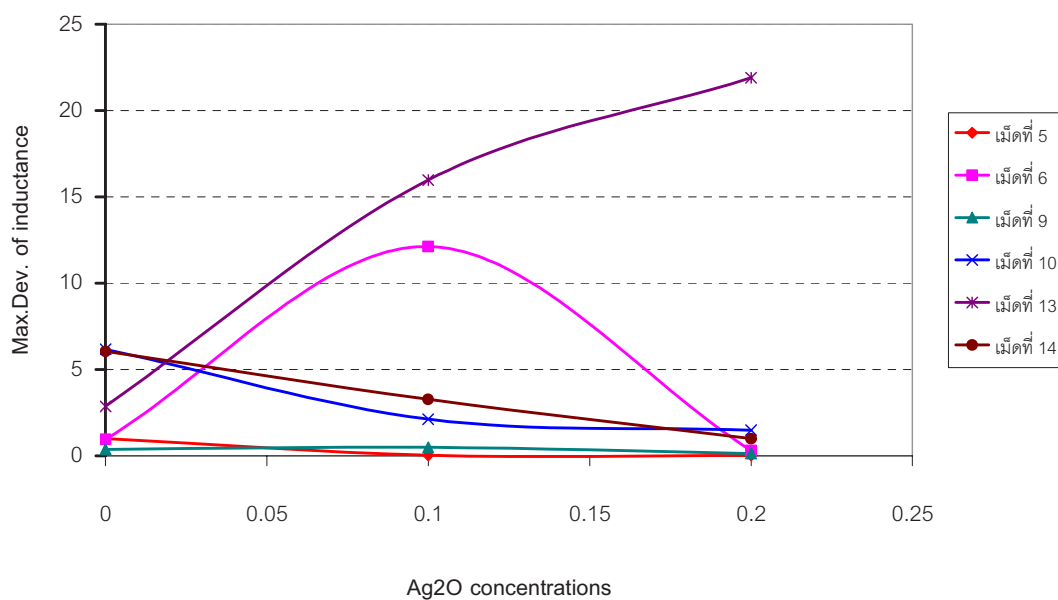


รูป ก.24 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



รูป ก.25 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14

ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

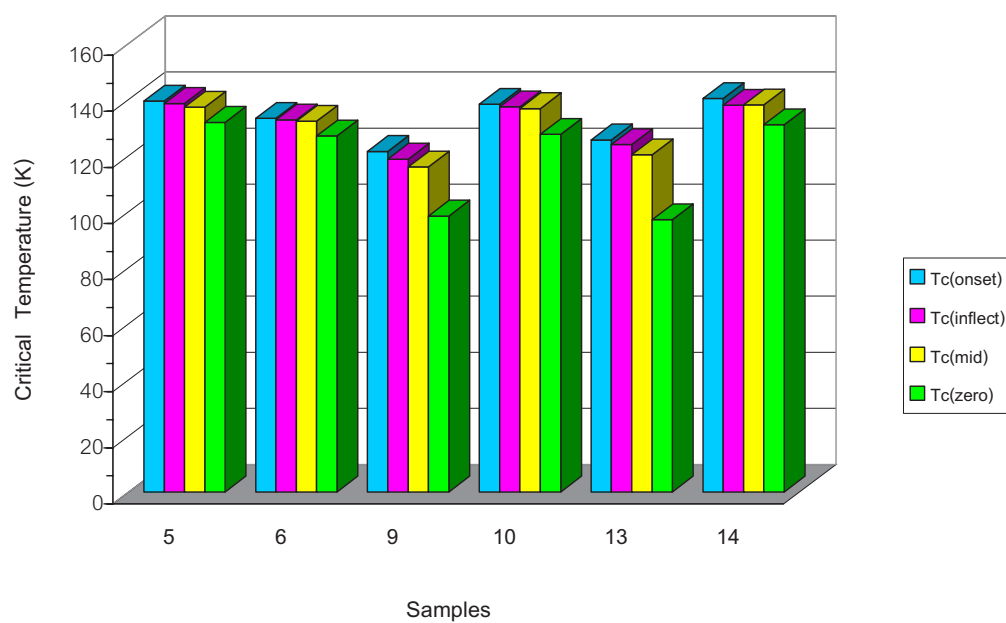


รูป ก.26 แสดงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14

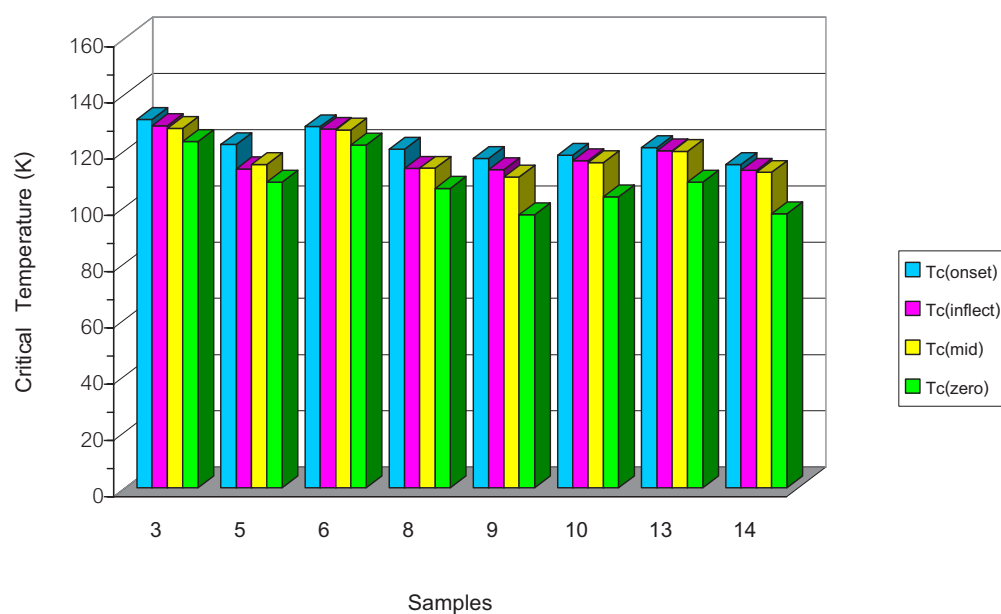
ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

ก.2 กราฟผลการวิเคราะห์ค่าระยะเจาะลึกยังผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

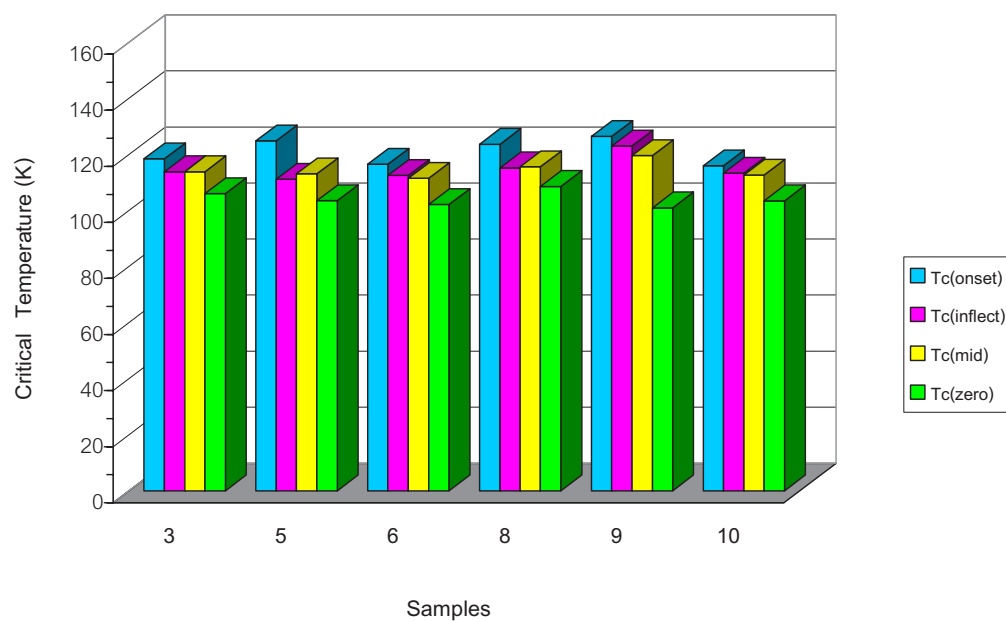
ก.2.1 อุณหภูมิวิกฤต



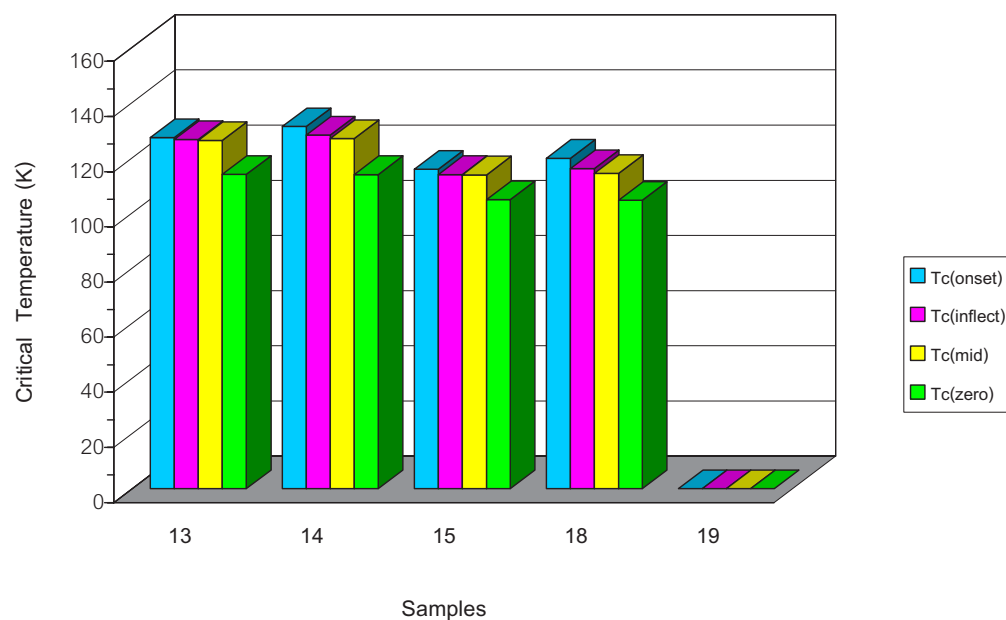
รูป ก.27 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



รูป ก.28 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

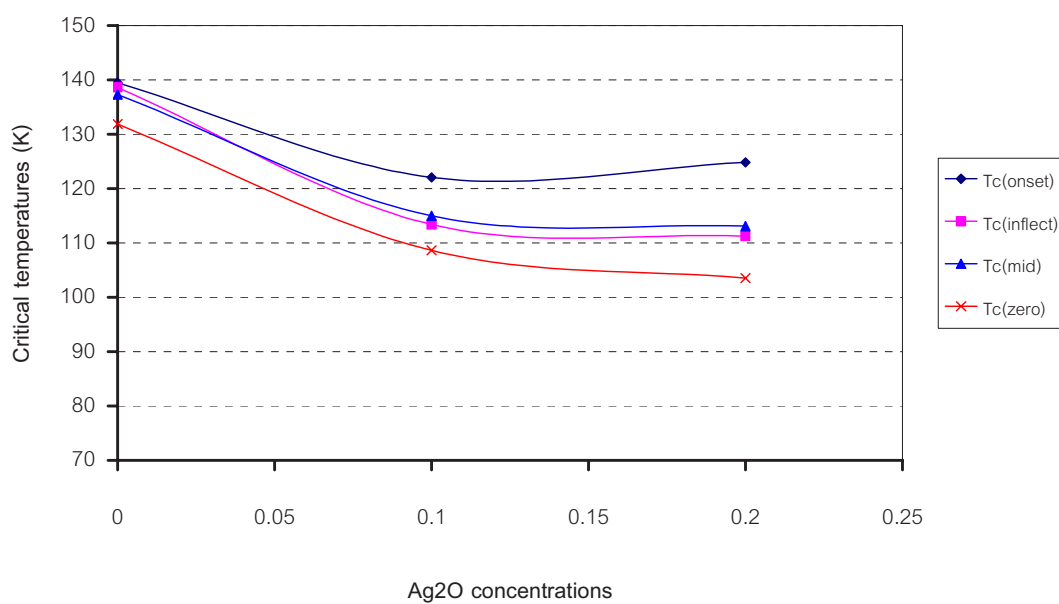


(ก)

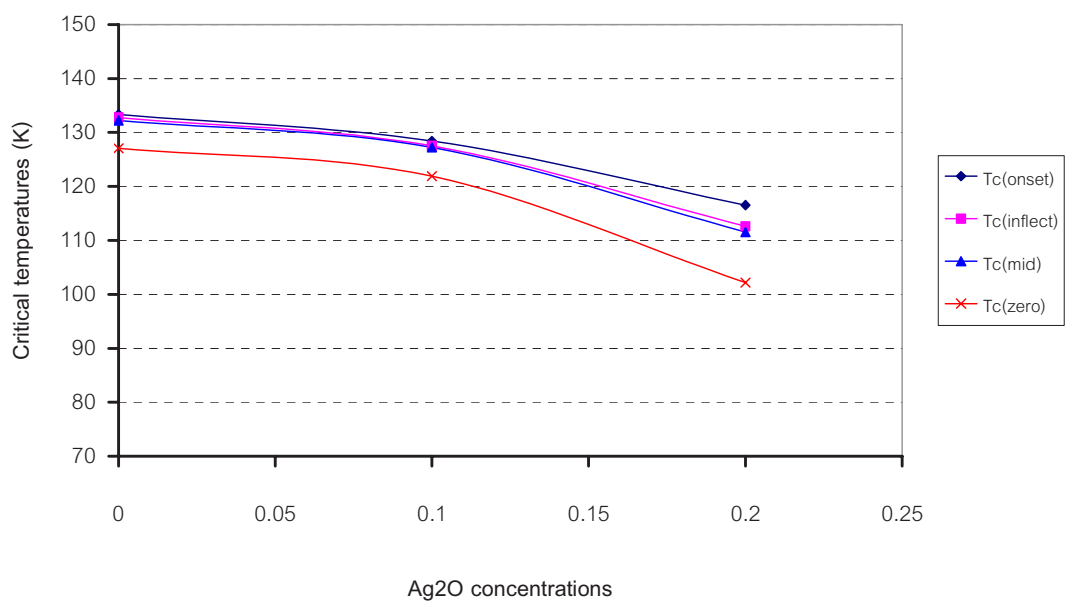


(ข)

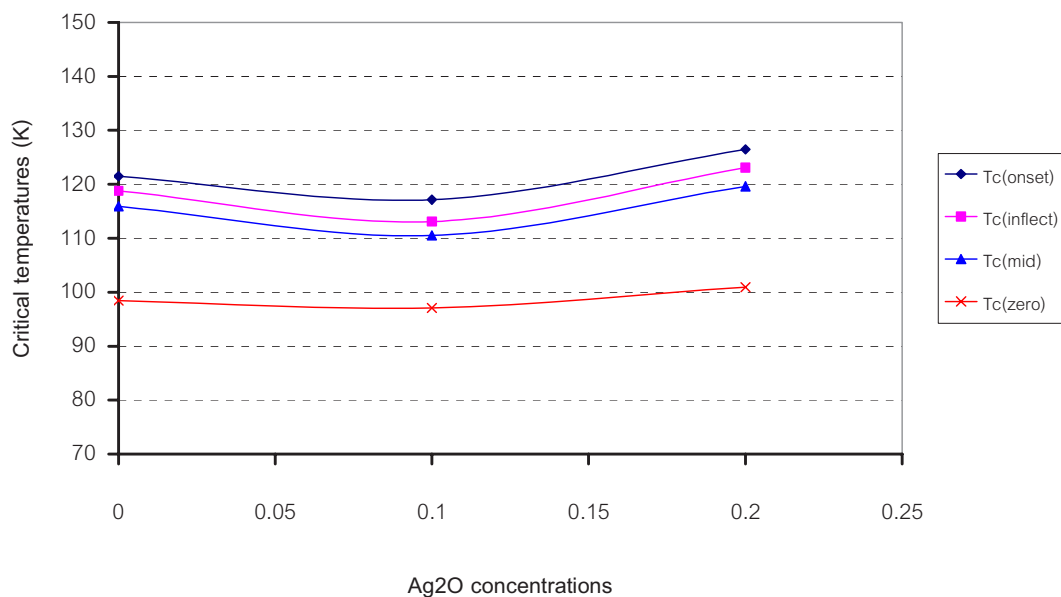
รูป ก.29 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



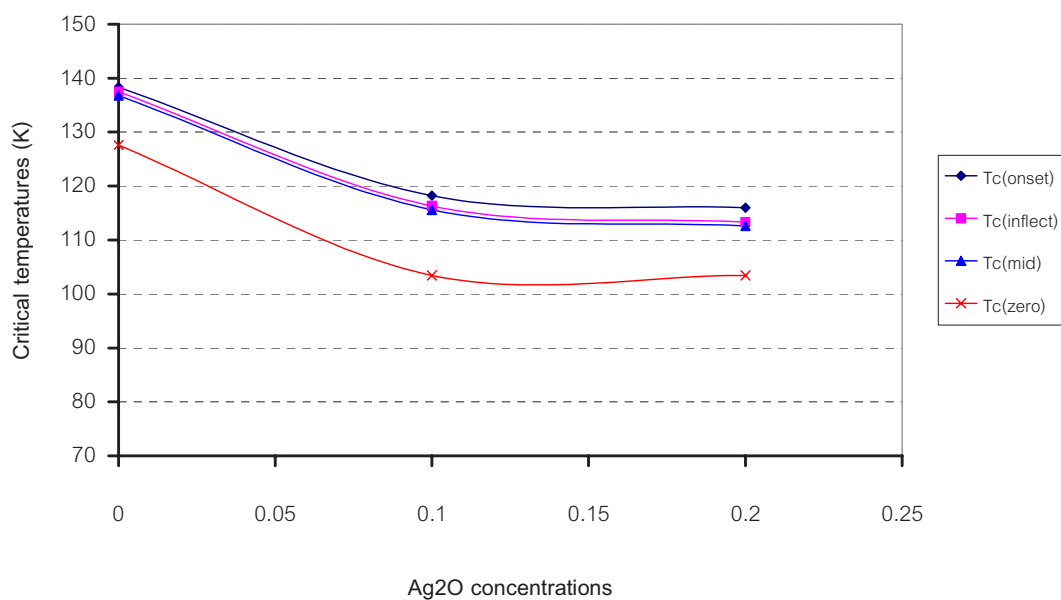
รูป ก.30 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเมื่อดสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



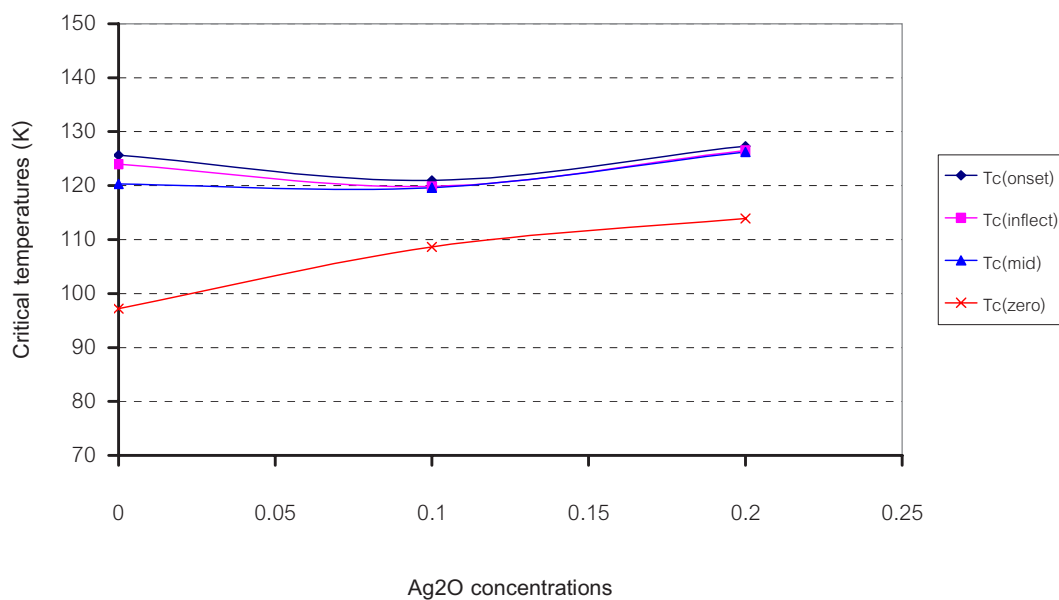
รูป ก.31 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเมื่อดสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



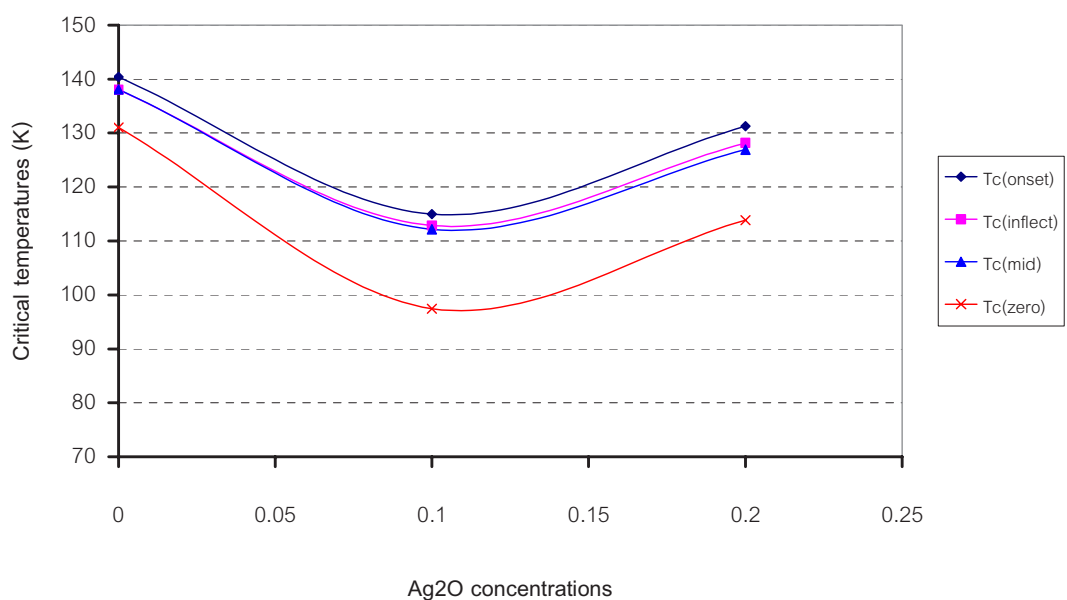
รูป ก.32 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



รูป ก.33 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

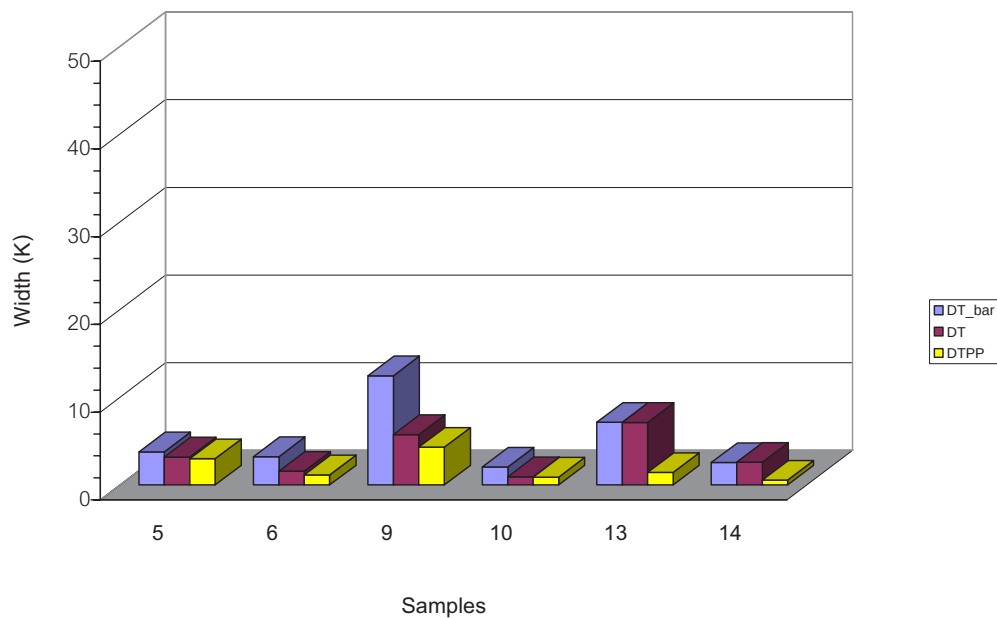


รูป ก.34 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

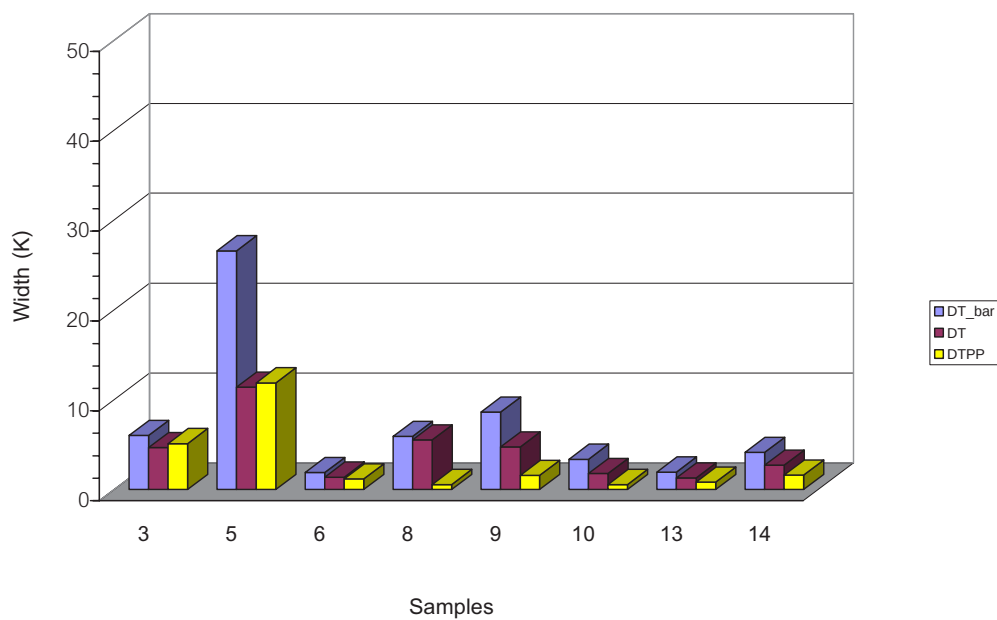


รูป ก.35 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของเม็ดสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ,
เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

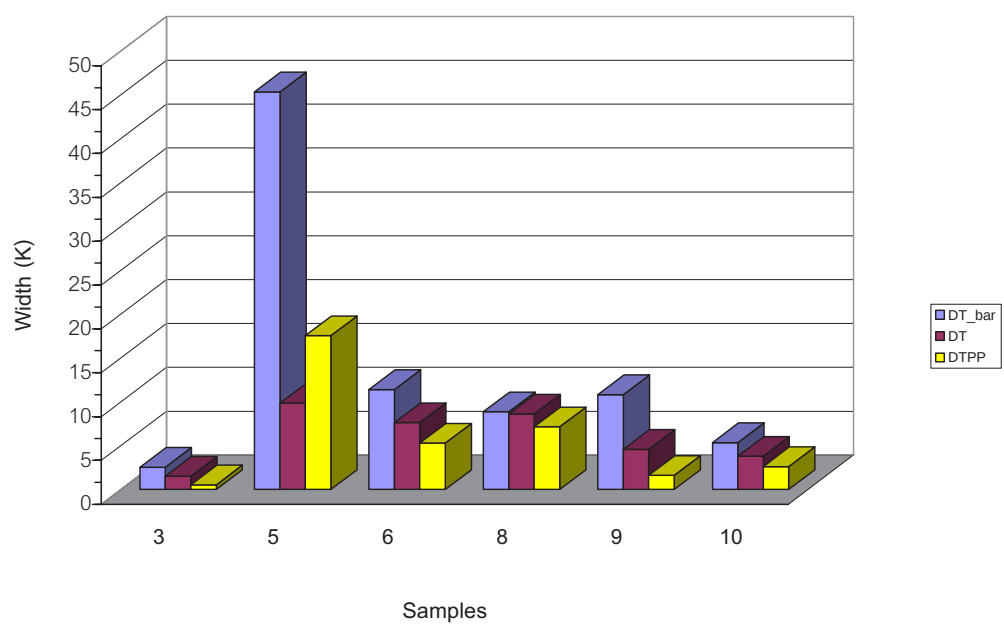
ก.2.2 ความกว้างในการเปลี่ยนสถานะ



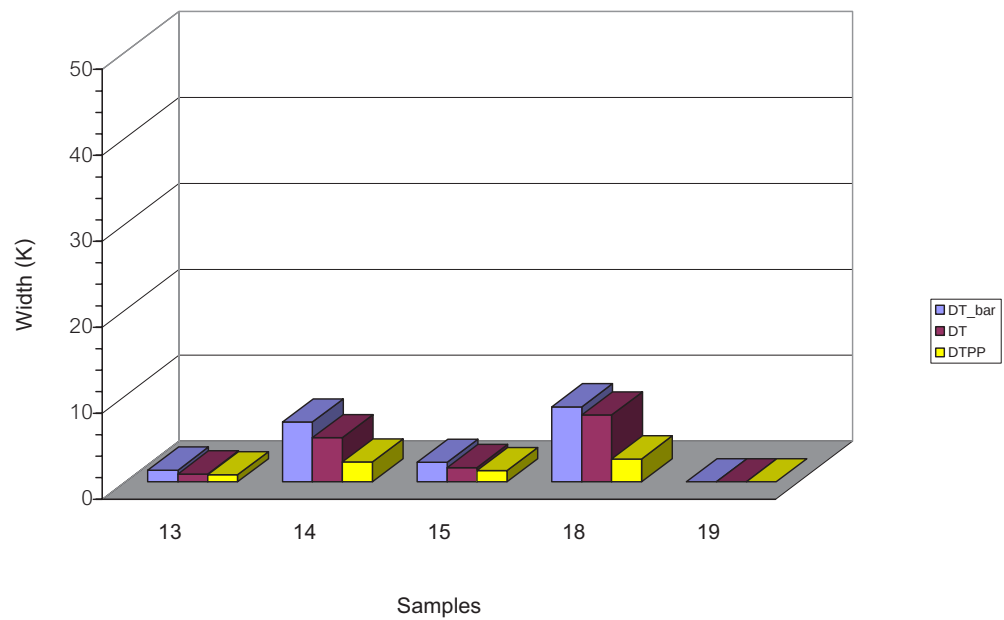
รูป ก.36 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



รูป ก.37 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$

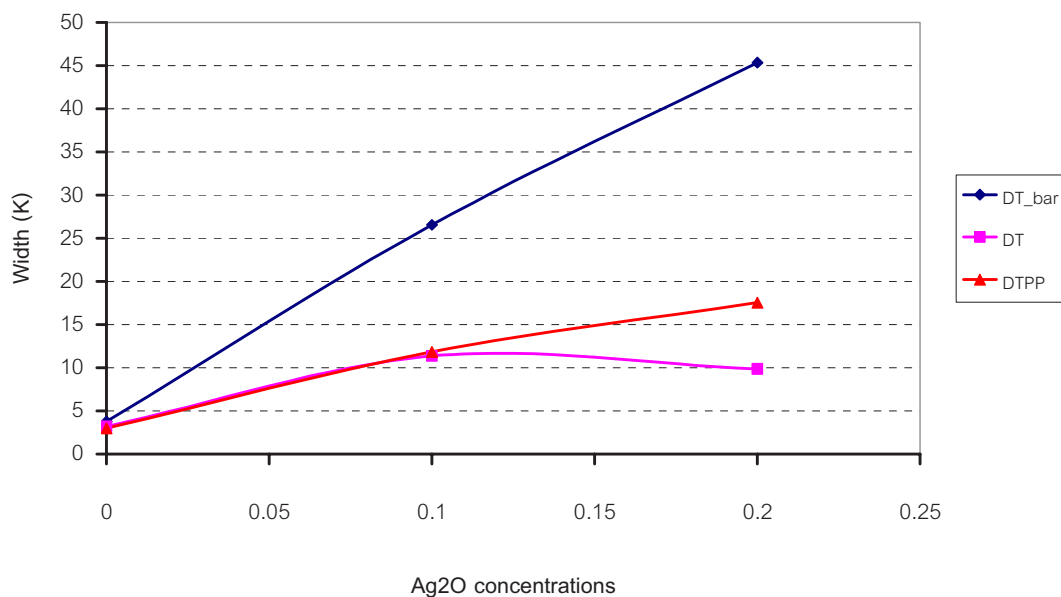


(ก)

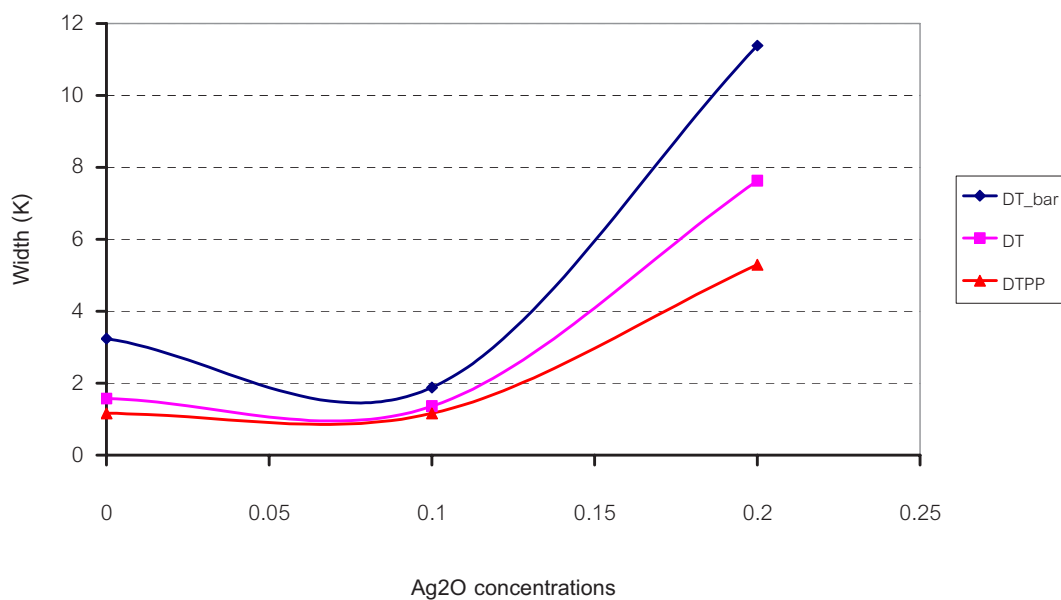


(ข)

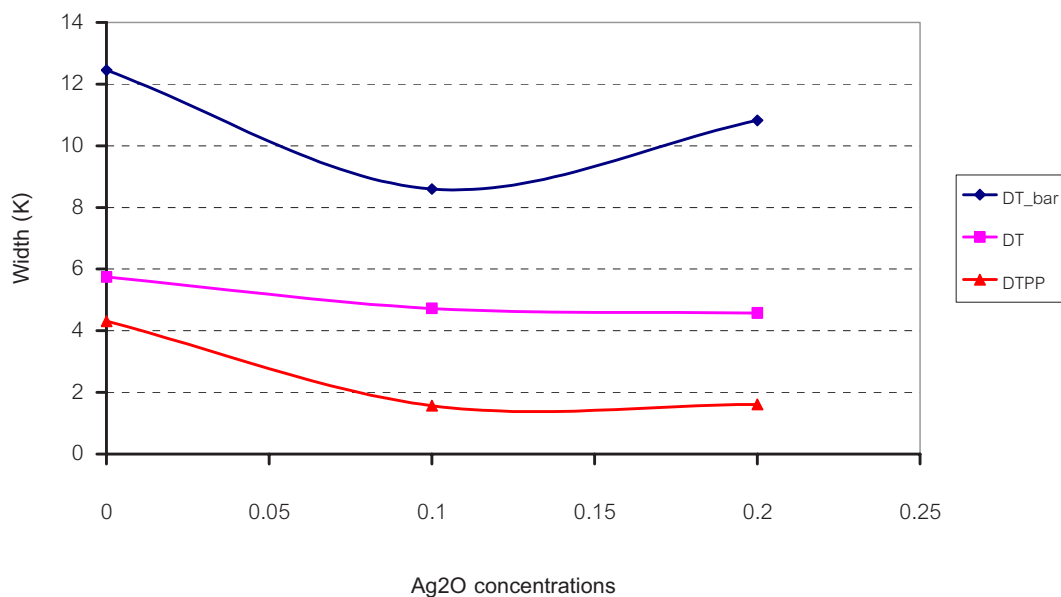
รูป ก.38 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุล
ของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



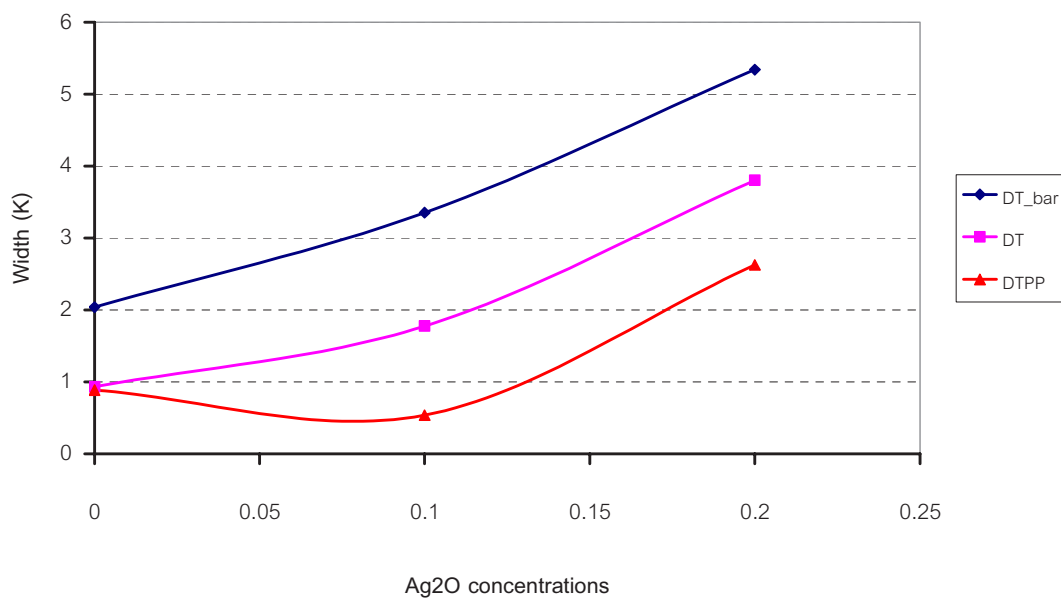
รูป ก.39 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



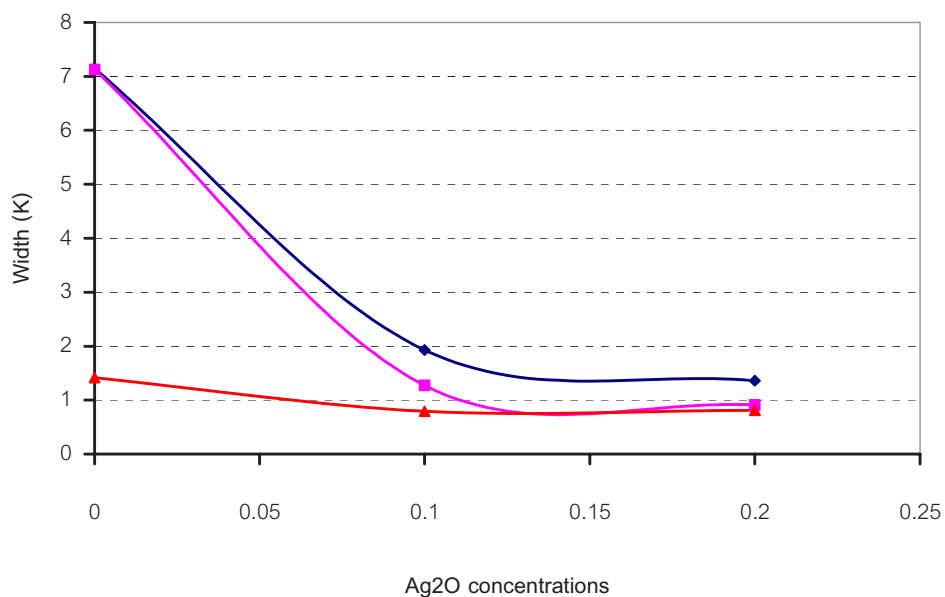
รูป ก.40 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



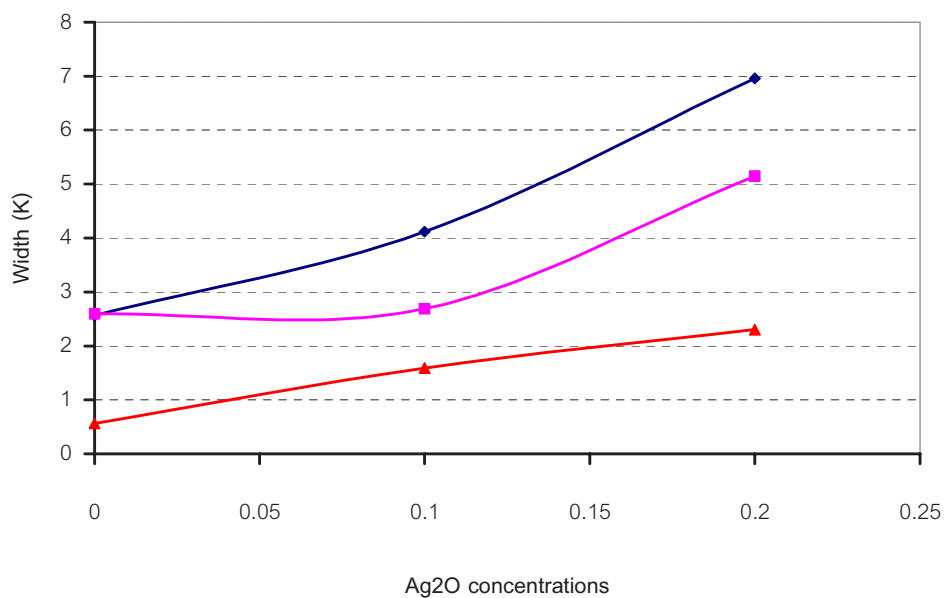
รูป ก.41 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



รูป ก.42 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

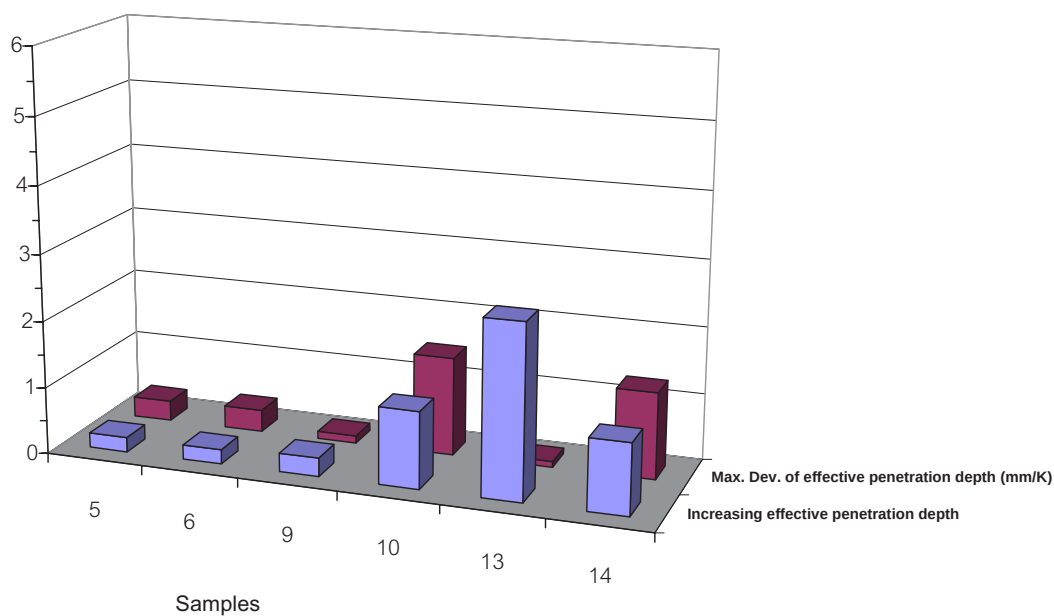


รูป ก.43 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

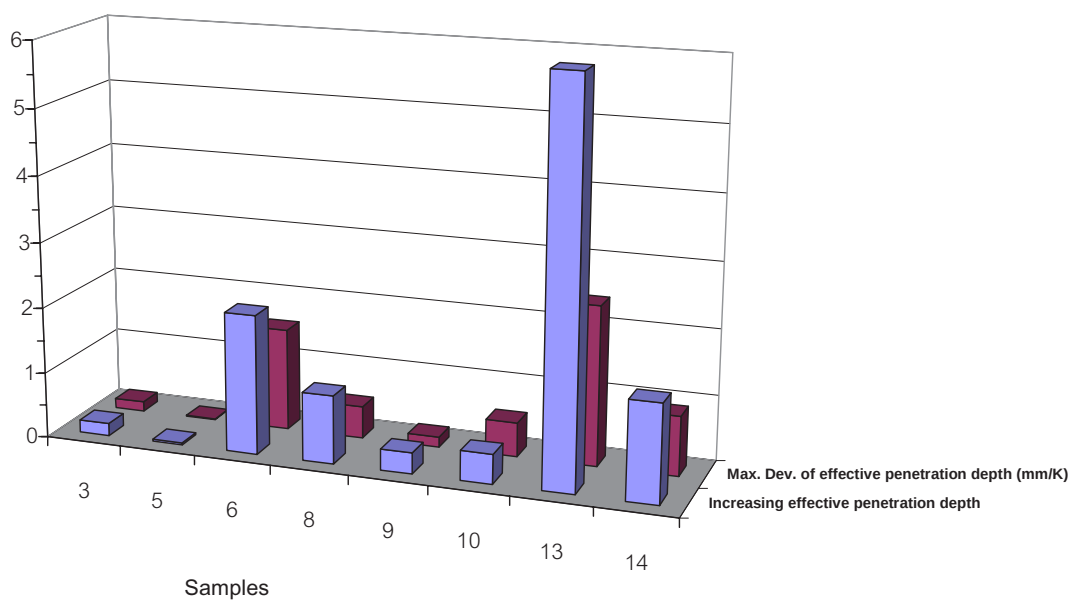


รูป ก.44 แสดงค่าความกว้างในการเปลี่ยนสถานะของเม็คสารตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูล
ของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

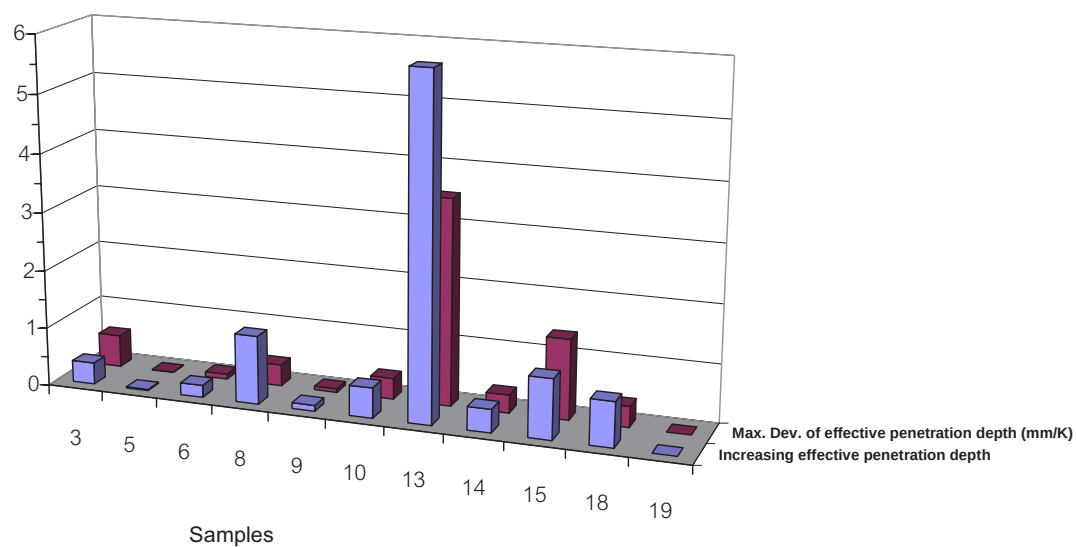
ก.2.3 ค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุด



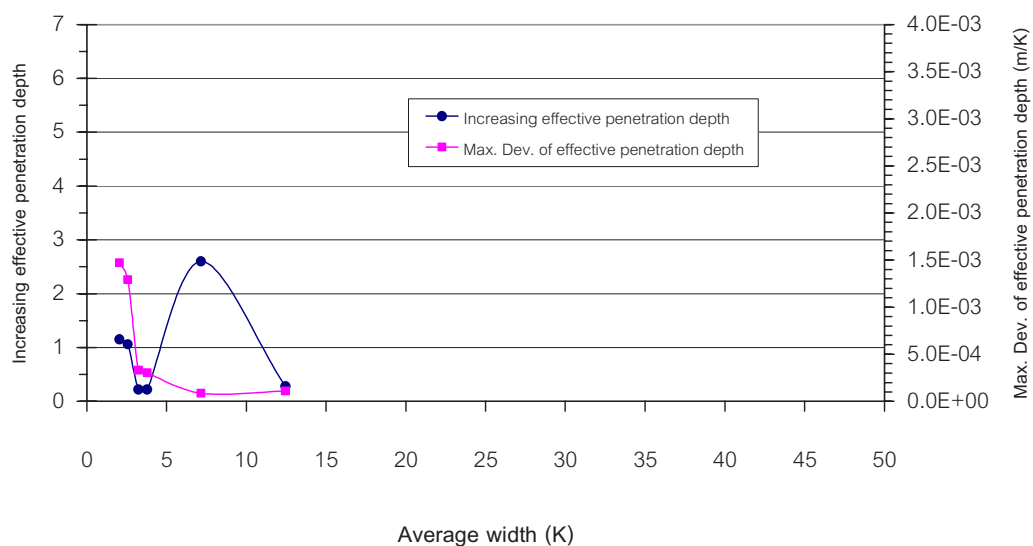
รูป ก.45 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



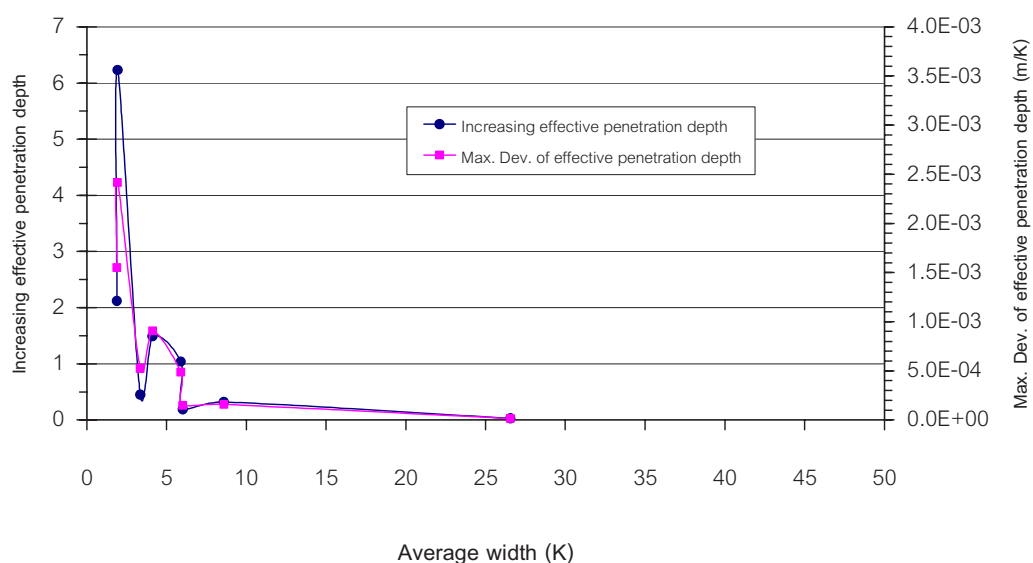
รูป ก.46 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$



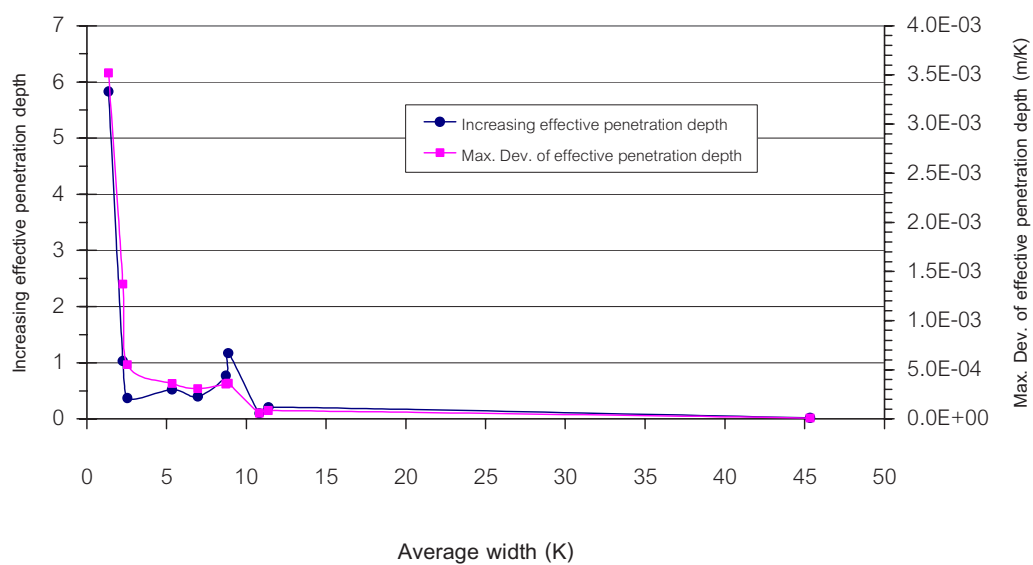
รูป ก.47 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$



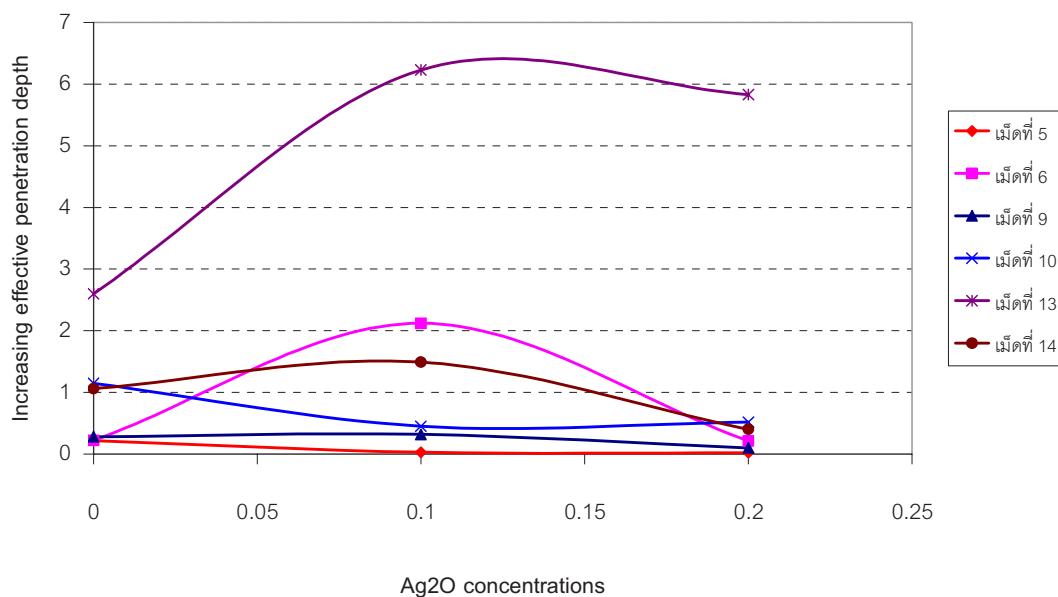
รูป ก.48 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



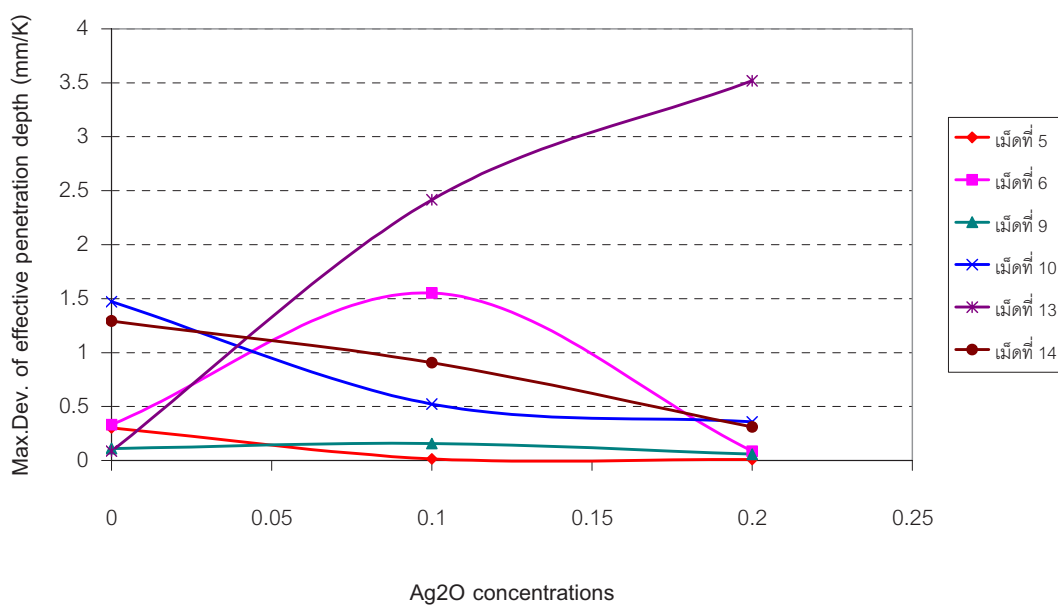
รูป ก.49 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$



รูป ก.50 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลและค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดสัมพันธ์กับความกว้างในการเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

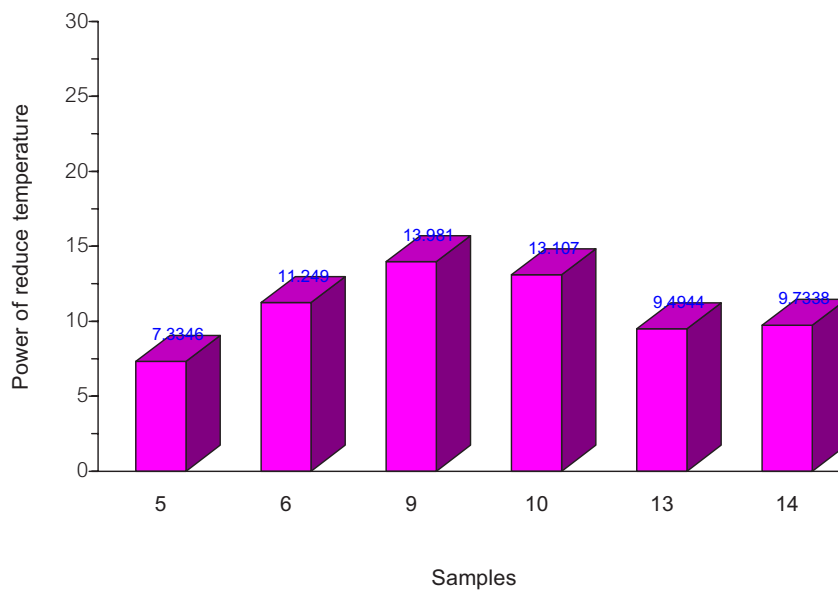


รูป ก.51 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14
ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

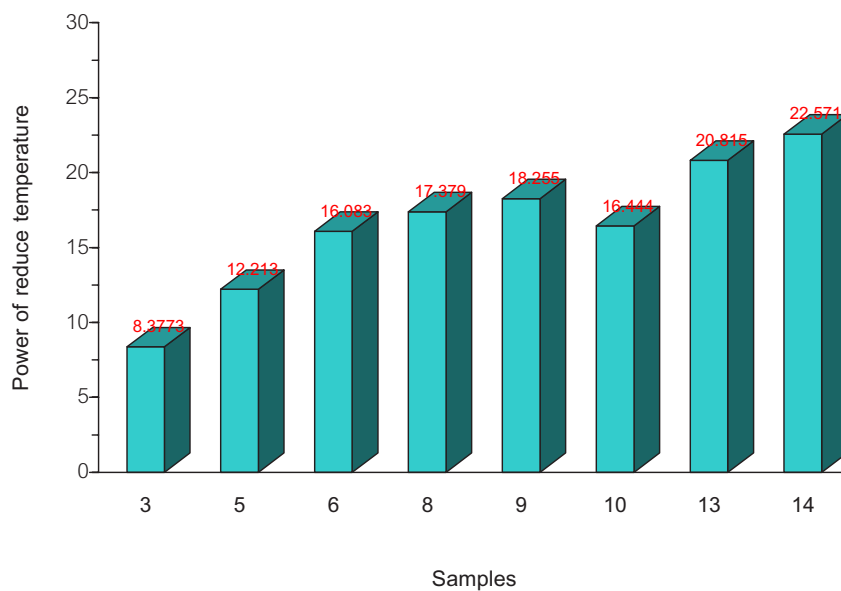


รูป ก.52 แสดงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งมากที่สุดของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14
ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ และ $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

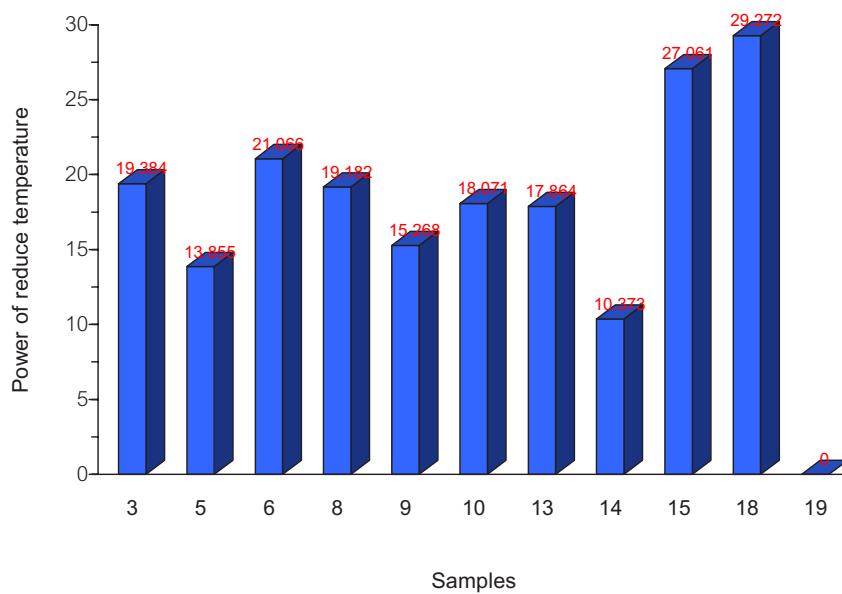
ก.2.4 เลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอน



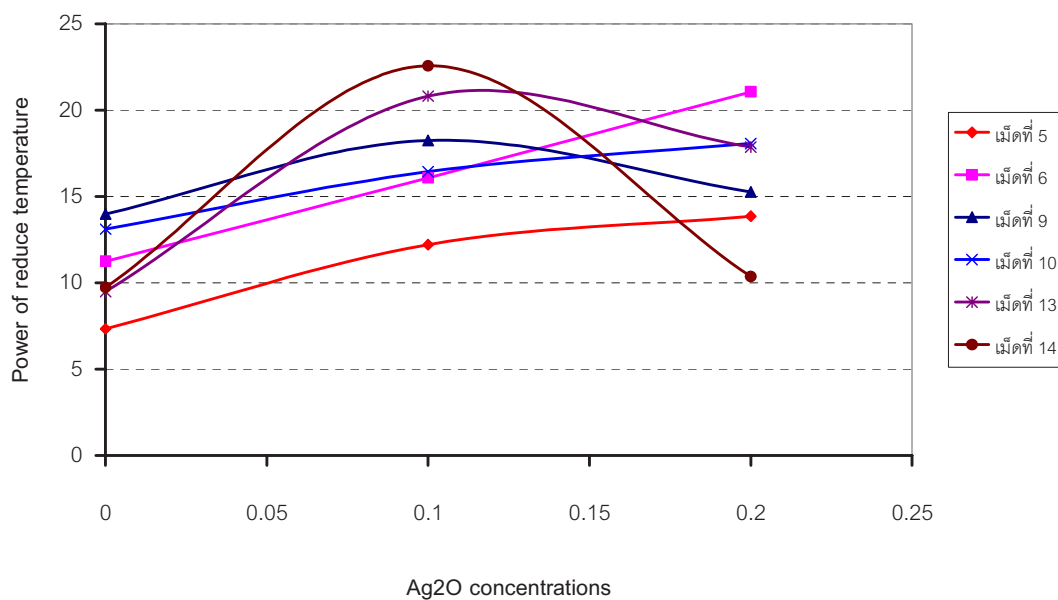
รูป ก.53 แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอนของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ



รูป ก.54 แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอนของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$



รูป ก.55 แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอนของเม็ดสารตัวอย่างในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.2}$



รูป ก.56 แสดงค่าเลขชี้กำลังของอุณหภูมิลดทอนของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ, เจือด้วย $(Ag_2O)_{0.1}$ และ $(Ag_2O)_{0.2}$

ภาคผนวก ข

อนุหภูมิวิฤตของสารตัวนำชนิดยิ่ง YBCO

ตาราง ข.1 แสดงค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเมดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO ไม่เจือ Ag_2O จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เมดสารตัวอย่างที่	สัดส่วน xyz	อุณหภูมิวิกฤต (K)	
		$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{zero})}$
5	226	95	83
6	136	96	87
9	235	96	86
10	145	96	84
13	334	98	87
14	244	98	87

ที่มา : กำชัย ตรีชัยรัมย์, จ่านงค์ ฉายเชิด, พูลศักดิ์ อินทวิ และ สงวนสิริ รุ่งเกียรติสกุล,
 “แผนภาพสมมูลของระบบ Y-Ba-Cu-O ที่ 950 °C,” วารสารโลหะ วัสดุ และแร่ 5,
 2 (มิถุนายน 2539) : 57 – 64.

ตาราง ข.2 แสดงค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเมดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เมดสารตัวอย่างที่	สัดส่วน xyz	อุณหภูมิวิกฤต (K)	
		$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{zero})}$
3	127	96	90
5	226	96	90
6	136	96	90
8	325	96	90
9	235	102	96
10	145	96	90
13	334	98	94
14	244	96	90

ที่มา : กำชัย ศรีชัยรัมย์, จำนงค์ นายเชิด, พูลศักดิ์ อินทวิ และ สงวนสิริ รุ่งเกียรติ์สกุล,
 “แผนภาพสมมูลของระบบ Y-Ba-Cu-O ที่ 950 °C,” วารสารโลหะ วัสดุ และแร่ 5,
 2 (มิถุนายน 2539) : 57 – 64.

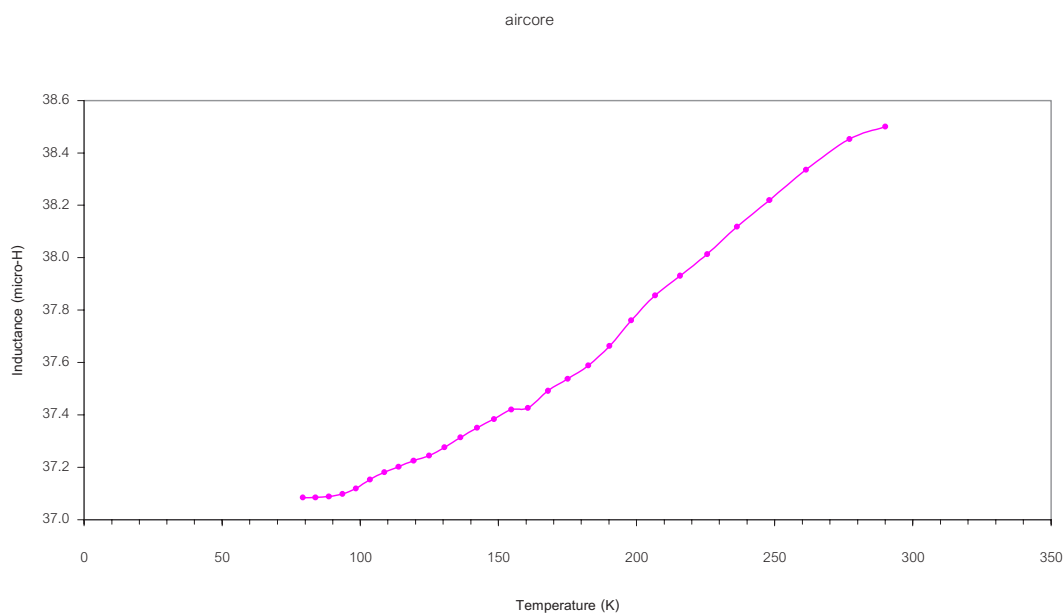
ตาราง ข.3 แสดงค่า $T_{c(\text{onset})}$ และ $T_{c(\text{zero})}$ ของเมดสารตัวอย่างสารตัวนำยวดยิ่งในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เมดสารตัวอย่างที่	สัดส่วน xyz	อุณหภูมิวิกฤต (K)	
		$T_{c(\text{onset})}$	$T_{c(\text{zero})}$
3	127	103	91
5	226	102	90
6	136	103	80
8	325	98	88
9	235	105	90
10	145	100	83
13	334	103	90.5
14	244	103	91
15	154	106	96
18	433	96	89
19	343	101	92.5

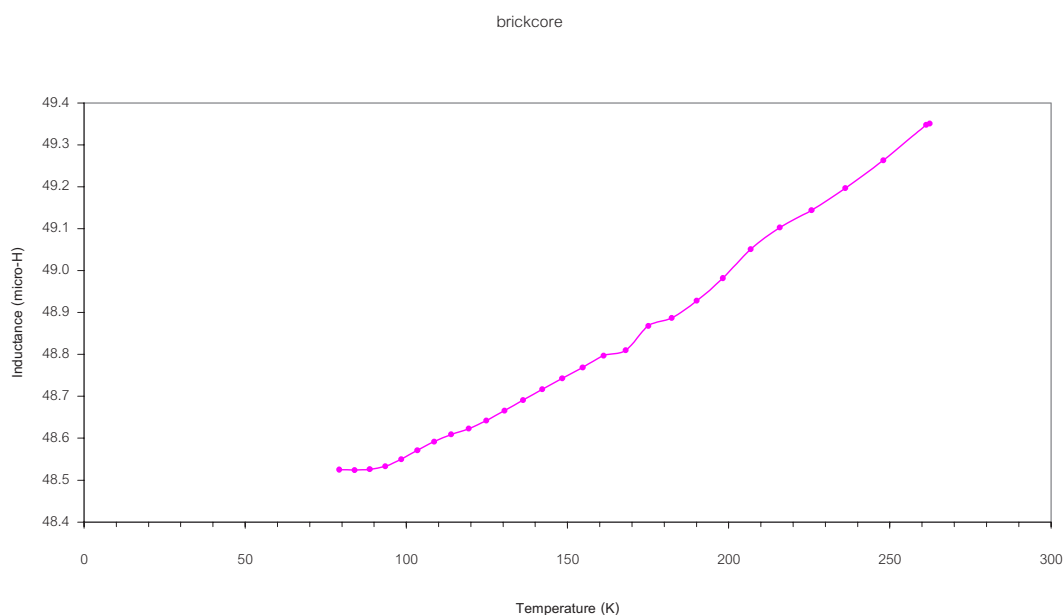
ที่มา : กำชัย ตรีชัยรัมย์, จ่านงค์ ฉายเชิด, พูลศักดิ์ อินทวิ และ สงวนสิริ รุ่งเกียรติสกุล,
 “แผนภาพสมมูลของระบบ Y-Ba-Cu-O ที่ 950 °C,” วารสารโลหะ วัสดุ และแร่ 5,
 2 (มิถุนายน 2539) : 57 – 64.

ภาคผนวก ค

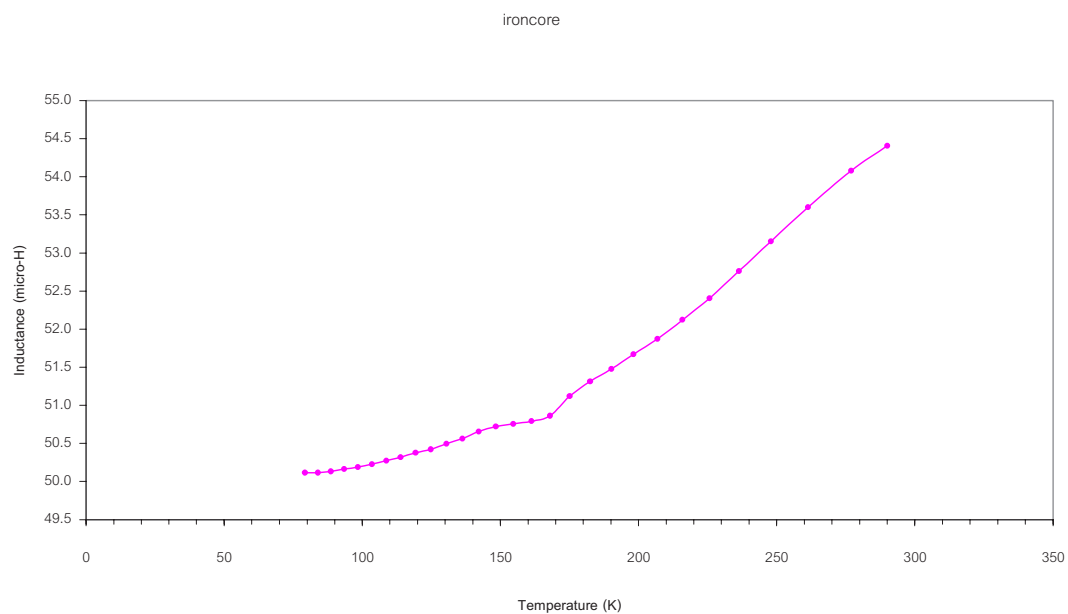
กราฟค่าความเหนียวนำของขดลวดทองแดงแกนอากาศ อีจู้ และเหล็กกับอุณหภูมิ



รูป ค.1 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงแกนอากาศเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ



รูป ค.2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงแกนอิฐเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ



รูป ค.3 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดงแกนเหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

ภาคผนวก ง

รูปภาพวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือทดลอง



(ก)



(ข)

รูป ง.1 แสดงภาพสารตั้งต้น Y_2O_3 , BaO และ CuO



รูป ง.2 แสดงภาพเครื่องชั่งสารที่ตำแหน่ง Sartorius



รูป ง.3 แสดงภาพแม่พิมพ์อัดเม็ดสารและคีมจับ



รูป ง.4 แสดงภาพครกหินอ่อนที่มีสารตั้งต้นบดคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน



รูป ง.5 แสดงภาพอะซิโตนใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ต่าง ๆ



รูป ง.6 แสดงภาพถังเก็บไนโตรเจนเหลว



รูป ง.7 แสดงภาพภาชนะเก็บสารตัวอย่างที่ใส่เมล็ดสารดูความขึ้น



รูป ง.8 แสดงภาพเครื่องอัดเม็ดสารไฮดรอลิก



รูป ง.9 แสดงภาพเตาเผาสาร VECSTAR FURNACES รุ่น VF2



รูป ง.10 แสดงภาพจานเพาะเชื้อและปีกเกอร์ใส่ใน โตรเจนเหลว



รูป ง.11 แสดงภาพการทดลองการยกแท่งแม่เหล็กเล็กๆ ของเมล็ดสารตัวอย่าง



รูป ง.12 แสดงภาพเม็ดสารตัวอย่างพันด้วยลวดทองแดง



รูป ง.13 แสดงภาพเครื่องวัด Precision LRC HEWLETT PACKARD รุ่น 4284A



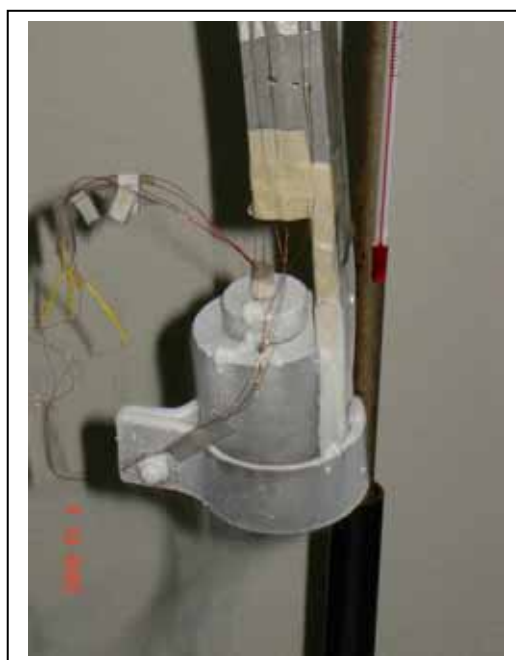
รูป ง.14 แสดงภาพเครื่องวัดความต่างศักย์และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่



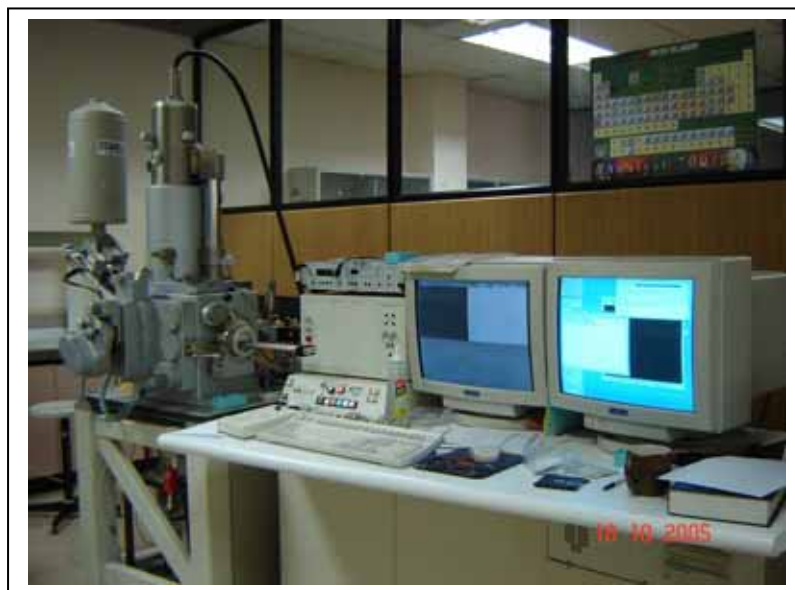
รูป ง.15 แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือในการเก็บข้อมูลการทดลอง



รูป ง.16 แสดงภาพถังบรรจุไนโตรเจนเหลวขณะแช่เม็ดสารตัวอย่าง



รูป ง.17 แสดงภาพภาชนะอลูมิเนียมภายในบรรจุเม็ดสารตัวอย่างและเทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมิ



(ก)



(ข)

รูป ง.18 แสดงกล้องถ่ายภาพ SEM camscan รุ่น MX2000

ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการทดลอง

ตาราง จ.1 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
76.902	39.833			3.737E-03		
78.030	39.835	0.002188		3.737E-03	4.51E-07	
79.187	39.838	0.002114	-0.0002	3.738E-03	4.36E-07	-4.1E-08
80.396	39.840	0.001718	2.89E-05	3.738E-03	3.54E-07	6.08E-09
81.516	39.842	0.002181	0.000354	3.739E-03	4.5E-07	7.31E-08
82.688	39.845	0.002529	0.002618	3.740E-03	5.22E-07	5.41E-07
83.889	39.848	0.008392	0.008052	3.740E-03	1.73E-06	1.67E-06
85.071	39.865	0.02172	0.002747	3.744E-03	4.5E-06	5.72E-07
86.283	39.900	0.014969	-0.00868	3.751E-03	3.1E-06	-1.8E-06
87.476	39.901	0.000853	-0.00603	3.751E-03	1.77E-07	-1.2E-06
88.627	39.902	0.000841	4.21E-06	3.751E-03	1.75E-07	8.95E-10
89.855	39.903	0.000863	-0.00018	3.752E-03	1.79E-07	-3.8E-08
90.944	39.904	0.000416	-0.00019	3.752E-03	8.66E-08	-4E-08
92.256	39.904	0.000399	0.00016	3.752E-03	8.29E-08	3.32E-08
93.453	39.905	0.000817	0.000163	3.752E-03	1.7E-07	3.39E-08
94.705	39.906	0.000797	-3.1E-06	3.752E-03	1.66E-07	-6.3E-10
95.962	39.907	0.000809	-2.4E-08	3.752E-03	1.68E-07	1.3E-11
97.177	39.908	0.000797	0.000147	3.753E-03	1.66E-07	3.06E-08
98.472	39.909	0.001178	0.000793	3.753E-03	2.45E-07	1.65E-07
99.724	39.911	0.002817	0.000815	3.753E-03	5.86E-07	1.7E-07
100.957	39.916	0.003204	-0.0005	3.754E-03	6.67E-07	-1E-07
102.221	39.919	0.001562	-0.00079	3.755E-03	3.25E-07	-1.6E-07
103.517	39.920	0.001189	-0.00155	3.755E-03	2.48E-07	-3.2E-07

ตาราง จ.1 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
104.744	39.922	-0.00234	0.001658	3.755E-03	-4.9E-07	3.46E-07
106.079	39.914	0.005437	0.002134	3.754E-03	1.13E-06	4.45E-07
107.319	39.936	0.003153	-0.00411	3.758E-03	6.57E-07	-8.6E-07
108.617	39.922	-0.00499	0.00011	3.755E-03	-1E-06	2.32E-08
109.921	39.923	0.003439	0.00307	3.756E-03	7.17E-07	6.41E-07
111.234	39.931	0.00304	-0.00074	3.757E-03	6.34E-07	-1.6E-07
112.553	39.931	0.001482	-0.00016	3.757E-03	3.09E-07	-3.3E-08
113.933	39.935	0.002604	0.000442	3.758E-03	5.44E-07	9.23E-08
115.241	39.938	0.002669	-0.00042	3.759E-03	5.57E-07	-8.8E-08
116.556	39.942	0.001501	-0.00072	3.760E-03	3.14E-07	-1.5E-07
117.906	39.942	0.000739	-0.00015	3.760E-03	1.54E-07	-3.2E-08
119.263	39.944	0.001091	0.000134	3.760E-03	2.28E-07	2.79E-08
120.657	39.945	0.001106	-8.5E-07	3.760E-03	2.31E-07	-1.4E-10
121.976	39.947	0.001088	0.000635	3.761E-03	2.28E-07	1.33E-07
123.413	39.948	0.002856	0.001421	3.761E-03	5.98E-07	2.98E-07
124.777	39.955	0.005067	0.000384	3.762E-03	1.06E-06	8.07E-08
126.176	39.962	0.003917	6.68E-05	3.764E-03	8.21E-07	1.48E-08
127.585	39.966	0.005255	0.001432	3.765E-03	1.1E-06	3.01E-07
129.031	39.977	0.008006	0.002183	3.767E-03	1.68E-06	4.61E-07
130.458	39.989	0.011526	0.004522	3.770E-03	2.43E-06	9.59E-07
131.894	40.010	0.020954	0.008708	3.774E-03	4.43E-06	1.86E-06
133.369	40.050	0.036877	0.039882	3.782E-03	7.84E-06	8.7E-06
134.795	40.117	0.136673	0.179231	3.797E-03	2.97E-05	4.01E-05
135.674	40.365	0.449965	0.76355	3.851E-03	0.0001	0.00018

ตาราง จ.1 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
135.938	40.631	1.008884	0.853241	3.911E-03	0.000235	0.000226
136.232	40.928	0.92611	-0.4597	3.982E-03	0.000226	-8.1E-05
136.555	41.203	0.724957	-0.65416	4.051E-03	0.000185	-0.00014
136.821	41.355	0.540811	0.007267	4.091E-03	0.000145	3.37E-05
137.175	41.538	0.729458	0.436696	4.140E-03	0.000206	0.000151
137.470	41.829	0.824575	-0.33662	4.224E-03	0.000242	-6.1E-05
137.707	41.977	0.550245	-0.39178	4.269E-03	0.000173	-7.7E-05
138.063	42.155	0.592456	0.385325	4.326E-03	0.000197	0.00018
138.330	42.346	0.790237	0.314381	4.392E-03	0.000285	0.000188
138.627	42.601	0.769889	-0.6427	4.487E-03	0.000303	-0.00019
138.925	42.804	0.4079	-1.12054	4.572E-03	0.000172	-0.00043
139.223	42.844	0.102345	-0.63271	4.590E-03	4.61E-05	-0.00026
139.492	42.862	0.049337	-0.15088	4.598E-03	2.26E-05	-6.8E-05
139.791	42.872	0.016714	-0.06736	4.603E-03	7.69E-06	-3.1E-05
140.150	42.873	0.005008	-0.02204	4.603E-03	2.31E-06	-1E-05
140.390	42.875	0.003508	-0.00613	4.604E-03	1.62E-06	-2.8E-06
140.720	42.875	0.001513	-0.00028	4.604E-03	7E-07	-1.3E-07
141.051	42.876	0.003324	0.003291	4.605E-03	1.54E-06	1.53E-06
141.322	42.877	0.003493	0.001658	4.605E-03	1.62E-06	7.74E-07
141.623	42.878	0.004273	-0.00021	4.606E-03	1.98E-06	-9.2E-08
142.258	42.881	0.003297	-0.00042	4.607E-03	1.53E-06	-1.9E-07
143.746	42.885	0.003382	0.000302	4.609E-03	1.58E-06	1.45E-07
145.215	42.891	0.00419	0.000224	4.612E-03	1.96E-06	1.09E-07
146.849	42.898	0.004078	-9.5E-05	4.615E-03	1.92E-06	-4E-08

ตาราง จ.1 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
148.403	42.904	0.003886	0.000121	4.618E-03	1.83E-06	6.33E-08
149.937	42.910	0.004453	-2.8E-05	4.621E-03	2.11E-06	-7.3E-09
151.547	42.918	0.003797	-7.9E-05	4.624E-03	1.81E-06	-3.2E-08
154.678	42.928	0.004076	0.00017	4.629E-03	1.96E-06	8.79E-08
157.925	42.944	0.004884	0.000133	4.637E-03	2.37E-06	7.21E-08
161.229	42.960	0.00495	0.00041	4.645E-03	2.43E-06	2.17E-07
164.592	42.977	0.007621	-0.00036	4.653E-03	3.82E-06	-1.7E-07
168.053	43.012	0.002492	-0.0001	4.671E-03	1.27E-06	-3.7E-08
186.264	43.031	0.005349	0.000124	4.681E-03	3.02E-06	8.39E-08
206.750	43.219	0.007276	6.06E-06	4.787E-03	4.51E-06	3.12E-08
230.792	43.355	0.005619		4.882E-03	4.41E-06	
253.021	43.479			4.991E-03		

ตาราง จ.2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.077	36.536			3.247E-03		
79.210	36.536	0		3.247E-03	0	
81.563	36.536	0.000213	0.00018	3.247E-03	4.32E-08	3.66E-08
83.912	36.537	0.000847	0.000177	3.247E-03	1.72E-07	3.61E-08
86.283	36.540	0.00105	-9.1E-05	3.248E-03	2.13E-07	-1.8E-08
88.675	36.542	0.000416	-0.00022	3.248E-03	8.46E-08	-4.4E-08
91.089	36.542	0	8.3E-05	3.248E-03	0	1.69E-08

ตาราง จ.2 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
93.502	36.542	0.000817	0.000454	3.248E-03	1.66E-07	9.24E-08
95.987	36.546	0.002224	0.000323	3.249E-03	4.53E-07	6.59E-08
98.447	36.553	0.002415	-4.9E-05	3.251E-03	4.92E-07	-9.8E-09
100.957	36.558	0.001982	-9.2E-05	3.252E-03	4.04E-07	-1.9E-08
103.492	36.563	0.001952	6.78E-05	3.253E-03	3.98E-07	1.4E-08
106.079	36.568	0.00233	7.07E-05	3.254E-03	4.76E-07	1.46E-08
108.643	36.575	0.002316	-4.4E-05	3.255E-03	4.73E-07	-8.9E-09
111.260	36.580	0.0021	-9.7E-06	3.256E-03	4.3E-07	-1.8E-09
113.880	36.586	0.002266	5.93E-05	3.257E-03	4.64E-07	1.23E-08
116.556	36.592	0.002415	0.000122	3.259E-03	4.95E-07	2.52E-08
119.263	36.599	0.002922	0.000179	3.260E-03	6E-07	3.7E-08
122.031	36.608	0.003396	0.00048	3.262E-03	6.98E-07	9.91E-08
123.386	36.613	0.004902	0.000951	3.263E-03	1.01E-06	1.96E-07
124.275	36.619	0.00553	-0.00013	3.264E-03	1.14E-06	-2.6E-08
124.832	36.621	0.004715	0.001525	3.265E-03	9.71E-07	3.16E-07
125.335	36.624	0.007147	0.003557	3.265E-03	1.47E-06	7.35E-07
125.952	36.629	0.008696	0.002288	3.266E-03	1.79E-06	4.74E-07
126.485	36.634	0.009778	0.005343	3.267E-03	2.02E-06	1.11E-06
127.077	36.640	0.014707	0.012199	3.269E-03	3.04E-06	2.53E-06
127.641	36.651	0.02388	0.022205	3.271E-03	4.95E-06	4.63E-06
128.207	36.667	0.039813	0.038824	3.274E-03	8.27E-06	8.15E-06
128.746	36.695	0.066786	0.089262	3.280E-03	1.4E-05	1.9E-05
129.315	36.741	0.138716	0.184942	3.290E-03	2.93E-05	4.05E-05
129.914	36.857	0.282772	0.288999	3.314E-03	6.12E-05	6.71E-05
130.458	37.064	0.468829	0.203234	3.359E-03	0.000106	5.35E-05

ตาราง จ.2 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
131.060	37.394	0.515557	0.091635	3.436E-03	0.000122	3.74E-05
131.606	37.656	0.574051	0.39113	3.500E-03	0.000149	0.000152
132.211	38.055	0.96593	0.290887	3.607E-03	0.000297	0.000154
132.789	38.799	0.918262	-0.59551	3.852E-03	0.000331	-0.00015
133.369	39.118	0.276548	-0.78882	3.991E-03	0.000121	-0.00028
133.950	39.120	0.002644	-0.24213	3.991E-03	1.31E-06	-0.00011
134.504	39.121	0.001804	-7.2E-05	3.992E-03	8.93E-07	-3.2E-08
135.058	39.122	0.002564	0.00059	3.992E-03	1.27E-06	2.95E-07
135.674	39.124	0.002495	-0.00052	3.993E-03	1.24E-06	-2.6E-07
136.261	39.125	0.001939	-6.4E-05	3.994E-03	9.65E-07	-2.9E-08
137.737	39.128	0.002363	0.00026	3.995E-03	1.18E-06	1.32E-07
139.223	39.132	0.002709	0.000111	3.997E-03	1.36E-06	5.85E-08
140.690	39.136	0.00269	4.21E-05	3.999E-03	1.35E-06	2.61E-08
142.197	39.140	0.002834	4.92E-05	4.001E-03	1.43E-06	2.89E-08
145.276	39.149	0.002915	8.21E-06	4.006E-03	1.48E-06	7.9E-09
148.371	39.158	0.002885	-8.8E-05	4.011E-03	1.48E-06	-4.1E-08
151.515	39.167	0.002367	-0.00018	4.015E-03	1.23E-06	-9.3E-08
154.710	39.173	0.001716	-8.3E-05	4.018E-03	8.95E-07	-4.1E-08
157.925	39.178	0.001831	3.42E-05	4.021E-03	9.62E-07	1.98E-08
161.263	39.185	0.00194	-3.2E-05	4.025E-03	1.03E-06	-1.5E-08
164.626	39.191	0.00162	0.000157	4.028E-03	8.62E-07	9.36E-08
168.053	39.196	0.003004	0.000114	4.031E-03	1.66E-06	7.2E-08
186.264	39.256	0.004078	3.96E-05	4.064E-03	2.42E-06	3.67E-08
206.794	39.354	0.004537	-1E-06	4.124E-03	3.08E-06	2.65E-08
230.792	39.458	0.004033	-1.1E-05	4.201E-03	3.6E-06	3.57E-08

ตาราง จ.2 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
261.348	39.574	0.003943		4.320E-03	5.03E-06	
273.656	39.627			4.417E-03		

ตาราง จ.3 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.007	39.283			3.282E-03		
79.187	39.290	0.004697		3.283E-03	8.04E-07	
80.349	39.294	0.002577	-0.00074	3.284E-03	4.41E-07	-1.3E-07
81.516	39.296	0.002963	0.001822	3.284E-03	5.07E-07	3.12E-07
82.711	39.301	0.00688	0.007566	3.285E-03	1.18E-06	1.3E-06
83.841	39.312	0.020558	0.005444	3.287E-03	3.53E-06	9.38E-07
85.095	39.350	0.019855	-0.0059	3.293E-03	3.41E-06	-1E-06
86.259	39.360	0.006299	-0.00641	3.295E-03	1.09E-06	-1.1E-06
87.476	39.365	0.004599	-0.00052	3.296E-03	7.93E-07	-9E-08
88.651	39.371	0.005044	0.000353	3.297E-03	8.71E-07	6.15E-08
89.855	39.377	0.00544	0.000995	3.298E-03	9.4E-07	1.73E-07
91.041	39.384	0.007421	0.001778	3.299E-03	1.28E-06	3.09E-07
92.281	39.395	0.009751	0.002013	3.301E-03	1.69E-06	3.5E-07
93.502	39.408	0.012376	0.002413	3.303E-03	2.15E-06	4.22E-07
94.705	39.425	0.015601	0.001756	3.306E-03	2.71E-06	3.09E-07
95.938	39.446	0.016654	-0.00066	3.310E-03	2.9E-06	-1.1E-07
97.227	39.467	0.013948	0.005292	3.314E-03	2.43E-06	9.35E-07

ตาราง จ.3 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
98.447	39.481	0.029933	0.019758	3.316E-03	5.25E-06	3.5E-06
99.699	39.541	0.062794	0.031085	3.327E-03	1.11E-05	5.6E-06
100.931	39.637	0.107158	0.034702	3.344E-03	1.92E-05	6.47E-06
102.246	39.814	0.151202	0.016067	3.375E-03	2.76E-05	3.3E-06
103.517	40.028	0.148707	-0.01072	3.415E-03	2.77E-05	-1.5E-06
104.795	40.193	0.123881	-0.01141	3.446E-03	2.36E-05	-1.7E-06
106.028	40.339	0.120059	-0.0059	3.474E-03	2.34E-05	-7.7E-07
107.319	40.496	0.108995	-0.013	3.505E-03	2.17E-05	-2.3E-06
108.643	40.624	0.086063	-0.00627	3.531E-03	1.75E-05	-9.5E-07
109.921	40.720	0.092677	0.00817	3.551E-03	1.92E-05	2E-06
111.286	40.869	0.10766	0.013532	3.582E-03	2.27E-05	3.31E-06
112.606	41.009	0.129002	0.028455	3.612E-03	2.81E-05	7.07E-06
113.906	41.207	0.182215	0.051632	3.655E-03	4.13E-05	1.33E-05
115.268	41.494	0.26643	0.067223	3.722E-03	6.34E-05	1.87E-05
116.072	41.784	0.327798	0.064384	3.793E-03	8.19E-05	2.27E-05
116.610	41.934	0.352852	0.04917	3.831E-03	9.4E-05	2.26E-05
117.149	42.164	0.380751	-0.02121	3.894E-03	0.000106	3.69E-06
117.689	42.345	0.329954	-0.03232	3.946E-03	9.79E-05	3.32E-06
118.231	42.521	0.345778	-0.00482	4.000E-03	0.00011	1.13E-05
118.774	42.720	0.324726	-0.08254	4.065E-03	0.00011	-1.5E-05
119.318	42.874	0.256045	-0.0929	4.120E-03	9.35E-05	-2.1E-05
119.863	42.999	0.2235	-0.09793	4.167E-03	8.76E-05	-2.9E-05
120.383	43.112	0.151767	-0.15358	4.213E-03	6.26E-05	-5.8E-05
120.931	43.161	0.059563	-0.116	4.234E-03	2.56E-05	-4.7E-05
121.508	43.179	0.021284	-0.04639	4.242E-03	9.34E-06	-2E-05

ตาราง จ.3 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
122.058	43.185	0.007254	-0.01593	4.244E-03	3.21E-06	-7E-06
122.611	43.187	0.003711	-0.0033	4.245E-03	1.65E-06	-1.5E-06
123.136	43.189	0.003702	-0.00094	4.246E-03	1.64E-06	-4.1E-07
123.691	43.191	0.002701	-0.00097	4.247E-03	1.2E-06	-4.3E-07
124.247	43.192	0.002628	0.000497	4.247E-03	1.17E-06	2.28E-07
124.832	43.194	0.003268	0.000223	4.248E-03	1.46E-06	1.03E-07
127.613	43.203	0.003378	1.18E-05	4.252E-03	1.52E-06	8.31E-09
130.458	43.213	0.003335	1.2E-05	4.257E-03	1.51E-06	9.47E-09
133.311	43.222	0.003446	-2.7E-05	4.261E-03	1.57E-06	-4.3E-09
136.261	43.233	0.00318	-4.4E-05	4.266E-03	1.48E-06	-1.7E-08
151.547	43.280	0.002645	2.33E-05	4.288E-03	1.26E-06	1.61E-08
168.018	43.317	0.003922	7.63E-05	4.306E-03	1.99E-06	4.76E-08
186.226	43.416	0.005293	2.95E-05	4.357E-03	2.91E-06	3.18E-08
206.750	43.522	0.005065	-5.3E-06	4.419E-03	3.23E-06	3.18E-08
230.845	43.642	0.005055	-2.8E-06	4.501E-03	4.33E-06	4.63E-08
261.348	43.798	0.004912		4.655E-03	5.76E-06	
272.582	43.847			4.741E-03		

ตาราง จ.4 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุขของระบบ YBCO ไม่เจือ

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
76.925	30.814			2.372E-03		
79.210	30.817	0.001525		2.372E-03	1.56E-07	

ตาราง จ.4 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
81.516	30.821	0.001496	-5.4E-05	2.372E-03	1.53E-07	-5.5E-09
83.889	30.824	0.001271	3.89E-05	2.373E-03	1.3E-07	3.99E-09
86.235	30.827	0.00168	0.000211	2.373E-03	1.72E-07	2.17E-08
88.651	30.832	0.002277	7.9E-05	2.373E-03	2.34E-07	8.11E-09
91.065	30.838	0.002061	-0.00022	2.374E-03	2.11E-07	-2.2E-08
93.502	30.842	0.001219	-4.9E-05	2.375E-03	1.25E-07	-5E-09
95.987	30.844	0.00182	0.000364	2.375E-03	1.87E-07	3.73E-08
98.447	30.851	0.003018	0.000315	2.375E-03	3.1E-07	3.24E-08
100.957	30.859	0.003387	-0.00017	2.376E-03	3.48E-07	-1.8E-08
103.466	30.868	0.002147	-0.00036	2.377E-03	2.2E-07	-3.7E-08
106.079	30.870	0.001546	6.75E-05	2.377E-03	1.59E-07	6.94E-09
108.643	30.876	0.002497	7.18E-05	2.378E-03	2.56E-07	7.38E-09
111.286	30.883	0.001919	-0.00012	2.379E-03	1.97E-07	-1.2E-08
113.853	30.886	0.001888	0.00026	2.379E-03	1.94E-07	2.67E-08
116.583	30.893	0.003294	0.000701	2.380E-03	3.38E-07	7.21E-08
119.318	30.904	0.005719	0.001868	2.381E-03	5.88E-07	1.92E-07
122.003	30.924	0.013419	0.003526	2.383E-03	1.38E-06	3.63E-07
124.832	30.978	0.025162	0.010345	2.388E-03	2.59E-06	1.07E-06
126.176	31.029	0.05659	0.027555	2.394E-03	5.84E-06	2.85E-06
127.077	31.105	0.087002	0.059743	2.402E-03	8.99E-06	6.2E-06
127.613	31.154	0.142425	0.072551	2.407E-03	1.48E-05	7.57E-06
128.179	31.262	0.166977	0.055324	2.418E-03	1.73E-05	5.84E-06
128.775	31.348	0.206703	0.080041	2.427E-03	2.15E-05	8.48E-06
129.287	31.491	0.255652	0.197609	2.442E-03	2.67E-05	2.1E-05
129.886	31.632	0.426224	0.375754	2.456E-03	4.49E-05	4.01E-05

ตาราง จ.4 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
130.458	31.990	0.695564	0.337049	2.494E-03	7.37E-05	3.67E-05
130.773	32.249	0.725204	0.240977	2.522E-03	7.74E-05	2.82E-05
131.002	32.385	0.826819	0.459189	2.536E-03	8.91E-05	5.21E-05
131.318	32.700	0.975674	-0.09887	2.570E-03	10.6E-05	-8.7E-06
131.635	33.002	0.764296	-0.40868	2.603E-03	8.36E-05	-4.2E-05
131.923	33.162	0.728636	0.603728	2.621E-03	8.03E-05	7.01E-05
132.153	33.380	1.077496	0.797734	2.645E-03	12.0E-05	9.24E-05
132.500	33.784	1.189139	0.322455	2.690E-03	0.000134	4.1E-05
132.789	34.136	1.282498	0.060311	2.730E-03	0.000146	1.35E-05
133.021	34.452	1.220553	-0.49978	2.766E-03	0.000141	-5.2E-05
133.340	34.808	1.007335	-0.34338	2.807E-03	0.000117	-3.5E-05
133.659	35.095	1.001366	1.038627	2.841E-03	0.000118	0.000131
133.950	35.419	1.641071	1.293537	2.880E-03	0.000197	0.000164
134.241	36.050	1.754123	-0.25262	2.956E-03	0.000214	-1.8E-05
134.504	36.390	1.501234	0.305582	2.998E-03	0.000187	5.55E-05
134.825	36.926	1.932436	0.609688	3.065E-03	0.000246	9.27E-05
135.088	37.519	1.857436	0.247656	3.142E-03	0.000241	6.03E-05
135.351	37.904	2.062835	2.076645	3.192E-03	0.000278	0.000322
135.703	38.788	3.134932	1.732895	3.312E-03	0.000439	0.000292
135.996	39.927	3.181088	-1.28858	3.476E-03	0.000466	-0.00012
136.290	40.657	2.377845	-1.02755	3.587E-03	0.000369	-7.6E-05
136.585	41.326	2.576531	2.463236	3.693E-03	0.000422	0.000527
136.880	42.175	3.829096	6.423041	3.835E-03	0.000679	0.001586
137.145	43.472	6.176297	3.159389	4.073E-03	0.001311	0.00134
137.470	45.824	5.695685	-5.83996	4.610E-03	0.001471	-0.00072

ตาราง จ.4 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
137.766	47.010	2.548679	-8.3106	4.987E-03	0.000861	-0.00193
138.063	47.334	0.771957	-3.86873	5.120E-03	0.000327	-0.00125
138.360	47.468	0.253372	-1.338	5.181E-03	0.000117	-0.00057
138.627	47.477	0.016807	-0.42048	5.185E-03	8.04E-06	-0.00019
138.955	47.478	0.003197	-0.0233	5.186E-03	1.53E-06	-1.1E-05
139.253	47.479	0.002233	-0.00077	5.186E-03	1.07E-06	-3.7E-07
139.850	47.480	0.002507	0.000991	5.187E-03	1.2E-06	4.78E-07
140.450	47.482	0.003418	0.000698	5.188E-03	1.64E-06	3.38E-07
141.020	47.484	0.003323	-0.00015	5.189E-03	1.6E-06	-7.1E-08
141.653	47.486	0.003233	0.000359	5.190E-03	1.56E-06	1.79E-07
142.258	47.488	0.003767	0.000331	5.191E-03	1.82E-06	1.64E-07
143.777	47.494	0.003935	7.18E-05	5.194E-03	1.91E-06	3.88E-08
145.307	47.500	0.003986	0.000195	5.197E-03	1.94E-06	1.01E-07
146.787	47.506	0.004522	0.000353	5.200E-03	2.21E-06	1.79E-07
148.403	47.514	0.005079	0.0004	5.203E-03	2.49E-06	2.05E-07
149.937	47.522	0.005783	-0.00027	5.207E-03	2.86E-06	-1.2E-07
151.515	47.532	0.004248	-0.00063	5.212E-03	2.11E-06	-3.1E-07
154.645	47.542	0.002822	-0.00024	5.217E-03	1.41E-06	-1.2E-07
157.893	47.550	0.002734	-2.5E-05	5.221E-03	1.38E-06	-9.8E-09
161.229	47.560	0.00266	-3.8E-05	5.226E-03	1.35E-06	-1.7E-08
164.660	47.568	0.002479	0.000293	5.230E-03	1.26E-06	1.64E-07
168.087	47.577	0.004667	0.000177	5.235E-03	2.47E-06	1.07E-07

ตาราง จ.4 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
186.303	47.669	0.006304	4.3E-05	5.284E-03	3.58E-06	4.02E-08
206.794	47.821	0.006331	-8E-06	5.374E-03	4.03E-06	2.64E-08
230.845	47.951	0.005946		5.463E-03	4.76E-06	
256.411	48.116			5.610E-03		

ตาราง จ.5 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
76.925	18.104			2.066E-04		
78.077	18.281	0.086618		2.090E-04	1.14E-06	
79.210	18.302	0.012505	-0.03439	2.092E-04	1.65E-07	-4.5E-07
80.396	18.310	0.00687	-0.00253	2.093E-04	9.08E-08	-3.3E-08
81.539	18.318	0.006612	0.000161	2.095E-04	8.74E-08	2.14E-09
82.664	18.325	0.007236	0.000974	2.095E-04	9.57E-08	1.29E-08
83.889	18.335	0.008901	0.000765	2.097E-04	1.18E-07	1.01E-08
85.024	18.346	0.009041	-0.00082	2.098E-04	1.2E-07	-1.1E-08
86.211	18.356	0.007	-0.00082	2.100E-04	9.26E-08	-1.1E-08
87.452	18.363	0.007038	0.001279	2.100E-04	9.31E-08	1.69E-08
88.627	18.373	0.010089	0.002731	2.102E-04	1.34E-07	3.62E-08
89.831	18.387	0.013535	0.004318	2.104E-04	1.79E-07	5.72E-08
91.065	18.406	0.020617	0.003894	2.106E-04	2.73E-07	5.17E-08
92.256	18.437	0.022979	0.002219	2.110E-04	3.04E-07	2.96E-08
93.502	18.462	0.026025	0.007402	2.114E-04	3.45E-07	9.84E-08

ตาราง จ.5 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
94.754	18.502	0.041466	0.015409	2.119E-04	5.5E-07	2.05E-07
95.938	18.563	0.063557	0.020098	2.127E-04	8.45E-07	2.68E-07
97.177	18.656	0.090163	0.028685	2.139E-04	1.2E-06	3.85E-07
98.422	18.787	0.134822	0.026668	2.157E-04	1.8E-06	3.6E-07
99.699	18.996	0.157414	-7.5E-05	2.185E-04	2.11E-06	3.98E-09
100.931	19.182	0.134634	-6.3E-06	2.210E-04	1.81E-06	6.65E-09
102.246	19.339	0.157398	0.045297	2.231E-04	2.13E-06	6.22E-07
103.466	19.581	0.249459	0.050988	2.264E-04	3.39E-06	7.07E-07
104.744	19.962	0.284736	0.002176	2.316E-04	3.89E-06	4.76E-08
106.079	20.325	0.255146	0.014507	2.365E-04	3.51E-06	2.27E-07
107.319	20.619	0.322092	0.048228	2.406E-04	4.48E-06	7.01E-07
108.669	21.159	0.380023	0.040131	2.481E-04	5.33E-06	6.07E-07
109.974	21.628	0.428645	0.05164	2.547E-04	6.09E-06	7.99E-07
111.286	22.281	0.515194	0.068019	2.641E-04	7.42E-06	1.07E-06
112.606	22.984	0.607672	0.117877	2.743E-04	8.91E-06	1.9E-06
113.880	23.857	0.820907	0.22811	2.872E-04	1.23E-05	3.72E-06
115.268	25.169	1.21483	0.356759	3.071E-04	1.88E-05	6.04E-06
116.018	26.455	1.583862	0.341879	3.274E-04	2.53E-05	6.43E-06
116.610	27.295	1.673731	0.340743	3.410E-04	2.74E-05	7.1E-06
116.879	27.896	1.877225	0.314997	3.510E-04	3.14E-05	7.35E-06
117.149	28.307	1.843543	0.35162	3.580E-04	3.14E-05	8.07E-06
117.419	28.891	2.067002	1.154792	3.680E-04	3.57E-05	2.29E-05
117.662	29.368	2.436303	1.259812	3.763E-04	4.32E-05	2.6E-05
117.960	30.209	2.748539	0.75205	3.913E-04	4.98E-05	1.83E-05
118.231	30.931	2.863968	-0.66295	4.046E-04	5.35E-05	-7.4E-06

ตาราง จ.5 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
118.502	31.762	2.38905	-2.17881	4.203E-04	4.57E-05	-3.8E-05
118.774	32.228	1.681103	-0.97898	4.294E-04	3.3E-05	-1.5E-05
119.018	32.630	1.883574	1.23152	4.374E-04	3.79E-05	2.86E-05
119.318	33.253	2.35127	0.827722	4.501E-04	4.86E-05	2.12E-05
119.591	33.975	2.357057	-1.36187	4.652E-04	5E-05	-2.4E-05
119.809	34.410	1.682773	-1.41628	4.746E-04	3.69E-05	-2.7E-05
120.137	34.894	1.583593	0.575371	4.853E-04	3.55E-05	1.72E-05
120.383	35.319	2.013042	1.077175	4.950E-04	4.67E-05	3E-05
120.684	35.996	2.173272	1.534119	5.109E-04	5.2E-05	4.69E-05
120.931	36.510	2.853772	1.164795	5.235E-04	7.24E-05	4.05E-05
121.233	37.562	2.81245	-2.43824	5.507E-04	7.42E-05	-5.5E-05
121.480	38.055	1.514342	-2.58635	5.642E-04	4.23E-05	-6.1E-05
121.783	38.395	1.389768	-0.06595	5.739E-04	4.04E-05	4.59E-06
122.003	38.782	1.479841	-0.39391	5.853E-04	4.47E-05	-6.7E-06
122.334	39.211	1.172563	-0.82187	5.985E-04	3.67E-05	-2.1E-05
122.611	39.494	0.98079	0.418574	6.076E-04	3.18E-05	2.06E-05
122.859	39.726	1.392351	1.861612	6.153E-04	4.75E-05	7.48E-05
123.136	40.226	1.959495	0.30086	6.326E-04	7.12E-05	2.23E-05
123.441	40.866	1.567386	-0.81732	6.567E-04	6.05E-05	-1.2E-05
123.719	41.139	1.483405	0.49613	6.678E-04	6.4E-05	4.76E-05
123.997	41.690	1.842976	-0.46187	6.922E-04	8.69E-05	-1.1E-08
124.275	42.164	1.226531	-1.81774	7.161E-04	6.4E-05	-6.8E-05
124.554	42.373	0.830758	-1.02041	7.278E-04	4.88E-05	-3.9E-05
124.805	42.604	0.686083	-0.58388	7.419E-04	4.34E-05	-2.5E-05
125.112	42.756	0.50481	-0.44196	7.521E-04	3.47E-05	-1.8E-05

ตาราง จ.5 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
125.335	42.872	0.451447	-0.45072	7.604E-04	3.36E-05	-2.6E-05
125.643	42.996	0.265195	-0.63469	7.700E-04	2.07E-05	-4.6E-05
125.924	43.028	0.07809	-0.3958	7.726E-04	6.4E-06	-3.1E-05
126.232	43.042	0.032047	-0.11371	7.737E-04	2.66E-06	-9.3E-06
126.485	43.046	0.014223	-0.03593	7.741E-04	1.19E-06	-3E-06
126.795	43.050	0.011838	-0.01458	7.744E-04	9.93E-07	-1.2E-06
127.077	43.053	0.005601	-0.01843	7.747E-04	4.71E-07	-1.5E-06
127.331	43.053	0.001968	-0.00419	7.747E-04	1.66E-07	-3.5E-07
127.585	43.054	0.003471	0.000656	7.747E-04	2.93E-07	5.58E-08
129.059	43.059	0.003102	-0.00023	7.752E-04	2.62E-07	-1.9E-08
130.486	43.063	0.002794	-0.0001	7.755E-04	2.37E-07	-8.2E-09
131.923	43.067	0.002804	6.92E-06	7.758E-04	2.39E-07	1.14E-09
133.340	43.071	0.002813	-2.3E-05	7.762E-04	2.4E-07	-1.4E-09
134.766	43.075	0.002739	-4.1E-05	7.765E-04	2.35E-07	-2.9E-09
136.261	43.079	0.002693	9.65E-05	7.769E-04	2.32E-07	8.96E-09
139.223	43.087	0.003168	0.000102	7.776E-04	2.75E-07	9.43E-09
142.258	43.098	0.003304	-0.00015	7.785E-04	2.88E-07	-1.2E-08
145.276	43.107	0.00229	3.93E-05	7.793E-04	2.01E-07	4.37E-09
148.371	43.112	0.003544	-0.00019	7.797E-04	3.15E-07	-1.6E-08
151.484	43.129	0.00112	-8E-05	7.813E-04	1E-07	-6.7E-09
168.018	43.134	0.001982	8.8E-05	7.817E-04	1.84E-07	8.91E-09
186.303	43.198	0.004183	6.3E-05	7.877E-04	4.1E-07	7.65E-09

ตาราง จ.5 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
206.750	43.296	0.004423	6.02E-06	7.976E-04	4.8E-07	4.18E-09
230.845	43.395	0.004451	1.55E-06	8.090E-04	5.97E-07	4.03E-09
261.348	43.539	0.004507		8.302E-04	7E-07	
270.558	43.574			8.369E-04		

ตาราง จ.6 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
76.925	26.268			2.661E-03		
78.054	26.274	0.006629		2.662E-03	9.02E-07	
79.187	26.283	0.007172	-0.00141	2.663E-03	9.76E-07	-1.9E-07
81.539	26.299	0.00171	-0.0023	2.665E-03	2.33E-07	-3.1E-07
83.865	26.291	-0.0036	-0.00094	2.664E-03	-4.9E-07	-1.3E-07
86.259	26.282	-0.00272	0.00058	2.663E-03	-3.7E-07	7.89E-08
88.651	26.278	-0.00083	0.000562	2.662E-03	-1.1E-07	7.65E-08
91.089	26.278	0	0.000254	2.662E-03	0	3.45E-08
93.526	26.278	0.000408	0.000249	2.662E-03	5.55E-08	3.39E-08
95.987	26.280	0.001219	0.000244	2.663E-03	1.66E-07	3.32E-08
98.447	26.284	0.00161	7.21E-05	2.663E-03	2.19E-07	9.82E-09
100.957	26.288	0.001578	3.25E-05	2.664E-03	2.15E-07	4.44E-09
103.517	26.292	0.001775	3.34E-05	2.664E-03	2.41E-07	4.56E-09
106.028	26.297	0.001747	2.47E-05	2.665E-03	2.38E-07	3.37E-09
108.669	26.301	0.001902	0.000101	2.665E-03	2.59E-07	1.38E-08

ตาราง จ.6 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
111.286	26.307	0.00228	0.000107	2.666E-03	3.1E-07	1.46E-08
113.933	26.313	0.002467	6.58E-05	2.667E-03	3.36E-07	8.99E-09
116.556	26.320	0.002626	1.69E-05	2.668E-03	3.58E-07	2.34E-09
119.263	26.327	0.002557	0.000242	2.669E-03	3.48E-07	3.3E-08
122.031	26.334	0.00395	0.000763	2.670E-03	5.38E-07	1.04E-07
124.832	26.349	0.006807	0.001999	2.672E-03	9.28E-07	2.73E-07
127.613	26.372	0.015111	0.003731	2.675E-03	2.06E-06	5.1E-07
130.458	26.434	0.027794	0.017204	2.684E-03	3.8E-06	2.36E-06
131.031	26.467	0.073913	0.05313	2.688E-03	1.01E-05	7.3E-06
131.635	26.521	0.090332	0.026079	2.695E-03	1.24E-05	3.62E-06
132.182	26.571	0.103938	0.038497	2.702E-03	1.43E-05	5.35E-06
132.789	26.641	0.134777	0.034338	2.712E-03	1.86E-05	4.8E-06
133.340	26.727	0.143684	0.05957	2.724E-03	1.98E-05	8.35E-06
133.659	26.766	0.186601	0.162456	2.729E-03	2.58E-05	2.27E-05
133.892	26.830	0.233356	0.153558	2.738E-03	3.24E-05	2.16E-05
134.212	26.895	0.271488	0.236932	2.747E-03	3.78E-05	3.34E-05
134.533	27.004	0.385209	0.333437	2.762E-03	5.38E-05	4.73E-05
134.825	27.131	0.47577	0.332291	2.780E-03	6.68E-05	4.79E-05
135.117	27.282	0.579372	0.414892	2.801E-03	8.18E-05	6.05E-05
135.410	27.470	0.718529	0.135002	2.828E-03	0.000102	2.12E-05
135.703	27.703	0.658472	-0.54016	2.861E-03	9.42E-05	-7.5E-05
135.967	27.837	0.417473	0.181659	2.880E-03	6.01E-05	2.91E-05
136.261	27.936	0.75986	3.901685	2.895E-03	0.00011	0.000586
136.555	28.284	2.712703	6.309421	2.945E-03	0.000405	0.000992
136.821	29.454	4.290545	1.594932	3.121E-03	0.000666	0.000323

ตาราง จ.6 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
137.145	30.815	3.653556	-1.35535	3.338E-03	0.000595	-0.0001
137.441	31.720	3.44993	1.190292	3.491E-03	0.000603	0.000363
137.766	32.958	4.392932	4.615047	3.713E-03	0.000821	0.001226
138.004	34.192	6.046919	-0.31114	3.953E-03	0.001293	0.00028
138.330	36.366	4.217576	-6.00535	4.441E-03	0.000979	-0.00109
138.657	36.948	2.122687	-2.52318	4.593E-03	0.000582	-0.00027
138.955	37.692	2.641397	0.131658	4.805E-03	0.000808	0.000325
139.223	38.443	2.197204	-2.13499	5.050E-03	0.000766	-0.00045
139.551	39.003	1.367516	-2.07062	5.262E-03	0.00054	-0.00056
139.820	39.260	0.960147	-1.38457	5.373E-03	0.000434	-0.00044
140.090	39.520	0.621982	-1.30918	5.496E-03	0.000301	-0.00057
140.390	39.614	0.215028	-0.92856	5.544E-03	0.000111	-0.00044
140.690	39.649	0.064915	-0.3421	5.563E-03	3.45E-05	-0.00018
140.990	39.653	0.009497	-0.09797	5.565E-03	5.09E-06	-5.2E-05
141.322	39.655	0.003017	-0.01195	5.566E-03	1.62E-06	-6.4E-06
141.653	39.655	0.001578	0.005681	5.566E-03	8.48E-07	3.06E-06
141.955	39.656	0.006617	0.004779	5.566E-03	3.56E-06	2.58E-06
142.258	39.659	0.004467	-0.0015	5.568E-03	2.41E-06	-8E-07
143.746	39.664	0.003935	0.000137	5.571E-03	2.13E-06	7.9E-08
145.307	39.671	0.004883	0.000525	5.574E-03	2.65E-06	2.91E-07
146.818	39.679	0.005547	0.000167	5.579E-03	3.02E-06	9.93E-08
148.371	39.688	0.005396	5.66E-05	5.584E-03	2.95E-06	4.07E-08
149.969	39.696	0.005726	-9.5E-05	5.588E-03	3.15E-06	-4.2E-08
151.515	39.706	0.005096	-0.00019	5.594E-03	2.82E-06	-9.6E-08
154.678	39.720	0.004836	6.22E-05	5.601E-03	2.7E-06	4.29E-08

ตาราง จ.6 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
157.925	39.737	0.005495	-2.8E-05	5.611E-03	3.1E-06	-8.4E-09
161.229	39.756	0.00465	-0.00032	5.622E-03	2.64E-06	-1.7E-07
164.592	39.768	0.003388	0.000346	5.629E-03	1.94E-06	2.33E-07
168.018	39.779	0.007001	0.000213	5.635E-03	4.23E-06	1.5E-07
186.303	39.920	0.00802	1.72E-05	5.720E-03	5.21E-06	4.02E-08
206.794	40.090	0.007669	-1.6E-05	5.837E-03	5.79E-06	5.41E-08
230.898	40.262	0.007287	-5.4E-06	5.978E-03	7.62E-06	8.18E-08
261.277	40.487	0.007373		6.252E-03	1.02E-05	
268.195	40.537			6.360E-03		

ตาราง จ.7 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag_2O)_{0.1}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.030	51.049			3.553E-03		
79.234	51.056	0.004877		3.554E-03	8.57E-07	
81.516	51.066	0.004558	-0.00023	3.556E-03	8.02E-07	-4E-08
83.841	51.077	0.003814	-0.00048	3.558E-03	6.72E-07	-8.4E-08
86.235	51.084	0.00231	-0.00045	3.559E-03	4.08E-07	-7.9E-08
88.603	51.088	0.001673	-0.00018	3.560E-03	2.95E-07	-3.2E-08
91.016	51.092	0.001429	-9.3E-05	3.560E-03	2.52E-07	-1.6E-08
93.502	51.095	0.001219	3.84E-05	3.561E-03	2.15E-07	6.85E-09
95.938	51.098	0.001618	0.000118	3.561E-03	2.86E-07	2.09E-08
98.447	51.103	0.001802	-0.00028	3.562E-03	3.19E-07	-5E-08

ตาราง จ.7 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
100.931	51.107	0.000199	-4.6E-05	3.563E-03	3.53E-08	-8.1E-09
103.466	51.104	0.00157	0.000837	3.563E-03	2.78E-07	1.48E-07
106.028	51.115	0.004466	0.000734	3.564E-03	7.92E-07	1.31E-07
108.617	51.127	0.005352	0.000333	3.567E-03	9.51E-07	5.99E-08
111.260	51.143	0.006207	0.000272	3.569E-03	1.11E-06	4.94E-08
113.933	51.160	0.006797	-5E-05	3.572E-03	1.21E-06	-7.9E-09
116.556	51.179	0.005942	6.72E-05	3.576E-03	1.06E-06	1.34E-08
119.318	51.192	0.007159	0.000805	3.578E-03	1.29E-06	1.46E-07
122.003	51.218	0.010326	0.002497	3.583E-03	1.86E-06	4.52E-07
122.611	51.226	0.015381	0.020804	3.584E-03	2.77E-06	3.77E-06
123.109	51.235	0.033319	0.059928	3.586E-03	6.03E-06	1.09E-05
123.691	51.262	0.080131	0.081215	3.591E-03	1.46E-05	1.5E-05
124.219	51.324	0.123523	0.06762	3.602E-03	2.27E-05	1.29E-05
124.832	51.403	0.157317	0.180175	3.617E-03	2.93E-05	3.55E-05
125.363	51.504	0.329676	0.315457	3.636E-03	6.32E-05	6.49E-05
125.952	51.772	0.510401	0.252845	3.687E-03	0.000102	5.99E-05
126.513	52.091	0.620467	0.054304	3.753E-03	0.000132	2.63E-05
127.020	52.435	0.568428	-0.15477	3.829E-03	0.00013	-1.9E-05
127.613	52.716	0.450291	-0.04068	3.896E-03	0.000111	1.29E-05
128.151	52.944	0.522449	0.038099	3.955E-03	0.000145	3.27E-05
128.775	53.323	0.494555	-0.15506	4.064E-03	0.000149	-2.3E-05
129.315	53.520	0.341855	-0.22722	4.128E-03	0.000118	-5E-05
129.857	53.693	0.248629	-0.17696	4.192E-03	9.48E-05	-5.3E-05
130.458	53.804	0.139725	-0.16954	4.237E-03	5.78E-05	-6.2E-05
131.002	53.853	0.054489	-0.11521	4.258E-03	2.38E-05	-4.7E-05

ตาราง จ.7 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
131.577	53.865	0.010754	-0.04292	4.263E-03	4.8E-06	-1.9E-05
132.211	53.866	0.002599	-0.00707	4.264E-03	1.17E-06	-3.1E-06
132.731	53.868	0.002592	-0.00083	4.265E-03	1.17E-06	-3.7E-07
133.369	53.869	0.001641	-0.00064	4.265E-03	7.39E-07	-2.9E-07
133.950	53.870	0.001809	-0.00071	4.266E-03	8.16E-07	-3.2E-07
134.474	53.871	0.000857	0.000888	4.266E-03	3.86E-07	4.04E-07
135.117	53.871	0.002845	0.001175	4.266E-03	1.29E-06	5.35E-07
136.232	53.876	0.002923	7.49E-05	4.268E-03	1.33E-06	3.82E-08
139.223	53.883	0.003153	9.37E-05	4.271E-03	1.44E-06	4.7E-08
142.258	53.895	0.003487	2.24E-05	4.277E-03	1.61E-06	1.54E-08
145.246	53.904	0.003288	-2.5E-05	4.281E-03	1.54E-06	-6E-09
148.340	53.915	0.003333	-7.6E-05	4.286E-03	1.57E-06	-3.1E-08
151.547	53.925	0.002812	-0.00011	4.291E-03	1.34E-06	-4.6E-08
154.742	53.933	0.002652	-0.00019	4.295E-03	1.28E-06	-8.9E-08
157.958	53.942	0.001582	-4.3E-05	4.299E-03	7.72E-07	-1.7E-08
168.018	53.954	0.002082	8.08E-05	4.305E-03	1.05E-06	4.77E-08
186.303	54.001	0.003873	6.09E-05	4.329E-03	2.12E-06	4.42E-08
206.750	54.104	0.00444	-6E-05	4.387E-03	2.76E-06	-3E-08
230.898	54.199	0.001194		4.452E-03	7.82E-07	
257.843	54.165			4.427E-03		

ตาราง จ.8 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.077	44.706			4.616E-03		
79.187	44.707	0.000586		4.617E-03	2.39E-07	
81.493	44.708	0.001064	0.000191	4.617E-03	4.34E-07	7.81E-08
83.889	44.712	0.001483	4.3E-05	4.619E-03	6.06E-07	1.79E-08
86.211	44.715	0.001266	-9.5E-05	4.620E-03	5.18E-07	-3.8E-08
88.627	44.718	0.001035	-4.8E-06	4.621E-03	4.24E-07	-1.6E-09
91.041	44.720	0.001243	0.000123	4.622E-03	5.1E-07	5.06E-08
93.453	44.724	0.001627	0.00191	4.624E-03	6.69E-07	7.91E-07
94.729	44.726	0.008287	0.003308	4.624E-03	3.43E-06	1.37E-06
95.987	44.745	0.010011	-0.00136	4.632E-03	4.15E-06	-5.6E-07
97.227	44.751	0.004878	-0.00228	4.635E-03	2.04E-06	-9.4E-07
98.447	44.757	0.004405	-0.00083	4.637E-03	1.84E-06	-3.4E-07
99.724	44.762	0.002818	-0.00129	4.639E-03	1.18E-06	-5.4E-07
100.931	44.764	0.001189	-0.0005	4.640E-03	5E-07	-2.1E-07
102.246	44.765	0.001562	0.000464	4.641E-03	6.57E-07	1.96E-07
103.492	44.768	0.002378	0.000759	4.642E-03	1E-06	3.22E-07
104.769	44.771	0.003478	0.000732	4.643E-03	1.47E-06	3.11E-07
106.079	44.777	0.004271	0.000619	4.646E-03	1.81E-06	2.66E-07
107.345	44.782	0.005072	0.001631	4.648E-03	2.15E-06	7.03E-07
108.643	44.790	0.008452	0.002465	4.651E-03	3.61E-06	1.06E-06
109.948	44.804	0.011488	0.007199	4.657E-03	4.92E-06	3.13E-06
110.210	44.808	0.019731	0.022763	4.659E-03	8.52E-06	9.99E-06
110.708	44.819	0.028792	0.008563	4.664E-03	1.25E-05	3.86E-06
111.286	44.839	0.028951	-0.00582	4.672E-03	1.27E-05	-2.4E-06

ตาราง จ.8 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
111.813	44.851	0.022358	-0.00269	4.678E-03	9.88E-06	-9.7E-07
112.315	44.862	0.026188	0.005993	4.683E-03	1.17E-05	2.86E-06
112.844	44.878	0.028537	0.006331	4.690E-03	1.28E-05	3.1E-06
113.401	44.893	0.033065	0.000335	4.697E-03	1.5E-05	3.88E-07
113.933	44.914	0.028902	-0.00904	4.706E-03	1.32E-05	-3.9E-06
114.439	44.923	0.023678	-0.00453	4.710E-03	1.1E-05	-1.9E-06
114.947	44.938	0.024313	-0.00086	4.717E-03	1.14E-05	-2.3E-07
115.509	44.949	0.022757	0.000746	4.722E-03	1.07E-05	5.47E-07
116.045	44.963	0.025132	0.000984	4.729E-03	1.2E-05	6.51E-07
116.583	44.976	0.023813	-0.00188	4.735E-03	1.14E-05	-6.9E-07
117.095	44.988	0.023163	-0.00201	4.741E-03	1.12E-05	-7.9E-07
117.662	45.001	0.021645	-0.00426	4.747E-03	1.06E-05	-1.9E-06
118.204	45.012	0.018444	-0.00299	4.753E-03	9.09E-06	-1.3E-06
118.747	45.021	0.0184	-0.00049	4.757E-03	9.15E-06	-1.2E-07
119.291	45.032	0.017908	-0.00582	4.763E-03	8.96E-06	-2.8E-06
119.863	45.041	0.011903	-0.00267	4.767E-03	5.99E-06	-1.2E-06
120.383	45.045	0.014989	0.00461	4.769E-03	7.61E-06	2.42E-06
120.931	45.057	0.016825	8.14E-05	4.775E-03	8.58E-06	1.39E-07
121.453	45.063	0.015076	-0.00607	4.778E-03	7.76E-06	-3E-06
122.058	45.074	0.009977	-0.00936	4.784E-03	5.15E-06	-4.8E-06
122.555	45.074	0.004761	-0.00262	4.784E-03	2.47E-06	-1.3E-06
123.109	45.079	0.007221	0.000578	4.787E-03	3.76E-06	3.12E-07
123.663	45.082	0.005402	-0.00335	4.788E-03	2.82E-06	-1.7E-06
124.219	45.085	0.003505	-2.3E-05	4.790E-03	1.83E-06	4.62E-10
124.805	45.086	0.005375	0.000765	4.790E-03	2.82E-06	4.08E-07

ตาราง จ.8 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
125.335	45.091	0.004358	-0.00313	4.793E-03	2.29E-06	-1.6E-06
125.952	45.091	0.001783	-0.00138	4.793E-03	9.39E-07	-7.2E-07
126.457	45.093	0.002808	0.000703	4.794E-03	1.48E-06	3.73E-07
127.020	45.094	0.002534	0.00057	4.795E-03	1.34E-06	3.07E-07
127.641	45.096	0.003482	0.000524	4.796E-03	1.84E-06	2.82E-07
129.031	45.101	0.003587	3.86E-06	4.798E-03	1.9E-06	7.04E-09
130.429	45.106	0.003493	8.03E-05	4.801E-03	1.86E-06	4.93E-08
131.894	45.111	0.003817	0.000238	4.804E-03	2.04E-06	1.34E-07
133.311	45.117	0.004178	-0.00014	4.807E-03	2.25E-06	-6.7E-08
134.766	45.123	0.003424	-0.00012	4.810E-03	1.85E-06	-5.3E-08
136.232	45.127	0.00384	0.000126	4.812E-03	2.09E-06	7.61E-08
139.193	45.140	0.003983	-6.6E-06	4.819E-03	2.19E-06	2.99E-09
142.258	45.151	0.0038	-4E-05	4.825E-03	2.11E-06	-1.4E-08
145.246	45.163	0.003743	7.69E-06	4.832E-03	2.1E-06	1.25E-08
148.403	45.174	0.003847	-0.00013	4.838E-03	2.19E-06	-6E-08
151.484	45.187	0.002946	-1.4E-05	4.846E-03	1.73E-06	8.73E-10
168.087	45.232	0.003565	6.74E-05	4.872E-03	2.21E-06	5.69E-08
186.264	45.311	0.00529	-2.8E-05	4.923E-03	3.71E-06	-1E-08
206.838	45.437	0.002487	-6.5E-05	5.016E-03	1.82E-06	-3E-08
230.898	45.422	0.002388		5.004E-03	2.35E-06	
257.500	45.558			5.135E-03		

ตาราง จ.9 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
76.787	23.731			1.246E-03		
79.071	23.732	0.000214		1.246E-03	1.33E-08	
81.469	23.732	0.002691	0.001374	1.246E-03	1.68E-07	8.58E-08
84.645	23.747	0.007871	0.00061	1.247E-03	4.92E-07	3.81E-08
90.363	23.802	0.008112	-0.00032	1.250E-03	5.07E-07	-2E-08
95.123	23.832	0.004468	-0.00049	1.252E-03	2.79E-07	-3.1E-08
100.881	23.849	0.002955	0.000267	1.253E-03	1.85E-07	1.67E-08
105.951	23.864	0.00736	0.001277	1.254E-03	4.61E-07	8E-08
111.207	23.925	0.01614	0.001656	1.258E-03	1.01E-06	1.04E-07
116.421	24.033	0.024704	0.00337	1.265E-03	1.55E-06	2.12E-07
119.182	24.122	0.043015	0.014728	1.271E-03	2.7E-06	9.3E-07
120.629	24.214	0.086675	0.076582	1.276E-03	5.46E-06	4.86E-06
121.893	24.357	0.250651	0.185926	1.285E-03	1.59E-05	1.19E-05
123.330	24.891	0.588854	0.843356	1.319E-03	3.76E-05	5.45E-05
123.635	25.383	1.720086	3.696817	1.351E-03	0.000111	0.000244
123.885	25.846	2.641345	2.097646	1.381E-03	0.000173	0.000144
124.219	26.925	2.944678	0.638496	1.452E-03	0.000195	5.27E-05
124.470	27.567	3.01451	0.067232	1.495E-03	0.000204	2.03E-05
124.693	28.353	2.976526	-0.66323	1.548E-03	0.000205	-3.2E-05
125.028	29.228	2.644405	0.001168	1.609E-03	0.000186	1.23E-05
125.391	30.200	2.977342	1.890333	1.678E-03	0.000213	0.000156
125.615	30.977	3.754856	2.188817	1.734E-03	0.000277	0.000188
125.952	32.304	4.203826	1.268475	1.833E-03	0.000318	0.000132
126.204	33.453	4.501972	2.11638	1.922E-03	0.000355	0.000222

ตาราง จ.9 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
126.513	34.833	5.392711	8.171452	2.032E-03	0.000443	0.000813
126.739	36.334	8.867485	9.485536	2.159E-03	0.000789	0.001035
127.020	39.327	10.19994	7.207374	2.432E-03	0.000968	0.001405
127.189	40.933	12.11718	0.769982	2.595E-03	0.001422	0.001151
127.528	45.482	10.59105	-9.01823	3.155E-03	0.001552	-0.00036
127.896	48.414	5.747147	-13.1465	3.691E-03	0.001167	-0.00146
128.179	49.222	2.035883	-9.35384	3.914E-03	0.000603	-0.00168
128.434	49.510	0.711587	-2.92637	4.016E-03	0.000263	-0.00081
128.775	49.646	0.292202	-1.13192	4.071E-03	0.000121	-0.00041
129.002	49.676	0.068543	-0.49152	4.084E-03	3.01E-05	-0.0002
129.344	49.685	0.012534	-0.08117	4.088E-03	5.58E-06	-3.6E-05
129.800	49.686	0.003786	-0.00856	4.089E-03	1.69E-06	-3.8E-06
130.400	49.689	0.003487	-0.00035	4.090E-03	1.56E-06	-1.5E-07
131.807	49.693	0.003092	-2.5E-05	4.092E-03	1.39E-06	-5.7E-09
133.311	49.698	0.003413	6.61E-05	4.094E-03	1.55E-06	3.48E-08
136.202	49.708	0.003383	-1E-05	4.099E-03	1.55E-06	1.26E-09
139.223	49.718	0.003351	2.81E-06	4.103E-03	1.56E-06	7.05E-09
145.153	49.738	0.003408	-0.00012	4.113E-03	1.61E-06	-5.1E-08
151.547	49.760	0.00193	-5.1E-05	4.123E-03	9.33E-07	-2E-08
167.949	49.782	0.002257	-1.2E-05	4.134E-03	1.14E-06	-4.3E-09
186.111	49.838	0.001522	-9.7E-06	4.163E-03	7.83E-07	-1.9E-09
206.706	49.841	0.001882	4.99E-05	4.164E-03	1.07E-06	3.59E-08
230.739	49.922	0.003748		4.210E-03	2.38E-06	
258.464	50.035			4.288E-03		

ตาราง จ.10 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
79.071	34.597			2.507E-03		
81.399	34.611	0.00699		2.509E-03	7E-07	
83.936	34.631	0.007858	-2E-05	2.511E-03	7.88E-07	-1.9E-09
86.235	34.649	0.006892	-0.00049	2.513E-03	6.91E-07	-4.9E-08
88.579	34.663	0.005579	-0.00024	2.514E-03	5.6E-07	-2.4E-08
90.895	34.675	0.005783	-0.00027	2.515E-03	5.81E-07	-2.7E-08
92.037	34.683	0.00464	0.000511	2.516E-03	4.66E-07	5.15E-08
98.222	34.709	0.009525	0.002085	2.519E-03	9.58E-07	2.1E-07
100.856	34.767	0.023029	0.005336	2.524E-03	2.32E-06	5.4E-07
103.390	34.828	0.037096	0.006902	2.531E-03	3.75E-06	7E-07
105.951	34.956	0.058192	0.021337	2.544E-03	5.89E-06	2.17E-06
106.466	35.007	0.102728	0.056064	2.549E-03	1.04E-05	5.72E-06
106.982	35.062	0.116042	0.067521	2.554E-03	1.18E-05	6.92E-06
107.526	35.130	0.174298	0.121349	2.561E-03	1.78E-05	1.24E-05
107.889	35.220	0.226044	0.060284	2.570E-03	2.31E-05	6.29E-06
108.097	35.259	0.208701	0.338955	2.574E-03	2.13E-05	3.5E-05
108.382	35.323	0.393328	0.464566	2.581E-03	4.04E-05	4.8E-05
108.669	35.484	0.474452	-0.01843	2.597E-03	4.88E-05	-1.4E-06
108.903	35.570	0.383734	0.005337	2.606E-03	3.96E-05	1.31E-06
109.164	35.674	0.477095	0.989192	2.617E-03	4.94E-05	0.000104
109.373	35.794	0.848168	1.315322	2.630E-03	8.85E-05	0.00014
109.686	36.117	1.16409	1.418755	2.663E-03	0.000122	0.000155
109.921	36.433	1.626961	1.304819	2.697E-03	0.000173	0.000149
110.183	36.926	1.812906	0.935067	2.750E-03	0.000196	0.000114

ตาราง จ.10 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
110.498	37.478	2.165954	2.323226	2.810E-03	0.000239	0.000282
110.734	38.119	3.092531	1.998444	2.881E-03	0.000352	0.000262
110.997	39.021	3.163066	-1.57963	2.985E-03	0.00037	-0.00015
111.260	39.782	2.26203	-1.41554	3.076E-03	0.000272	-0.00013
111.497	40.152	2.455308	0.191782	3.121E-03	0.000306	5.61E-05
111.760	41.011	2.358026	-0.53169	3.229E-03	0.0003	-3.7E-05
112.051	41.458	2.160831	0.425132	3.287E-03	0.000286	9.82E-05
112.288	42.152	2.582512	0.035541	3.380E-03	0.000352	4.34E-05
112.553	42.755	2.178681	-0.66823	3.464E-03	0.000308	-4.5E-05
112.818	43.305	2.228872	-0.07242	3.543E-03	0.000328	3.31E-05
113.109	43.995	2.13839	0.777879	3.646E-03	0.000326	0.000183
113.375	44.496	2.66212	1.443184	3.724E-03	0.00043	0.000319
113.614	45.338	2.866455	-1.87819	3.863E-03	0.000487	-0.00025
113.906	46.020	1.663546	-3.36057	3.983E-03	0.000297	-0.00055
114.199	46.312	0.898852	-0.7762	4.037E-03	0.000167	-9.9E-05
114.413	46.475	1.270632	1.256303	4.068E-03	0.000247	0.000275
114.706	46.956	1.53559	0.831685	4.162E-03	0.000307	0.00023
114.920	47.254	1.692542	0.517779	4.224E-03	0.000364	0.000191
115.241	47.861	1.812446	-0.72543	4.357E-03	0.000409	-8.3E-05
115.455	48.224	1.304299	-1.40494	4.443E-03	0.000319	-0.00026
115.804	48.595	1.021811	-0.72929	4.536E-03	0.000265	-0.00013
116.045	48.827	0.873925	-0.49267	4.599E-03	0.00024	-7E-05
116.260	48.994	0.796877	-0.34246	4.646E-03	0.000233	-5.9E-05
116.610	49.277	0.680539	-0.34323	4.730E-03	0.000207	-6.7E-05
116.852	49.397	0.593623	-0.32298	4.768E-03	0.000193	-6.4E-05

ตาราง จ.10 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
117.122	49.581	0.51514	-0.19799	4.829E-03	0.000174	-3.3E-05
117.392	49.675	0.486777	0.011879	4.862E-03	0.000175	4E-05
117.662	49.844	0.521559	-0.22502	4.924E-03	0.000195	-5.4E-05
117.906	49.943	0.371154	-0.27884	4.962E-03	0.000148	-7.3E-05
118.204	50.045	0.37055	-0.05979	5.004E-03	0.000156	-4.5E-07
118.502	50.164	0.335494	-0.29043	5.055E-03	0.000147	-0.0001
118.719	50.218	0.22079	-0.23956	5.080E-03	0.000102	-8.7E-05
119.018	50.278	0.211803	-0.07867	5.108E-03	0.000102	-2.6E-05
119.291	50.339	0.175849	-0.11837	5.138E-03	8.77E-05	-4.6E-05
119.536	50.369	0.150548	-0.10375	5.154E-03	7.84E-05	-4.4E-05
119.809	50.417	0.122095	-0.16688	5.179E-03	6.5E-05	-8.4E-05
120.109	50.439	0.054874	-0.15095	5.191E-03	3E-05	-7.9E-05
120.410	50.450	0.031317	-0.08325	5.197E-03	1.73E-05	-4.5E-05
120.684	50.457	0.007026	-0.01691	5.201E-03	3.91E-06	-9.3E-06
121.976	50.461	0.004846	-0.00035	5.203E-03	2.73E-06	-1.6E-07
125.224	50.479	0.00546	-2.7E-05	5.213E-03	3.18E-06	-1.8E-09
136.261	50.539	0.00446	-9.7E-05	5.248E-03	2.71E-06	-5E-08
151.230	50.595	0.002935	-3.4E-05	5.284E-03	1.89E-06	-9.8E-09
167.949	50.632	0.003387	-1.4E-05	5.308E-03	2.4E-06	-2.5E-09
186.072	50.713	0.002446	-2.3E-05	5.367E-03	1.8E-06	-6E-09
206.794	50.727	0.002504		5.378E-03	2.16E-06	
225.202	50.811			5.452E-03		

ตาราง จ.11 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
79.141	41.237			3.594E-03		
81.422	41.248	0.004752		3.596E-03	8.16E-07	
83.771	41.259	0.003987	-0.00025	3.598E-03	6.85E-07	-4.3E-08
86.188	41.267	0.003553	0.000725	3.599E-03	6.11E-07	1.25E-07
88.555	41.276	0.007455	0.004175	3.601E-03	1.28E-06	7.23E-07
91.016	41.303	0.023715	0.004121	3.605E-03	4.1E-06	7.18E-07
93.404	41.391	0.027439	-0.00034	3.620E-03	4.77E-06	-5.2E-08
95.864	41.436	0.02205	0.003639	3.628E-03	3.85E-06	6.52E-07
97.077	41.472	0.040807	0.025394	3.635E-03	7.16E-06	4.49E-06
97.849	41.517	0.072456	0.064411	3.642E-03	1.28E-05	1.15E-05
98.347	41.564	0.122591	0.082311	3.651E-03	2.18E-05	1.49E-05
99.072	41.667	0.17317	0.062025	3.669E-03	3.1E-05	1.15E-05
99.623	41.785	0.201747	0.040532	3.690E-03	3.64E-05	8.02E-06
99.925	41.839	0.207725	0.012212	3.700E-03	3.78E-05	3.14E-06
100.201	41.905	0.208802	0.000717	3.712E-03	3.82E-05	1.05E-06
100.428	41.944	0.208086	0.032988	3.719E-03	3.83E-05	6.95E-06
100.730	42.015	0.22624	0.021838	3.732E-03	4.19E-05	4.96E-06
100.931	42.058	0.21909	0.110618	3.740E-03	4.08E-05	2.2E-05
101.209	42.120	0.279255	0.089899	3.752E-03	5.24E-05	1.8E-05
101.436	42.199	0.264482	-0.10821	3.767E-03	4.99E-05	-1.9E-05
101.689	42.247	0.227296	-0.00371	3.776E-03	4.33E-05	7.58E-07
101.942	42.314	0.262603	0.002178	3.789E-03	5.03E-05	1.54E-06
102.196	42.380	0.228399	-0.03095	3.801E-03	4.41E-05	-4.4E-06
102.424	42.424	0.247695	0.108667	3.810E-03	4.82E-05	2.26E-05

ตาราง จ.11 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
102.729	42.512	0.286309	-0.05792	3.827E-03	5.61E-05	-1E-05
102.983	42.584	0.215328	-0.16057	3.841E-03	4.25E-05	-3E-05
103.263	42.627	0.200556	0.127242	3.850E-03	3.99E-05	2.69E-05
103.466	42.681	0.276869	0.096954	3.861E-03	5.55E-05	2.08E-05
103.721	42.754	0.245029	-0.15159	3.875E-03	4.95E-05	-2.9E-05
103.977	42.806	0.199538	-0.05571	3.886E-03	4.06E-05	-9.9E-06
104.258	42.861	0.215153	0.100325	3.897E-03	4.41E-05	2.19E-05
104.539	42.927	0.25596	0.056275	3.911E-03	5.29E-05	1.32E-05
104.769	42.992	0.243955	-0.07715	3.924E-03	5.09E-05	-1.5E-05
105.051	43.052	0.216427	-0.08392	3.937E-03	4.55E-05	-1.6E-05
105.282	43.103	0.200914	-0.11198	3.948E-03	4.26E-05	-2.3E-05
105.539	43.150	0.161808	0.006486	3.958E-03	3.45E-05	2.67E-06
105.770	43.182	0.204081	0.156344	3.964E-03	4.39E-05	3.49E-05
106.054	43.255	0.242247	0.076885	3.980E-03	5.24E-05	1.83E-05
106.311	43.313	0.245658	0.017771	3.993E-03	5.37E-05	5.83E-06
106.595	43.388	0.251868	-0.0418	4.009E-03	5.56E-05	-7.4E-06
106.827	43.443	0.224085	-0.14682	4.021E-03	4.99E-05	-3.1E-05
107.086	43.498	0.179798	-0.12388	4.034E-03	4.04E-05	-2.7E-05
107.345	43.536	0.160009	-0.0232	4.042E-03	3.62E-05	-4.2E-06
107.630	43.585	0.167186	0.185962	4.053E-03	3.81E-05	4.4E-05
107.889	43.627	0.261228	0.166988	4.063E-03	6.02E-05	4.02E-05
108.097	43.707	0.245173	-0.16833	4.082E-03	5.69E-05	-3.7E-05
108.382	43.748	0.178154	-0.05833	4.091E-03	4.18E-05	-1.2E-05
108.591	43.795	0.216361	0.064885	4.102E-03	5.12E-05	1.71E-05
108.877	43.855	0.210242	0.048392	4.116E-03	5.02E-05	1.35E-05

ตาราง จ.11 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
109.190	43.921	0.245363	0.076005	4.132E-03	5.93E-05	2.08E-05
109.399	43.983	0.249892	-0.02145	4.147E-03	6.11E-05	-2.3E-06
109.686	44.045	0.234717	-0.02925	4.163E-03	5.81E-05	-4.8E-06
109.974	44.118	0.233071	-0.09117	4.181E-03	5.83E-05	-2.1E-05
110.210	44.167	0.186995	0.130281	4.193E-03	4.74E-05	3.69E-05
110.498	44.216	0.301349	0.324985	4.206E-03	7.77E-05	8.71E-05
110.760	44.333	0.366015	-0.02763	4.236E-03	9.54E-05	-1.8E-06
110.971	44.389	0.288291	-0.09306	4.251E-03	7.68E-05	-1.7E-05
111.260	44.477	0.319532	-0.01281	4.274E-03	8.66E-05	1.02E-06
111.550	44.574	0.280876	0.057163	4.301E-03	7.74E-05	2.33E-05
111.787	44.625	0.349652	0.323697	4.315E-03	9.89E-05	0.000101
112.024	44.740	0.434554	-0.01468	4.348E-03	0.000125	5.12E-06
112.288	44.843	0.342287	-0.31252	4.378E-03	0.000101	-8.3E-05
112.579	44.930	0.261076	-0.01123	4.404E-03	7.92E-05	5.82E-06
112.871	44.995	0.33575	0.455064	4.424E-03	0.000105	0.000156
113.083	45.099	0.490133	0.123174	4.457E-03	0.000158	5.55E-05
113.348	45.229	0.394556	-0.24289	4.499E-03	0.000131	-6.2E-05
113.640	45.319	0.3547	-0.04379	4.530E-03	0.000123	3.41E-06
113.906	45.427	0.370113	0.059902	4.568E-03	0.000133	4.28E-05
114.173	45.516	0.386583	-0.07545	4.601E-03	0.000146	-8E-06
114.439	45.633	0.329909	-0.30715	4.646E-03	0.000129	-0.0001
114.706	45.692	0.222724	-0.23251	4.670E-03	9.08E-05	-7.8E-05
114.947	45.746	0.211945	-0.07607	4.692E-03	8.94E-05	-2.3E-05
115.268	45.811	0.180014	-0.14647	4.720E-03	7.8E-05	-5.7E-05
115.535	45.852	0.125698	-0.15591	4.738E-03	5.59E-05	-6.3E-05

ตาราง จ.11 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
115.777	45.875	0.100633	-0.02609	4.748E-03	4.58E-05	-7.8E-06
116.072	45.906	0.111698	-0.05294	4.763E-03	5.17E-05	-2.2E-05
116.314	45.935	0.072196	-0.19561	4.776E-03	3.38E-05	-9E-05
116.529	45.939	0.022288	-0.09514	4.778E-03	1.06E-05	-4.4E-05
116.852	45.947	0.020973	-0.00905	4.782E-03	9.98E-06	-4.2E-06
117.149	45.952	0.016677	-0.02442	4.784E-03	7.97E-06	-1.2E-05
117.392	45.956	0.007793	-0.02906	4.786E-03	3.73E-06	-1.4E-05
117.662	45.956	0.001761	-0.00723	4.786E-03	8.45E-07	-3.5E-06
117.960	45.957	0.003684	0.000759	4.787E-03	1.77E-06	3.67E-07
119.291	45.962	0.002997	-0.00042	4.789E-03	1.44E-06	-2E-07
120.629	45.965	0.002555	3.5E-05	4.791E-03	1.23E-06	2.11E-08
122.031	45.969	0.003093	-0.00018	4.792E-03	1.5E-06	-8.6E-08
124.832	45.978	0.001791	-0.0004	4.797E-03	8.71E-07	-1.9E-07
127.613	45.979	0.000861	1.53E-05	4.797E-03	4.23E-07	9.03E-09
151.547	46.001	0.002201	5.02E-05	4.808E-03	1.11E-06	2.65E-08
168.053	46.068	0.00289	8.01E-05	4.842E-03	1.49E-06	5.07E-08
186.149	46.101	0.004973	0.000113	4.860E-03	2.87E-06	8.48E-08
206.662	46.260	0.00724	1.38E-05	4.953E-03	4.77E-06	3.34E-08
230.898	46.425	0.005591		5.073E-03	4.36E-06	
247.438	46.488			5.131E-03		

ตาราง จ.12 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็คสาร ตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.724	48.647			3.197E-03		
79.118	48.650	0.009864		3.198E-03	1.18E-06	
81.563	48.675	0.006415	-0.00138	3.201E-03	7.68E-07	-1.6E-07
83.794	48.680	0.003424	-0.00089	3.201E-03	4.1E-07	-1.1E-07
86.235	48.691	0.002265	-0.00036	3.202E-03	2.71E-07	-4.3E-08
88.651	48.691	0.001673	0.000142	3.202E-03	2.01E-07	1.71E-08
91.016	48.699	0.002945	0.000717	3.203E-03	3.53E-07	8.61E-08
93.404	48.705	0.00508	0.000731	3.204E-03	6.1E-07	8.79E-08
95.938	48.724	0.006544	0.000196	3.206E-03	7.86E-07	2.38E-08
98.447	48.738	0.006069	0.00178	3.208E-03	7.29E-07	2.15E-07
100.881	48.754	0.015341	0.006804	3.210E-03	1.85E-06	8.25E-07
103.466	48.815	0.040219	0.010897	3.217E-03	4.87E-06	1.34E-06
106.028	48.961	0.071426	0.014181	3.235E-03	8.73E-06	1.77E-06
108.591	49.181	0.112884	0.084118	3.262E-03	1.39E-05	1.06E-05
109.164	49.315	0.335215	0.24867	3.279E-03	4.2E-05	3.18E-05
109.712	49.557	0.391809	0.10523	3.309E-03	4.96E-05	1.45E-05
110.236	49.735	0.448016	0.254671	3.332E-03	5.75E-05	3.46E-05
110.498	49.909	0.591901	0.005891	3.354E-03	7.68E-05	3.19E-06
110.734	50.030	0.450952	0.056438	3.370E-03	5.91E-05	1.11E-05
110.997	50.134	0.62006	0.243533	3.384E-03	8.23E-05	3.49E-05
111.260	50.356	0.578991	-0.50058	3.413E-03	7.75E-05	-6.5E-05
111.550	50.454	0.343395	-0.30714	3.427E-03	4.65E-05	-3.9E-05
111.813	50.546	0.40905	0.62885	3.439E-03	5.59E-05	8.88E-05
112.051	50.659	0.65855	0.526479	3.455E-03	9.1E-05	7.64E-05

ตาราง จ.12 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
112.288	50.859	0.659279	-0.42451	3.482E-03	9.22E-05	-5.6E-05
112.606	51.025	0.422881	0.239908	3.506E-03	5.98E-05	4.03E-05
112.844	51.094	0.792599	0.937824	3.516E-03	0.000115	0.00014
113.109	51.424	0.894989	0.287728	3.563E-03	0.00013	5.27E-05
113.348	51.545	0.93759	0.331662	3.581E-03	0.000141	6.41E-05
113.614	51.897	1.062307	-0.25243	3.635E-03	0.000163	-2.8E-05
113.906	52.138	0.79668	-0.81738	3.672E-03	0.000125	-0.00012
114.146	52.321	0.627291	-0.2076	3.701E-03	0.000101	-2.4E-05
114.466	52.489	0.680516	0.560492	3.729E-03	0.000112	0.000104
114.679	52.684	0.926268	0.709487	3.761E-03	0.000156	0.000138
114.973	52.959	1.040518	0.130319	3.808E-03	0.000182	4.11E-05
115.268	53.296	1.002918	0.325246	3.868E-03	0.000181	9.48E-05
115.482	53.469	1.205911	0.962659	3.900E-03	0.00023	0.00023
115.777	53.910	1.493064	0.448444	3.985E-03	0.000298	0.000153
116.018	54.270	1.446493	1.184553	4.060E-03	0.000312	0.00042
116.314	54.687	2.12936	0.629711	4.153E-03	0.000523	0.000304
116.556	55.415	1.785101	-2.74541	4.341E-03	0.000476	-0.00058
116.825	55.600	0.725207	-1.52287	4.397E-03	0.000228	-0.00029
117.149	55.845	0.882142	-0.0334	4.477E-03	0.000307	8.39E-05
117.365	56.076	0.707183	-1.01617	4.562E-03	0.000274	-0.0003
117.662	56.208	0.360539	-1.05717	4.617E-03	0.000154	-0.00039
117.906	56.271	0.135405	-0.56265	4.646E-03	6.13E-05	-0.00024
118.231	56.285	0.040581	-0.21578	4.652E-03	1.9E-05	-9.7E-05
118.448	56.293	0.018422	-0.06872	4.656E-03	8.67E-06	-3.2E-05
118.719	56.294	0.00701	-0.01764	4.656E-03	3.32E-06	-8.3E-06

ตาราง จ.12 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
119.018	56.297	0.008354	-0.00444	4.658E-03	3.96E-06	-2.1E-06
119.318	56.299	0.004355	-0.00143	4.659E-03	2.08E-06	-6.7E-07
122.003	56.310	0.004093	2.3E-05	4.664E-03	1.97E-06	1.86E-08
124.693	56.321	0.004479	-0.00037	4.669E-03	2.18E-06	-1.8E-07
127.585	56.335	0.002004	-0.00015	4.676E-03	9.84E-07	-6.5E-08
136.173	56.344	0.0028	6.82E-05	4.681E-03	1.43E-06	3.97E-08
151.515	56.402	0.003635	0.000211	4.710E-03	1.93E-06	1.74E-07
168.087	56.460	0.009536		4.742E-03	6.99E-06	
186.226	56.733			4.953E-03		

ตาราง จ.13 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag_2O)_{0.1}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
79.210	10.079			6.734E-04		
80.256	10.081	0.001328		6.736E-04	9.45E-08	
81.469	10.082	0.000815	-4.1E-05	6.737E-04	5.8E-08	-2.9E-09
82.711	10.083	0.001228	2.06E-05	6.737E-04	8.74E-08	1.47E-09
83.912	10.085	0.000865	-0.00016	6.739E-04	6.16E-08	-1.1E-08
85.024	10.085	0.000861	0.000165	6.739E-04	6.13E-08	1.17E-08
86.235	10.087	0.001248	0.000164	6.740E-04	8.88E-08	1.16E-08
87.428	10.088	0.001254	0.000174	6.741E-04	8.93E-08	1.24E-08
88.627	10.090	0.001665	-9.9E-06	6.742E-04	1.19E-07	-7.1E-10
89.831	10.092	0.00123	-0.00018	6.744E-04	8.76E-08	-1.2E-08

ตาราง จ.13 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
91.065	10.093	0.001237	0.000339	6.744E-04	8.81E-08	2.41E-08
92.256	10.095	0.002052	0.000156	6.746E-04	1.46E-07	1.11E-08
93.502	10.098	0.001617	0.000147	6.748E-04	1.15E-07	1.04E-08
94.729	10.099	0.002414	0.000477	6.749E-04	1.72E-07	3.4E-08
95.987	10.104	0.002803	0.000513	6.752E-04	2E-07	3.66E-08
97.227	10.106	0.003696	0.001198	6.754E-04	2.63E-07	8.53E-08
98.422	10.113	0.005721	0.001044	6.759E-04	4.07E-07	7.44E-08
99.674	10.120	0.006251	0.001139	6.764E-04	4.45E-07	8.11E-08
100.982	10.129	0.008636	0.002238	6.770E-04	6.15E-07	1.59E-07
102.221	10.142	0.011952	0.003438	6.779E-04	8.51E-07	2.45E-07
103.492	10.159	0.017266	0.005987	6.791E-04	1.23E-06	4.27E-07
104.769	10.186	0.027209	0.009261	6.811E-04	1.94E-06	6.61E-07
106.028	10.228	0.040751	0.026443	6.841E-04	2.91E-06	1.89E-06
107.371	10.292	0.095992	0.048774	6.886E-04	6.86E-06	3.49E-06
108.643	10.479	0.168284	0.100538	7.020E-04	1.2E-05	7.22E-06
109.112	10.585	0.271039	0.22105	7.096E-04	1.94E-05	1.59E-05
109.425	10.691	0.341184	0.167394	7.172E-04	2.45E-05	1.21E-05
109.686	10.781	0.367202	0.268212	7.236E-04	2.64E-05	1.95E-05
109.948	10.883	0.481425	0.217206	7.310E-04	3.47E-05	1.58E-05
110.210	11.033	0.480897	-0.06022	7.418E-04	3.47E-05	-4.1E-06
110.472	11.135	0.449869	0.350064	7.491E-04	3.25E-05	2.56E-05
110.734	11.269	0.66454	0.359586	7.588E-04	4.81E-05	2.63E-05
110.997	11.484	0.638715	0.21009	7.744E-04	4.63E-05	1.58E-05
111.234	11.588	0.769468	0.123877	7.820E-04	5.6E-05	9.49E-06
111.523	11.889	0.703916	-0.66306	8.039E-04	5.13E-05	-4.8E-05

ตาราง จ.13 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
111.813	11.996	0.385149	-0.40723	8.117E-04	2.82E-05	-2.9E-05
112.024	12.082	0.499853	0.260505	8.180E-04	3.66E-05	1.93E-05
112.341	12.260	0.522736	-0.02791	8.311E-04	3.84E-05	-1.8E-06
112.606	12.386	0.483623	0.554844	8.403E-04	3.56E-05	4.13E-05
112.871	12.516	0.816436	0.806615	8.499E-04	6.02E-05	6E-05
113.109	12.797	0.889679	-0.27138	8.706E-04	6.58E-05	-1.9E-05
113.401	12.988	0.672463	-0.19583	8.848E-04	4.99E-05	-1.4E-05
113.667	13.172	0.780475	0.727876	8.985E-04	5.81E-05	5.51E-05
113.933	13.403	1.059494	0.634063	9.157E-04	7.92E-05	4.84E-05
114.199	13.736	1.118006	0.339109	9.406E-04	8.38E-05	2.7E-05
114.439	13.969	1.231171	0.218103	9.581E-04	9.28E-05	1.81E-05
114.706	14.360	1.228548	-0.20725	9.877E-04	9.3E-05	-1.4E-05
115.000	14.658	1.114939	0.110678	1.010E-03	8.49E-05	1.03E-05
115.268	14.986	1.29069	0.445061	1.035E-03	9.88E-05	3.59E-05
115.535	15.349	1.353213	0.686125	1.063E-03	0.000104	5.56E-05
115.777	15.675	1.640037	0.638967	1.088E-03	0.000127	5.26E-05
116.045	16.185	1.678923	-0.13856	1.128E-03	0.000131	-7.7E-06
116.341	16.622	1.561879	0.759527	1.162E-03	0.000123	6.44E-05
116.610	17.067	2.107831	1.44022	1.197E-03	0.000167	0.000119
116.879	17.757	2.337392	0.558466	1.252E-03	0.000187	5.23E-05
117.122	18.264	2.393827	1.051306	1.293E-03	0.000194	9.52E-05
117.419	19.049	2.904804	1.716993	1.357E-03	0.000238	0.000153
117.689	19.912	3.367939	1.745335	1.428E-03	0.000281	0.000163
117.960	20.871	3.849002	2.419896	1.509E-03	0.000327	0.000234
118.177	21.788	4.547394	4.366235	1.588E-03	0.000395	0.00043

ตาราง จ.13 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
118.448	23.090	5.979602	4.174959	1.702E-03	0.000536	0.00044
118.747	25.196	6.92686	4.502004	1.893E-03	0.000646	0.000539
119.046	27.231	8.67098	8.932749	2.088E-03	0.000859	0.001153
119.291	29.914	11.78729	11.80035	2.361E-03	0.001273	0.001892
119.591	33.653	15.1001	7.320163	2.781E-03	0.00189	0.001996
119.863	38.562	15.97963	-7.22211	3.443E-03	0.002416	0.000847
120.109	41.943	11.35337	-18.8133	4.034E-03	0.002329	-0.00137
120.383	44.459	6.207929	-17.1639	4.653E-03	0.001705	-0.00291
120.657	45.341	1.958442	-9.92822	4.968E-03	0.000739	-0.00257
120.958	45.586	0.494663	-3.22544	5.078E-03	0.000225	-0.0012
121.233	45.626	0.100107	-0.84114	5.097E-03	4.92E-05	-0.00038
121.508	45.641	0.032533	-0.17768	5.105E-03	1.62E-05	-8.7E-05
121.755	45.643	0.007263	-0.04209	5.106E-03	3.64E-06	-2.1E-05
122.058	45.645	0.009355	-0.00088	5.107E-03	4.7E-06	-4.2E-07
122.611	45.651	0.006509	-0.00384	5.110E-03	3.27E-06	-1.9E-06
123.441	45.654	0.004051	-0.00088	5.111E-03	2.05E-06	-4.3E-07
124.832	45.660	0.004554	9.61E-05	5.114E-03	2.31E-06	5.76E-08
127.613	45.673	0.004452	-0.00048	5.121E-03	2.29E-06	-2.4E-07
133.369	45.698	0.000469	-6.1E-05	5.134E-03	2.42E-07	-2.9E-08
168.087	45.692	0.001987	6.58E-05	5.131E-03	1.1E-06	4.03E-08
206.838	45.844	0.005302	8.45E-05	5.215E-03	3.2E-06	5.85E-08
230.898	46.025	0.007292		5.332E-03	4.77E-06	
233.580	46.039			5.342E-03		

ตาราง จ.14 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
76.902	24.829			2.257E-03		
77.339	24.825	-0.01271		2.256E-03	-1.5E-06	
77.846	24.817	-0.00867	0.010071	2.255E-03	-1E-06	1.17E-06
78.261	24.817	-0.00342	0.002494	2.255E-03	-4E-07	2.9E-07
78.724	24.814	-0.00648	0.001361	2.255E-03	-7.5E-07	1.58E-07
79.187	24.811	-0.00216	0.006988	2.255E-03	-2.5E-07	8.11E-07
79.651	24.812	0	0.001136	2.255E-03	0	1.32E-07
80.140	24.811	-0.00107	0.001153	2.255E-03	-1.2E-07	1.34E-07
80.582	24.811	0.001073	0.00334	2.255E-03	1.25E-07	3.88E-07
81.072	24.812	0.002039	0.003159	2.255E-03	2.37E-07	3.67E-07
81.563	24.813	0.004171	0.001387	2.255E-03	4.84E-07	1.61E-07
82.031	24.816	0.003369	-0.00217	2.255E-03	3.91E-07	-2.5E-07
82.453	24.816	0.002242	0.001899	2.255E-03	2.6E-07	2.21E-07
82.923	24.818	0.005063	0.004894	2.256E-03	5.88E-07	5.68E-07
83.441	24.821	0.007076	0.001472	2.256E-03	8.22E-07	1.71E-07
83.912	24.825	0.006519	-0.00396	2.256E-03	7.57E-07	-4.6E-07
84.361	24.827	0.00343	-0.0025	2.257E-03	3.98E-07	-2.9E-07
84.787	24.828	0.004331	0.004079	2.257E-03	5.03E-07	4.74E-07
85.285	24.831	0.007197	0.001094	2.257E-03	8.36E-07	1.27E-07
85.759	24.835	0.005395	-0.00445	2.258E-03	6.27E-07	-5.2E-07
86.211	24.836	0.003073	0.001632	2.258E-03	3.57E-07	1.9E-07
86.736	24.838	0.006988	0.004628	2.258E-03	8.12E-07	5.38E-07
87.213	24.843	0.007709	0.000355	2.259E-03	8.96E-07	4.14E-08
87.644	24.845	0.00731	0.01319	2.259E-03	8.49E-07	1.53E-06

ตาราง จ.14 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
88.171	24.850	0.020341	0.012101	2.259E-03	2.36E-06	1.41E-06
88.627	24.865	0.019208	-0.00765	2.261E-03	2.23E-06	-8.9E-07
89.108	24.868	0.013171	-0.00346	2.261E-03	1.53E-06	-4E-07
89.614	24.878	0.015795	0.000275	2.263E-03	1.84E-06	3.25E-08
90.121	24.884	0.01345	-0.00459	2.263E-03	1.56E-06	-5.3E-07
90.580	24.891	0.011358	-0.00454	2.264E-03	1.32E-06	-5.3E-07
91.089	24.895	0.00905	0.00131	2.265E-03	1.05E-06	1.53E-07
91.575	24.900	0.012662	0.008868	2.265E-03	1.47E-06	1.03E-06
92.037	24.907	0.017455	0.172208	2.266E-03	2.03E-06	2.01E-05
92.549	24.917	0.180383	0.17458	2.267E-03	2.11E-05	2.04E-05
93.013	25.083	0.187794	-0.16207	2.286E-03	2.19E-05	-1.9E-05
93.502	25.096	0.025897	-0.15582	2.288E-03	3.03E-06	-1.8E-05
94.017	25.109	0.031356	0.014362	2.290E-03	3.67E-06	1.69E-06
94.459	25.126	0.039638	0.012747	2.292E-03	4.64E-06	1.5E-06
94.975	25.147	0.043577	0.014926	2.294E-03	5.11E-06	1.76E-06
95.468	25.170	0.054709	0.0252	2.297E-03	6.42E-06	2.97E-06
95.962	25.201	0.06845	0.008152	2.300E-03	8.04E-06	9.69E-07
96.433	25.236	0.062568	0.001587	2.304E-03	7.35E-06	2.03E-07
96.953	25.263	0.070023	0.047974	2.308E-03	8.24E-06	5.67E-06
97.475	25.309	0.112582	0.072336	2.313E-03	1.33E-05	8.56E-06
97.948	25.375	0.141985	0.038929	2.321E-03	1.68E-05	4.66E-06
98.447	25.447	0.150418	0.022486	2.329E-03	1.78E-05	2.74E-06
98.972	25.529	0.165006	0.014595	2.339E-03	1.96E-05	1.82E-06
99.423	25.608	0.164659	0.006696	2.348E-03	1.96E-05	9E-07
99.950	25.690	0.171553	0.034146	2.358E-03	2.04E-05	4.18E-06

ตาราง จ.14 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
100.478	25.789	0.200685	0.038265	2.370E-03	2.4E-05	4.71E-06
100.931	25.887	0.209116	0.002229	2.382E-03	2.51E-05	4.12E-07
101.487	26.000	0.202934	0.042572	2.395E-03	2.44E-05	5.32E-06
101.917	26.087	0.251072	0.057677	2.406E-03	3.03E-05	7.17E-06
102.475	26.248	0.259905	-0.0059	2.425E-03	3.15E-05	-5E-07
102.983	26.364	0.244784	0.027407	2.439E-03	2.98E-05	3.62E-06
103.492	26.497	0.287784	0.087637	2.455E-03	3.52E-05	1.1E-05
103.977	26.650	0.331878	0.053464	2.474E-03	4.07E-05	6.96E-06
104.513	26.836	0.342396	0.096856	2.497E-03	4.23E-05	1.25E-05
105.051	27.018	0.435976	0.291149	2.520E-03	5.42E-05	3.72E-05
105.513	27.272	0.633561	0.258702	2.551E-03	7.95E-05	3.39E-05
106.054	27.653	0.695266	0.292857	2.599E-03	8.82E-05	3.99E-05
106.595	28.024	0.950315	0.400184	2.647E-03	0.000123	5.53E-05
107.086	28.634	1.108371	0.081084	2.726E-03	0.000145	1.55E-05
107.604	29.142	1.032104	-0.00572	2.793E-03	0.000138	5.21E-06
108.123	29.704	1.102444	0.043214	2.869E-03	0.000151	1.22E-05
108.591	30.230	1.074752	0.086548	2.942E-03	0.00015	2E-05
109.138	30.795	1.1903	0.28913	3.022E-03	0.000171	5.07E-05
109.686	31.534	1.391501	0.299341	3.129E-03	0.000206	5.77E-05
110.183	32.250	1.5033	0.492358	3.237E-03	0.000231	9.82E-05
110.760	33.149	1.920443	0.831398	3.378E-03	0.000311	0.000171
111.286	34.368	2.420225	0.876667	3.580E-03	0.00042	0.000223
111.813	35.697	2.843394	0.828821	3.820E-03	0.000546	0.000302
112.315	37.293	3.272834	0.372763	4.142E-03	0.000731	0.000341
112.871	39.158	3.237588	-0.88041	4.592E-03	0.000906	0.000108

ตาราง จ.14 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
113.401	40.810	2.31644	-2.10405	5.126E-03	0.000848	-0.00034
113.906	41.557	1.058553	-1.78489	5.471E-03	0.000556	-0.00053
114.466	41.937	0.416135	-0.91062	5.718E-03	0.000281	-0.00045
114.973	42.001	0.086955	-0.35777	5.770E-03	7.29E-05	-0.00023
115.535	42.030	0.033493	-0.07499	5.796E-03	2.96E-05	-6.2E-05
116.018	42.036	0.008592	-0.02754	5.801E-03	7.8E-06	-2.4E-05
116.583	42.039	0.004644	-0.00454	5.804E-03	4.24E-06	-4.1E-06
117.095	42.041	0.003706	-0.0018	5.806E-03	3.4E-06	-1.6E-06
117.662	42.043	0.002706	-7.4E-05	5.808E-03	2.49E-06	-4.1E-08
118.204	42.044	0.003624	0.000733	5.809E-03	3.36E-06	7.11E-07
119.318	42.049	0.003919	2.47E-05	5.813E-03	3.67E-06	8.73E-08
122.031	42.059	0.003718	6.11E-05	5.823E-03	3.69E-06	1.16E-07
136.261	42.112	0.004955	6.27E-05	5.876E-03	5.64E-06	1.63E-07
151.294	42.204	0.005554		5.988E-03	8.45E-06	
167.949	42.288			6.144E-03		

ตาราง จ.15 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 3 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag₂O)_{0.2}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
83.889	49.528			3.207E-03		
86.283	49.545	0.005727		3.209E-03	7.43E-07	
88.603	49.555	0.002746	-0.00091	3.210E-03	3.56E-07	-1.2E-07
91.016	49.558	0.001436	5.57E-05	3.211E-03	1.86E-07	7.32E-09

ตาราง จ.15 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
93.477	49.562	0.003018	0.001388	3.211E-03	3.92E-07	1.81E-07
95.987	49.573	0.008334	0.001677	3.213E-03	1.08E-06	2.19E-07
98.397	49.603	0.011269	0.000995	3.217E-03	1.47E-06	1.31E-07
100.957	49.629	0.013281	0.002282	3.220E-03	1.74E-06	3.02E-07
103.517	49.671	0.022955	0.00662	3.226E-03	3.01E-06	8.81E-07
106.054	49.746	0.047022	0.015547	3.235E-03	6.22E-06	2.1E-06
108.643	49.912	0.102639	0.048471	3.257E-03	1.38E-05	6.67E-06
109.921	50.143	0.234505	0.115238	3.289E-03	3.2E-05	1.63E-05
110.655	50.384	0.334585	0.115079	3.322E-03	4.66E-05	1.74E-05
111.234	50.582	0.385497	0.202487	3.350E-03	5.49E-05	3.19E-05
111.760	50.810	0.558346	0.43852	3.383E-03	8.18E-05	6.95E-05
112.288	51.171	0.848092	0.849078	3.436E-03	0.000128	0.000142
112.606	51.527	1.276179	1.086122	3.491E-03	0.000201	0.000198
112.871	51.914	1.480439	-0.21703	3.553E-03	0.000244	1E-06
113.083	52.233	1.17268	-1.05148	3.607E-03	0.000202	-0.00014
113.375	52.505	0.950521	1.408407	3.655E-03	0.000171	0.000331
113.640	52.763	1.957992	3.01801	3.702E-03	0.000386	0.000717
113.906	53.546	2.555098	-0.94693	3.861E-03	0.000552	-6.7E-05
114.173	54.123	1.453968	-3.71023	3.996E-03	0.000351	-0.00073
114.413	54.282	0.676975	-1.6245	4.038E-03	0.000183	-0.00032
114.653	54.448	0.674084	-0.06104	4.084E-03	0.000195	3.11E-05
114.973	54.660	0.642746	-0.31735	4.147E-03	0.0002	-5.3E-05
115.241	54.826	0.48745	-0.55546	4.202E-03	0.000164	-0.00014
115.535	54.934	0.330517	-0.45772	4.240E-03	0.000119	-0.00014
115.804	55.012	0.229867	-0.39635	4.269E-03	8.69E-05	-0.00013

ตาราง จ.15 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
116.018	55.045	0.139125	0.132597	4.282E-03	5.48E-05	7.53E-05
116.314	55.083	0.297535	0.283405	4.297E-03	0.000125	0.000132
116.583	55.213	0.299146	-0.37136	4.353E-03	0.000129	-0.00015
116.825	55.236	0.1076	-0.30743	4.363E-03	5.03E-05	-0.00012
117.122	55.271	0.133433	-0.03608	4.380E-03	6.45E-05	-1.2E-05
117.365	55.308	0.088131	-0.16113	4.398E-03	4.38E-05	-7.6E-05
117.689	55.321	0.042016	-0.06536	4.404E-03	2.15E-05	-3.1E-05
117.960	55.333	0.049241	-0.00211	4.411E-03	2.56E-05	1.93E-07
118.177	55.345	0.040986	-0.05776	4.417E-03	2.16E-05	-2.9E-05
118.448	55.353	0.021055	-0.05901	4.421E-03	1.12E-05	-3.1E-05
118.747	55.357	0.007357	-0.02059	4.423E-03	3.95E-06	-1.1E-05
119.263	55.359	0.004263	-0.00112	4.424E-03	2.31E-06	-5.9E-07
122.031	55.371	0.003665	-0.00016	4.431E-03	2E-06	-7.7E-08
124.721	55.379	0.003404	5.86E-06	4.435E-03	1.89E-06	1.44E-08
127.613	55.390	0.003697	1.87E-05	4.442E-03	2.08E-06	2.08E-08
130.400	55.400	0.00351	-0.00035	4.447E-03	2.01E-06	-1.9E-07
133.311	55.410	0.001715	-0.00037	4.453E-03	9.89E-07	-2.1E-07
136.232	55.410	0.001346	-0.00014	4.453E-03	7.9E-07	-8E-08
142.227	55.422	0.000471	-9.4E-06	4.460E-03	2.77E-07	-4.5E-09
168.087	55.425	0.001046	4.7E-05	4.462E-03	6.47E-07	3.16E-08
186.188	55.468	0.002538	6.23E-05	4.488E-03	1.67E-06	5.46E-08
206.706	55.523	0.003453	-5.1E-07	4.526E-03	2.76E-06	1.17E-08
230.792	55.622	0.002515		4.611E-03	2.19E-06	
248.057	55.627			4.617E-03		

ตาราง จ.16 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 5 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.054	49.629			4.873E-03		
79.187	49.628	0		4.872E-03	0	
80.372	49.629	0.001263	0.00036	4.873E-03	5.13E-07	1.46E-07
81.563	49.631	0.000855	-0.00054	4.874E-03	3.47E-07	-2.2E-07
82.711	49.631	0	-0.00018	4.874E-03	0	-7.4E-08
83.912	49.631	0.000428	0.000182	4.874E-03	1.74E-07	7.42E-08
85.047	49.632	0.000426	-7E-06	4.874E-03	1.73E-07	-2.8E-09
86.259	49.632	0.000412	0.000172	4.874E-03	1.67E-07	7.02E-08
87.476	49.633	0.000845	1.85E-06	4.875E-03	3.44E-07	7.88E-10
88.627	49.634	0.000416	-0.00018	4.875E-03	1.69E-07	-7.4E-08
89.879	49.634	0.00041	1.32E-07	4.875E-03	1.67E-07	9.01E-11
91.065	49.635	0.000416	0.000171	4.875E-03	1.7E-07	6.97E-08
92.281	49.635	0.000821	0.000835	4.875E-03	3.34E-07	3.41E-07
93.502	49.637	0.00245	0.001342	4.876E-03	1E-06	5.49E-07
94.729	49.641	0.004106	0.001007	4.878E-03	1.68E-06	4.15E-07
95.938	49.647	0.004903	0.000439	4.880E-03	2.01E-06	1.85E-07
97.177	49.653	0.005181	0.000121	4.883E-03	2.13E-06	5.54E-08
98.447	49.660	0.005207	-0.0016	4.886E-03	2.15E-06	-6.6E-07
99.674	49.666	0.001195	-0.00317	4.888E-03	4.94E-07	-1.3E-06
100.957	49.663	-0.00275	-0.00062	4.887E-03	-1.1E-06	-2.6E-07
102.221	49.659	-0.00039	0.002759	4.885E-03	-1.6E-07	1.14E-06
103.517	49.662	0.004316	0.002604	4.886E-03	1.79E-06	1.08E-06
104.769	49.670	0.006245	0.001377	4.890E-03	2.59E-06	5.81E-07

ตาราง จ.16 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
106.079	49.678	0.007845	0.001943	4.893E-03	3.27E-06	8.29E-07
107.319	49.690	0.0112	0.002934	4.898E-03	4.71E-06	1.27E-06
108.669	49.707	0.015442	0.003921	4.905E-03	6.56E-06	1.73E-06
109.974	49.731	0.021611	0.002985	4.915E-03	9.31E-06	1.38E-06
111.260	49.763	0.023176	0.000403	4.929E-03	1.01E-05	3.07E-07
112.606	49.792	0.022672	-0.00067	4.942E-03	1.01E-05	-1.6E-07
113.906	49.823	0.021415	-0.00185	4.956E-03	9.72E-06	-7.2E-07
115.268	49.849	0.017755	-0.00311	4.968E-03	8.2E-06	-1.3E-06
116.610	49.871	0.013	-0.00313	4.978E-03	6.09E-06	-1.4E-06
117.960	49.884	0.009325	-0.00181	4.984E-03	4.42E-06	-8.2E-07
119.291	49.896	0.008158	-0.00086	4.990E-03	3.9E-06	-3.9E-07
120.657	49.906	0.007004	-0.00071	4.995E-03	3.37E-06	-3.2E-07
122.003	49.915	0.006229	-0.00024	4.999E-03	3.02E-06	-9.8E-08
123.386	49.923	0.006362	5.54E-05	5.003E-03	3.11E-06	4.14E-08
124.832	49.933	0.006386	-0.0029	5.008E-03	3.14E-06	-1.4E-06
126.204	49.941	-0.00182	-0.00335	5.012E-03	-8.9E-07	-1.6E-06
127.585	49.928	-0.00283	0.001628	5.006E-03	-1.4E-06	7.99E-07
129.031	49.933	0.002785	0.001722	5.008E-03	1.37E-06	8.49E-07
130.458	49.936	0.002117	6.79E-06	5.010E-03	1.04E-06	6.33E-09
131.865	49.939	0.002804	0.000104	5.011E-03	1.39E-06	5.32E-08
133.311	49.944	0.002413	-0.00027	5.013E-03	1.19E-06	-1.3E-07
134.766	49.946	0.002034	5.24E-05	5.014E-03	1.01E-06	3.04E-08
136.261	49.950	0.002567	-8.6E-05	5.016E-03	1.28E-06	-4.2E-08
142.167	49.965	0.0014	-0.00011	5.024E-03	7.02E-07	-5.6E-08
148.403	49.967	0.001193	3.09E-05	5.025E-03	6.05E-07	1.67E-08

ตาราง จ.16 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
154.742	49.980	0.001789	6.07E-05	5.032E-03	9.11E-07	3.21E-08
161.263	49.990	0.001974	6.26E-05	5.037E-03	1.02E-06	3.45E-08
167.914	50.006	0.002614	0.000259	5.045E-03	1.37E-06	1.44E-07
175.036	50.026	0.005542	0.000448	5.056E-03	3E-06	2.63E-07
182.350	50.086	0.009084	0.000167	5.088E-03	5.16E-06	1.39E-07
190.118	50.163	0.008059	-0.00011	5.133E-03	5.09E-06	-1E-08
206.794	50.283	0.006491	-5E-05	5.213E-03	4.91E-06	4.02E-09
230.633	50.426	0.006016		5.332E-03	5.25E-06	
235.717	50.457			5.365E-03		

ตาราง จ.17 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag₂O)_{0.2}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.077	41.757			3.252E-03		
79.210	41.757	0.000582		3.252E-03	1.04E-07	
81.516	41.759	0.000638	0.000239	3.253E-03	1.14E-07	4.29E-08
83.912	41.760	0.001704	0.000311	3.253E-03	3.06E-07	5.59E-08
86.211	41.767	0.0021	-1.3E-05	3.254E-03	3.77E-07	-2.3E-09
88.675	41.770	0.00164	0.000292	3.255E-03	2.95E-07	5.26E-08
91.089	41.775	0.003522	0.000548	3.256E-03	6.34E-07	9.89E-08
93.502	41.787	0.004288	0.000413	3.258E-03	7.72E-07	7.5E-08
95.987	41.796	0.005544	0.00103	3.259E-03	1E-06	1.87E-07
98.372	41.814	0.009304	0.001577	3.263E-03	1.68E-06	2.87E-07

ตาราง จ.17 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
100.931	41.842	0.013339	0.009211	3.268E-03	2.42E-06	1.69E-06
102.196	41.865	0.044523	0.031752	3.272E-03	8.16E-06	5.92E-06
103.492	41.956	0.094639	0.028368	3.289E-03	1.76E-05	5.47E-06
104.795	42.111	0.118262	0.015719	3.318E-03	2.24E-05	3.4E-06
106.079	42.262	0.135313	0.023596	3.347E-03	2.64E-05	5.37E-06
107.345	42.456	0.178425	0.033231	3.385E-03	3.61E-05	7.98E-06
108.669	42.724	0.221359	0.030155	3.440E-03	4.7E-05	8.55E-06
109.974	43.038	0.257708	0.031755	3.508E-03	5.86E-05	1.13E-05
111.234	43.385	0.302809	0.017684	3.590E-03	7.6E-05	1.02E-05
112.606	43.835	0.304253	-0.02266	3.709E-03	8.53E-05	1.32E-06
113.853	44.182	0.243454	-0.05718	3.814E-03	7.95E-05	-1.1E-05
115.268	44.483	0.152059	-0.06967	3.920E-03	5.57E-05	-2.1E-05
116.556	44.593	0.055148	-0.05283	3.964E-03	2.24E-05	-1.9E-05
117.879	44.627	0.01412	-0.01879	3.979E-03	5.99E-06	-7.6E-06
119.318	44.632	0.00324	-0.00413	3.981E-03	1.4E-06	-1.7E-06
120.657	44.636	0.002634	-0.00039	3.983E-03	1.14E-06	-1.7E-07
121.976	44.639	0.002199	-3.1E-05	3.984E-03	9.54E-07	-1.1E-08
123.386	44.642	0.00255	0.000254	3.985E-03	1.11E-06	1.13E-07
124.721	44.646	0.002896	-2.9E-05	3.987E-03	1.26E-06	-1.1E-08
126.148	44.650	0.002469	-0.00017	3.989E-03	1.08E-06	-7.3E-08
127.557	44.653	0.002405	0.000239	3.990E-03	1.06E-06	1.08E-07
129.059	44.657	0.003165	0.000271	3.992E-03	1.39E-06	1.22E-07
130.400	44.662	0.003175	-0.00027	3.994E-03	1.4E-06	-1.2E-07
131.894	44.666	0.002405	8.15E-05	3.996E-03	1.07E-06	4.04E-08
133.311	44.669	0.003412	0.000348	3.997E-03	1.52E-06	1.58E-07

ตาราง จ.17 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
134.825	44.676	0.003424	-0.00031	4.000E-03	1.53E-06	-1.4E-07
136.232	44.679	0.002501	-0.00033	4.002E-03	1.13E-06	-1.4E-07
139.223	44.687	0.001991	-0.00011	4.005E-03	8.99E-07	-4.8E-08
142.258	44.691	0.001845	0.000215	4.007E-03	8.39E-07	1.01E-07
145.184	44.698	0.003271	0.000344	4.010E-03	1.5E-06	1.61E-07
148.371	44.711	0.003949	-6.4E-05	4.016E-03	1.83E-06	-2.5E-08
151.515	44.723	0.002869	-0.00033	4.022E-03	1.34E-06	-1.5E-07
154.645	44.729	0.001891	-9.1E-05	4.025E-03	8.9E-07	-4E-08
157.860	44.735	0.00229	0.000142	4.027E-03	1.09E-06	7.01E-08
161.196	44.744	0.002822	9.53E-05	4.032E-03	1.35E-06	4.89E-08
164.592	44.754	0.002932	0.000103	4.036E-03	1.42E-06	6.25E-08
168.018	44.764	0.003526	7.6E-05	4.041E-03	1.78E-06	4.99E-08
186.149	44.830	0.00457	4.43E-05	4.075E-03	2.49E-06	4.06E-08
206.750	44.941	0.005242	6.92E-06	4.138E-03	3.35E-06	2.68E-08
230.792	45.064	0.004879		4.224E-03	3.69E-06	
242.618	45.116			4.270E-03		

ตาราง จ.18 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 8 ในแผนภาพสมดุขของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag₂O)_{0.2}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.030	30.682			2.380E-03		
79.234	30.679	0.000423		2.379E-03	4.34E-08	
80.396	30.683	0.005205	0.002655	2.380E-03	5.35E-07	2.73E-07

ตาราง จ.18 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
81.539	30.691	0.006544	0.000356	2.381E-03	6.72E-07	3.66E-08
82.688	30.698	0.00602	-0.00085	2.381E-03	6.19E-07	-8.7E-08
83.865	30.705	0.00457	-0.00111	2.382E-03	4.7E-07	-1.1E-07
85.095	30.709	0.003342	-0.00083	2.382E-03	3.43E-07	-8.6E-08
86.259	30.713	0.002571	-0.00072	2.383E-03	2.64E-07	-7.4E-08
87.428	30.715	0.001672	-0.00039	2.383E-03	1.72E-07	-4E-08
88.651	30.717	0.001632	-0.00034	2.383E-03	1.68E-07	-3.5E-08
89.879	30.719	0.000828	-0.00016	2.383E-03	8.52E-08	-1.6E-08
91.065	30.719	0.001249	0.001193	2.383E-03	1.28E-07	1.23E-07
92.281	30.722	0.003693	0.001163	2.384E-03	3.8E-07	1.2E-07
93.502	30.728	0.004084	0.001811	2.384E-03	4.2E-07	1.86E-07
94.729	30.732	0.008129	0.002534	2.385E-03	8.36E-07	2.61E-07
95.962	30.748	0.010319	0.002982	2.386E-03	1.06E-06	3.07E-07
97.152	30.757	0.015354	0.003786	2.387E-03	1.58E-06	3.9E-07
98.372	30.785	0.019442	0.001019	2.390E-03	2E-06	1.06E-07
99.724	30.807	0.017974	0.000307	2.393E-03	1.85E-06	3.28E-08
100.931	30.831	0.020228	0.001893	2.395E-03	2.09E-06	1.96E-07
102.196	30.857	0.022652	0.004515	2.398E-03	2.34E-06	4.68E-07
103.492	30.889	0.031788	0.00999	2.401E-03	3.28E-06	1.04E-06
104.744	30.938	0.048108	0.017174	2.406E-03	4.98E-06	1.79E-06
106.028	31.011	0.07534	0.032772	2.414E-03	7.82E-06	3.43E-06
107.319	31.132	0.132496	0.055585	2.426E-03	1.38E-05	5.85E-06
108.617	31.354	0.219237	0.200869	2.449E-03	2.3E-05	2.14E-05
109.399	31.588	0.55029	0.363366	2.474E-03	5.84E-05	3.9E-05
110.236	32.245	0.807579	0.290001	2.544E-03	8.62E-05	3.26E-05

ตาราง จ.18 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
110.393	32.391	0.838647	0.32096	2.560E-03	9.08E-05	3.86E-05
110.760	32.685	0.975972	1.476234	2.591E-03	0.000106	0.000166
111.023	33.006	1.768883	2.514766	2.627E-03	0.000195	0.000288
111.234	33.522	2.165909	0.508975	2.684E-03	0.000243	7.18E-05
111.497	34.032	2.009986	-0.26417	2.742E-03	0.000229	-1.5E-05
111.787	34.634	2.019761	0.314077	2.811E-03	0.000234	5.52E-05
111.998	35.044	2.167354	0.72403	2.859E-03	0.000257	0.00011
112.262	35.664	2.363845	-0.66052	2.933E-03	0.000286	-6.2E-05
112.553	36.356	1.800746	-1.63343	3.018E-03	0.000223	-0.00019
112.871	36.760	1.369678	0.051613	3.069E-03	0.000173	2.41E-05
113.109	37.118	1.82946	1.726736	3.114E-03	0.000236	0.000242
113.375	37.682	2.239907	0.586598	3.187E-03	0.000295	0.000102
113.614	38.248	2.12539	-0.96516	3.263E-03	0.000288	-0.00011
113.906	38.812	1.726765	-0.2735	3.340E-03	0.000239	-8E-06
114.146	39.167	1.979832	0.907284	3.390E-03	0.000283	0.00016
114.439	39.867	2.210233	0.047585	3.491E-03	0.000324	3.84E-05
114.706	40.405	2.006486	-0.31685	3.572E-03	0.000305	-3.8E-06
114.947	40.885	2.049477	0.430457	3.646E-03	0.000322	0.000116
115.214	41.446	2.22513	-0.15346	3.736E-03	0.000364	2.16E-05
115.482	42.076	1.967336	-0.86705	3.841E-03	0.000334	-9.9E-05
115.777	42.553	1.737248	-0.4434	3.924E-03	0.000308	-2.7E-05
116.018	43.008	1.729462	-0.2256	4.006E-03	0.000319	7.79E-06
116.314	43.482	1.616064	-0.28934	4.095E-03	0.000312	-1E-05
116.610	43.964	1.558297	-0.00597	4.190E-03	0.000313	5.71E-05
116.825	44.279	1.61301	0.052114	4.255E-03	0.000341	7.96E-05

ตาราง จ.18 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
117.068	44.703	1.582173	-0.71413	4.347E-03	0.00035	-9.9E-05
117.338	45.090	1.246954	-0.7589	4.435E-03	0.000291	-0.00012
117.662	45.444	1.131201	0.083343	4.520E-03	0.000278	8.05E-05
117.933	45.763	1.296539	-0.09672	4.600E-03	0.000339	3.62E-05
118.177	46.111	1.081446	-1.15798	4.694E-03	0.000297	-0.00026
118.448	46.320	0.700118	-0.71062	4.753E-03	0.000203	-0.00016
118.719	46.491	0.695746	-0.07698	4.804E-03	0.000212	8.95E-06
119.018	46.717	0.65619	-0.17064	4.874E-03	0.000208	-1.8E-05
119.263	46.848	0.602909	-0.25459	4.917E-03	0.000202	-4.9E-05
119.536	47.029	0.524441	-0.402	4.979E-03	0.000182	-0.00011
119.809	47.134	0.38368	-0.30242	5.016E-03	0.00014	-8.3E-05
120.055	47.228	0.367589	0.089746	5.051E-03	0.000139	5.85E-05
120.383	47.345	0.435195	0.005793	5.096E-03	0.000173	2.2E-05
120.657	47.490	0.371076	-0.54571	5.156E-03	0.000153	-0.00021
120.876	47.528	0.166075	-0.46006	5.172E-03	7.14E-05	-0.00018
121.150	47.572	0.143921	0.024349	5.191E-03	6.31E-05	1.71E-05
121.453	47.611	0.180117	0.090981	5.208E-03	8.12E-05	4.83E-05
121.728	47.676	0.196453	-0.08473	5.238E-03	9.09E-05	-3.3E-05
122.058	47.730	0.128792	-0.14824	5.263E-03	6.1E-05	-6.3E-05
122.279	47.747	0.114731	-0.02337	5.271E-03	5.6E-05	-6.1E-06
122.555	47.787	0.117183	-0.07313	5.291E-03	5.8E-05	-3.4E-05
122.859	47.815	0.072294	-0.10414	5.305E-03	3.64E-05	-5E-05
123.109	47.827	0.059562	-0.02961	5.311E-03	3.05E-05	-1.4E-05
123.413	47.848	0.05589	-0.06519	5.322E-03	2.88E-05	-3.3E-05
123.663	47.858	0.023406	-0.08444	5.327E-03	1.22E-05	-4.3E-05

ตาราง จ.18 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
123.969	47.861	0.008992	-0.02849	5.329E-03	4.7E-06	-1.5E-05
124.219	47.863	0.007563	-0.00683	5.330E-03	3.96E-06	-3.6E-06
124.498	47.865	0.005382	-0.00723	5.331E-03	2.82E-06	-3.8E-06
124.777	47.866	0.003531	-0.00059	5.331E-03	1.86E-06	-3E-07
127.613	47.876	0.003556	-0.00011	5.337E-03	1.88E-06	-5.5E-08
130.400	47.886	0.002901	-0.00014	5.342E-03	1.55E-06	-6.9E-08
136.232	47.901	0.002368	1.04E-06	5.350E-03	1.29E-06	4.13E-09
151.515	47.936	0.002923	6.55E-05	5.369E-03	1.63E-06	4.26E-08
168.053	47.994	0.004451	0.000106	5.402E-03	2.64E-06	8.02E-08
186.111	48.090	0.006586	5.88E-05	5.460E-03	4.41E-06	7.17E-08
206.618	48.248	0.006721	-1.9E-05	5.572E-03	5.41E-06	1.97E-08
230.898	48.391	0.005754		5.703E-03	5.29E-06	
232.339	48.396			5.708E-03		

ตาราง จ.19 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag₂O)_{0.2}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.077	46.878			4.394E-03		
79.187	46.879	0.000889		4.394E-03	2.57E-07	
80.326	46.880	0.000876	-1.9E-05	4.394E-03	2.53E-07	-5.3E-09
81.469	46.881	0.000847	0.000154	4.395E-03	2.45E-07	4.46E-08
82.688	46.882	0.00124	0.000176	4.395E-03	3.58E-07	5.08E-08
83.889	46.884	0.001271	-0.00016	4.396E-03	3.68E-07	-4.7E-08

ตาราง จ.19 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
85.047	46.885	0.000852	-0.00036	4.396E-03	2.47E-07	-1E-07
86.235	46.886	0.00042	-0.00018	4.396E-03	1.22E-07	-5.2E-08
87.428	46.886	0.000422	1.99E-06	4.396E-03	1.22E-07	5.89E-10
88.603	46.887	0.000425	-0.00018	4.396E-03	1.23E-07	-5.2E-08
89.783	46.887	0	-1.1E-05	4.396E-03	0	-3.3E-09
91.065	46.887	0.000396	0.000329	4.396E-03	1.15E-07	9.52E-08
92.305	46.888	0.000829	0.000354	4.397E-03	2.4E-07	1.03E-07
93.477	46.889	0.00125	0.000828	4.397E-03	3.62E-07	2.4E-07
94.705	46.891	0.002817	0.001127	4.398E-03	8.17E-07	3.27E-07
95.962	46.896	0.004051	0.000829	4.399E-03	1.17E-06	2.41E-07
96.433	46.898	0.00425	0.00196	4.400E-03	1.23E-06	5.72E-07
96.904	46.900	0.005896	0.001469	4.400E-03	1.71E-06	4.29E-07
97.450	46.904	0.005745	-0.00084	4.401E-03	1.67E-06	-2.4E-07
97.948	46.906	0.005016	-0.00074	4.402E-03	1.46E-06	-2.1E-07
98.447	46.909	0.005006	0.000109	4.403E-03	1.46E-06	3.37E-08
98.947	46.911	0.005124	0.001002	4.403E-03	1.49E-06	2.94E-07
99.423	46.914	0.005983	0.000699	4.404E-03	1.74E-06	2.06E-07
99.950	46.917	0.005826	0.000941	4.405E-03	1.7E-06	2.78E-07
100.453	46.920	0.006952	0.002292	4.406E-03	2.03E-06	6.73E-07
100.957	46.924	0.008133	0.002742	4.407E-03	2.38E-06	8.08E-07
101.436	46.928	0.00965	0.003877	4.408E-03	2.83E-06	1.14E-06
101.993	46.934	0.012151	0.003528	4.410E-03	3.56E-06	1.05E-06
102.424	46.940	0.013134	0.003806	4.412E-03	3.86E-06	1.14E-06
102.983	46.947	0.015918	0.002399	4.414E-03	4.69E-06	7.23E-07
103.492	46.957	0.015696	0.000312	4.417E-03	4.63E-06	1.15E-07

ตาราง จ.19 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
104.002	46.963	0.016236	0.009891	4.419E-03	4.8E-06	2.96E-06
104.539	46.974	0.026053	0.013787	4.422E-03	7.73E-06	4.14E-06
105.000	46.989	0.029995	0.002162	4.426E-03	8.94E-06	7.09E-07
105.539	47.004	0.028215	-0.00234	4.431E-03	8.44E-06	-6.3E-07
106.028	47.018	0.027594	0.000142	4.435E-03	8.29E-06	1.19E-07
106.518	47.031	0.028354	0.002448	4.439E-03	8.56E-06	8.11E-07
107.086	47.048	0.030183	0.002546	4.444E-03	9.15E-06	8.53E-07
107.578	47.063	0.031053	0.002526	4.449E-03	9.46E-06	8.62E-07
108.149	47.081	0.032868	0.002288	4.454E-03	1.01E-05	7.96E-07
108.643	47.098	0.03349	0.000664	4.459E-03	1.03E-05	3.14E-07
109.164	47.115	0.033542	0.000896	4.465E-03	1.04E-05	3.88E-07
109.686	47.133	0.034425	0.001685	4.470E-03	1.07E-05	6.42E-07
110.210	47.151	0.035304	0.002601	4.476E-03	1.11E-05	9.45E-07
110.734	47.170	0.037152	-0.00094	4.482E-03	1.17E-05	-1.7E-07
111.286	47.191	0.034289	-0.0002	4.488E-03	1.09E-05	7.78E-08
111.813	47.207	0.03694	0.009872	4.494E-03	1.18E-05	3.32E-06
112.315	47.229	0.044445	0.004424	4.501E-03	1.43E-05	1.59E-06
112.871	47.254	0.041618	-0.00019	4.509E-03	1.35E-05	1.62E-07
113.348	47.272	0.044245	0.00062	4.515E-03	1.44E-05	4E-07
113.933	47.301	0.042277	-0.0082	4.524E-03	1.39E-05	-2.5E-06
114.413	47.317	0.035517	0.002396	4.529E-03	1.18E-05	1.03E-06
114.947	47.337	0.044705	0.013804	4.536E-03	1.49E-05	4.84E-06
115.509	47.366	0.050647	0.004391	4.546E-03	1.71E-05	1.75E-06
116.072	47.394	0.049646	0.002567	4.555E-03	1.69E-05	1.24E-06
116.556	47.418	0.053336	0.00655	4.563E-03	1.84E-05	2.64E-06

ตาราง จ.19 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
117.122	47.450	0.056524	-0.00374	4.574E-03	1.97E-05	-9.5E-07
117.635	47.479	0.049301	0.000152	4.585E-03	1.74E-05	5.32E-07
118.177	47.502	0.056684	0.015406	4.593E-03	2.02E-05	5.98E-06
118.747	47.542	0.066424	0.005966	4.607E-03	2.4E-05	2.71E-06
119.291	47.576	0.063331	-0.0008	4.620E-03	2.33E-05	4.02E-07
119.836	47.611	0.065549	0.019962	4.632E-03	2.44E-05	8.45E-06
120.328	47.644	0.084039	0.025306	4.645E-03	3.2E-05	1.08E-05
120.931	47.703	0.093252	0.00148	4.668E-03	3.63E-05	1.87E-06
121.508	47.754	0.085785	0.002671	4.688E-03	3.42E-05	3.07E-06
122.003	47.795	0.096117	0.036658	4.704E-03	3.96E-05	1.76E-05
122.611	47.860	0.126212	0.034222	4.731E-03	5.37E-05	1.8E-05
123.081	47.931	0.132993	-0.02143	4.762E-03	5.9E-05	-5.6E-06
123.663	48.000	0.103656	-0.05371	4.793E-03	4.78E-05	-2.2E-05
124.219	48.049	0.07185	-0.05708	4.817E-03	3.44E-05	-2.5E-05
124.777	48.080	0.040097	-0.04147	4.832E-03	1.97E-05	-1.9E-05
125.391	48.096	0.023235	-0.02242	4.840E-03	1.16E-05	-1.1E-05
125.896	48.106	0.015011	-0.01429	4.845E-03	7.55E-06	-7.1E-06
126.457	48.112	0.008003	-0.0095	4.848E-03	4.05E-06	-4.8E-06
127.020	48.115	0.004326	-0.00463	4.849E-03	2.19E-06	-2.3E-06
127.613	48.117	0.002654	-0.00071	4.850E-03	1.35E-06	-3.5E-07
128.151	48.118	0.003529	0.000616	4.851E-03	1.8E-06	3.18E-07
128.746	48.121	0.003352	-0.0008	4.852E-03	1.71E-06	-4.1E-07
129.344	48.122	0.002569	0.000128	4.853E-03	1.31E-06	7.02E-08
129.914	48.124	0.003501	0.000634	4.854E-03	1.79E-06	3.39E-07
130.486	48.126	0.003294	2.76E-06	4.855E-03	1.7E-06	1.15E-08

ตาราง จ.19 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
136.290	48.145	0.003519	-1.3E-05	4.865E-03	1.86E-06	-2.3E-09
151.515	48.200	0.003029	-2E-05	4.894E-03	1.65E-06	-6.5E-09
167.983	48.241	0.002886	5.27E-05	4.917E-03	1.66E-06	4.33E-08
182.350	48.289	0.004654	5.56E-05	4.945E-03	2.99E-06	5.27E-08
206.662	48.421	0.005037	-2.9E-06	5.032E-03	3.7E-06	1.84E-08
230.792	48.533	0.004511		5.124E-03	3.88E-06	
239.027	48.567			5.158E-03		

ตาราง จ.20 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 10 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag₂O)_{0.2}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.054	40.493			3.166E-03		
79.187	40.495	0.002989		3.166E-03	3.94E-07	
80.396	40.500	0.00421	0.000361	3.167E-03	5.55E-07	4.78E-08
81.563	40.505	0.003847	5.71E-05	3.167E-03	5.08E-07	7.68E-09
82.735	40.509	0.004343	2.11E-06	3.168E-03	5.73E-07	3.93E-10
83.865	40.515	0.003852	-0.00025	3.169E-03	5.09E-07	-3.3E-08
85.071	40.518	0.00376	-4.6E-05	3.169E-03	4.97E-07	-6E-09
86.259	40.524	0.003742	-0.00035	3.170E-03	4.94E-07	-4.6E-08
87.476	40.527	0.002927	0.001071	3.170E-03	3.87E-07	1.42E-07
88.651	40.531	0.006305	0.001382	3.171E-03	8.33E-07	1.83E-07
89.855	40.542	0.006213	-0.00089	3.172E-03	8.22E-07	-1.2E-07
91.065	40.546	0.004165	-0.0002	3.173E-03	5.51E-07	-2.6E-08

ตาราง จ.20 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
92.256	40.552	0.005745	0.000448	3.173E-03	7.6E-07	5.95E-08
93.502	40.560	0.005257	0.000635	3.174E-03	6.96E-07	8.44E-08
94.729	40.565	0.007316	0.002181	3.175E-03	9.69E-07	2.89E-07
95.962	40.578	0.010623	0.001662	3.177E-03	1.41E-06	2.21E-07
97.177	40.591	0.011384	0.002545	3.179E-03	1.51E-06	3.39E-07
98.422	40.606	0.016883	0.00504	3.181E-03	2.24E-06	6.72E-07
99.724	40.634	0.024221	0.010456	3.184E-03	3.22E-06	1.4E-06
100.982	40.668	0.043649	0.01754	3.189E-03	5.82E-06	2.36E-06
102.221	40.743	0.068021	0.023913	3.199E-03	9.11E-06	3.25E-06
103.466	40.837	0.103062	0.027359	3.211E-03	1.39E-05	3.76E-06
104.744	41.003	0.13704	0.033773	3.234E-03	1.86E-05	4.72E-06
105.488	41.114	0.171328	0.105676	3.249E-03	2.34E-05	1.49E-05
106.028	41.223	0.272737	0.136891	3.264E-03	3.77E-05	1.95E-05
106.595	41.416	0.322907	0.039233	3.291E-03	4.5E-05	6.22E-06
107.112	41.573	0.315261	0.048292	3.313E-03	4.44E-05	7.94E-06
107.604	41.734	0.371618	0.110834	3.336E-03	5.3E-05	1.72E-05
108.097	41.939	0.424419	0.103822	3.365E-03	6.14E-05	1.68E-05
108.669	42.186	0.482187	0.142705	3.401E-03	7.09E-05	2.36E-05
109.138	42.441	0.572988	0.172297	3.439E-03	8.59E-05	2.98E-05
109.660	42.754	0.652984	0.259014	3.486E-03	0.0001	4.59E-05
110.236	43.158	0.857394	0.292417	3.549E-03	0.000136	5.51E-05
110.734	43.675	0.967094	0.072279	3.633E-03	0.00016	2.51E-05
111.234	44.123	0.929517	0.212433	3.708E-03	0.000161	5.69E-05
111.813	44.678	1.19632	0.519315	3.807E-03	0.000221	0.000128
112.288	45.385	1.477343	0.288748	3.941E-03	0.000296	0.000113

ตาราง จ.20 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
112.818	46.162	1.48637	-0.08616	4.104E-03	0.000334	5.85E-05
113.348	46.960	1.386043	-0.3286	4.295E-03	0.000358	1.65E-05
113.880	47.634	1.137392	-0.59483	4.485E-03	0.000352	-8.4E-05
114.439	48.201	0.737033	-0.69889	4.679E-03	0.000267	-0.00017
114.973	48.440	0.373107	-0.48164	4.777E-03	0.000161	-0.00015
115.509	48.600	0.221973	-0.27362	4.851E-03	0.000106	-0.00011
115.991	48.666	0.094519	-0.17472	4.885E-03	4.84E-05	-8.1E-05
116.556	48.699	0.038965	-0.07206	4.902E-03	2.06E-05	-3.7E-05
117.095	48.709	0.015001	-0.02895	4.907E-03	8.09E-06	-1.5E-05
117.689	48.716	0.006162	-0.00979	4.911E-03	3.34E-06	-5.3E-06
118.231	48.716	0.003883	-0.0014	4.911E-03	2.12E-06	-7.5E-07
118.719	48.720	0.004718	-0.0002	4.913E-03	2.57E-06	-1E-07
119.291	48.721	0.003672	-0.00013	4.914E-03	2.01E-06	-5.8E-08
119.809	48.724	0.004578	0.000621	4.915E-03	2.51E-06	3.49E-07
120.383	48.726	0.00435	-0.00029	4.917E-03	2.39E-06	-1.5E-07
120.958	48.729	0.004247	-0.00089	4.918E-03	2.34E-06	-4.8E-07
122.031	48.733	0.002881	-0.00013	4.920E-03	1.6E-06	-6.2E-08
124.777	48.740	0.003762	0.000149	4.924E-03	2.1E-06	8.89E-08
127.613	48.754	0.003715	-0.0002	4.932E-03	2.09E-06	-1.1E-07
130.429	48.761	0.002633	-0.00032	4.936E-03	1.5E-06	-1.8E-07
133.311	48.769	0.001896	9.37E-06	4.941E-03	1.09E-06	1.49E-08
136.232	48.772	0.002687	5.78E-05	4.942E-03	1.59E-06	3.87E-08
151.547	48.818	0.00295	6.73E-05	4.970E-03	1.79E-06	5.43E-08

ตาราง จ.20 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
166.400	48.861	0.004716	9.97E-05	4.996E-03	3.22E-06	1E-07
186.111	48.981	0.006395		5.081E-03	5.26E-06	
205.960	49.114			5.204E-03		

ตาราง จ.21 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 13 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.030	9.762			7.272E-04		
79.187	9.762	0.000863		7.272E-04	6.86E-08	
80.349	9.764	0.001276	-0.00019	7.274E-04	1.02E-07	-1.5E-08
81.539	9.765	0.000419	-0.00036	7.274E-04	3.34E-08	-2.8E-08
82.735	9.765	0.000426	0.000182	7.274E-04	3.39E-08	1.45E-08
83.889	9.766	0.000847	-3.4E-06	7.275E-04	6.74E-08	-2.7E-10
85.095	9.767	0.000418	-0.00018	7.276E-04	3.32E-08	-1.4E-08
86.283	9.767	0.00042	0.000176	7.276E-04	3.34E-08	1.4E-08
87.476	9.768	0.000836	0.000172	7.277E-04	6.65E-08	1.37E-08
88.675	9.769	0.000832	2.98E-07	7.278E-04	6.62E-08	2.45E-11
89.879	9.770	0.000837	-0.00017	7.278E-04	6.66E-08	-1.4E-08
91.065	9.771	0.000416	-6.7E-06	7.279E-04	3.31E-08	-5.3E-10
92.281	9.771	0.000821	0.000332	7.279E-04	6.53E-08	2.64E-08
93.502	9.773	0.001225	0.000168	7.281E-04	9.75E-08	1.34E-08
94.729	9.774	0.001232	0.000319	7.282E-04	9.8E-08	2.54E-08
95.938	9.776	0.002002	0.000455	7.283E-04	1.59E-07	3.62E-08

ตาราง จ.21 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
97.227	9.779	0.002367	0.000168	7.286E-04	1.88E-07	1.34E-08
98.472	9.782	0.002427	-0.00063	7.288E-04	1.93E-07	-5E-08
99.699	9.785	0.000805	-0.0005	7.290E-04	6.41E-08	-4E-08
100.957	9.784	0.001178	0.001092	7.290E-04	9.37E-08	8.69E-08
102.246	9.788	0.003586	0.001426	7.293E-04	2.85E-07	1.14E-07
103.466	9.793	0.004756	0.000854	7.297E-04	3.79E-07	6.8E-08
104.769	9.800	0.005741	0.001152	7.302E-04	4.57E-07	9.18E-08
106.079	9.808	0.007766	0.00182	7.309E-04	6.18E-07	1.45E-07
107.345	9.820	0.010427	0.001897	7.318E-04	8.31E-07	1.51E-07
108.669	9.835	0.012677	0.00311	7.330E-04	1.01E-06	2.48E-07
109.948	9.853	0.018524	0.007719	7.345E-04	1.48E-06	6.16E-07
111.260	9.883	0.032678	0.01471	7.368E-04	2.61E-06	1.18E-06
112.579	9.939	0.057238	0.029806	7.413E-04	4.57E-06	2.39E-06
113.933	10.036	0.11235	0.05118	7.491E-04	8.98E-06	4.11E-06
115.214	10.235	0.192077	0.061977	7.650E-04	1.54E-05	5.02E-06
116.583	10.545	0.276589	0.052957	7.899E-04	2.23E-05	4.34E-06
117.933	10.987	0.336059	0.04082	8.256E-04	2.72E-05	3.42E-06
118.719	11.263	0.363803	0.026858	8.480E-04	2.96E-05	2.37E-06
119.291	11.481	0.372529	0.049377	8.658E-04	3.04E-05	4.25E-06
119.836	11.679	0.418942	0.15758	8.820E-04	3.44E-05	1.32E-05
120.410	11.950	0.548938	0.430185	9.043E-04	4.52E-05	3.6E-05
120.958	12.295	0.901682	0.262846	9.328E-04	7.48E-05	2.24E-05
121.453	12.890	0.822954	-0.29262	9.823E-04	6.86E-05	-2.4E-05
122.003	13.155	0.595889	0.031913	1.004E-03	5.01E-05	3.67E-06
122.555	13.547	0.85814	0.583213	1.037E-03	7.27E-05	5.04E-05

ตาราง จ.21 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
123.164	14.151	1.272794	0.917904	1.089E-03	0.000109	8.03E-05
123.386	14.604	1.620419	0.029446	1.128E-03	0.000139	5.93E-06
123.663	14.960	1.287495	-0.44691	1.158E-03	0.000111	-3.5E-05
123.941	15.319	1.372233	2.354557	1.190E-03	0.00012	0.000212
124.219	15.723	2.596695	3.237266	1.225E-03	0.000229	0.000295
124.526	16.837	3.264704	1.261424	1.324E-03	0.000292	0.000127
124.832	17.725	3.370233	2.531084	1.404E-03	0.000307	0.000261
125.056	18.624	4.606762	4.750451	1.487E-03	0.000431	0.000492
125.363	20.171	5.892526	4.425922	1.633E-03	0.000569	0.000502
125.671	22.251	7.331029	14.52375	1.837E-03	0.000739	0.001763
125.952	24.484	14.43715	28.86908	2.068E-03	0.001606	0.004358
126.176	29.540	21.90639	9.255943	2.648E-03	0.00294	0.003407
126.513	36.790	19.63672	-21.1708	3.719E-03	0.00352	-0.00089
126.767	41.135	9.405561	-31.6114	4.726E-03	0.002412	-0.00503
127.077	42.087	1.833913	-16.3048	5.077E-03	0.000687	-0.00411
127.331	42.169	0.212549	-3.2999	5.114E-03	9.5E-05	-0.00123
127.613	42.201	0.06402	-0.3313	5.128E-03	2.92E-05	-0.00015
127.924	42.207	0.015901	-0.09753	5.131E-03	7.32E-06	-4.4E-05
128.179	42.210	0.008822	-0.01621	5.132E-03	4.07E-06	-7.4E-06
128.491	42.212	0.006713	-0.00259	5.133E-03	3.1E-06	-1.2E-06
128.775	42.214	0.007278	-0.00069	5.134E-03	3.37E-06	-3.1E-07
129.315	42.218	0.006143	-0.00101	5.136E-03	2.85E-06	-4.6E-07
129.914	42.221	0.006128	0.000736	5.137E-03	2.85E-06	3.52E-07
130.458	42.225	0.006984	-0.00016	5.139E-03	3.25E-06	-6.5E-08
131.060	42.229	0.005947	-3.1E-05	5.141E-03	2.77E-06	-3.2E-09

ตาราง จ.21 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
131.635	42.232	0.006948	0.000845	5.143E-03	3.24E-06	4.07E-07
132.211	42.237	0.00692	-0.00066	5.145E-03	3.24E-06	-3E-07
133.369	42.244	0.005804	-0.00043	5.148E-03	2.73E-06	-1.9E-07
134.795	42.252	0.005819	-0.00075	5.152E-03	2.75E-06	-3.5E-07
136.290	42.261	0.003614	-0.00044	5.156E-03	1.71E-06	-2E-07
139.223	42.268	0.003874	9.05E-05	5.160E-03	1.85E-06	4.65E-08
142.227	42.284	0.004151	-0.0004	5.167E-03	1.99E-06	-1.9E-07
145.246	42.293	0.001472	-0.00047	5.171E-03	7.08E-07	-2.2E-07
148.340	42.293	0.001276	0.000565	5.171E-03	6.17E-07	2.84E-07
151.515	42.301	0.005013	0.000307	5.175E-03	2.49E-06	1.64E-07
168.087	42.392	0.007346	8.43E-05	5.221E-03	3.85E-06	5.9E-08
186.226	42.556	0.00794	-1.6E-05	5.309E-03	4.53E-06	1.56E-08
206.750	42.699	0.006746	-3.1E-05	5.396E-03	4.45E-06	2.15E-08
230.845	42.857	0.006539	-2.9E-06	5.508E-03	5.49E-06	3.38E-08
261.348	43.056	0.006586		5.696E-03	6.3E-06	
262.428	43.065			5.707E-03		

ตาราง จ.22 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
76.902	41.487			3.769E-03		
78.030	41.499	0.016025		3.771E-03	2.66E-06	
79.210	41.524	0.013107	-0.00532	3.775E-03	2.17E-06	-8.8E-07

ตาราง จ.22 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
80.396	41.530	0.003435	-0.0047	3.776E-03	5.7E-07	-7.8E-07
81.539	41.532	0.002159	-0.00075	3.776E-03	3.59E-07	-1.2E-07
82.711	41.535	0.001703	-0.00037	3.777E-03	2.83E-07	-6.2E-08
83.889	41.536	0.001284	-0.00019	3.777E-03	2.13E-07	-3.1E-08
85.047	41.538	0.001266	-1.5E-05	3.777E-03	2.1E-07	-2.6E-09
86.259	41.539	0.001248	0.000176	3.777E-03	2.07E-07	2.93E-08
87.452	41.541	0.001689	0.000183	3.778E-03	2.81E-07	3.05E-08
88.627	41.543	0.001682	-2E-05	3.778E-03	2.8E-07	-3.4E-09
89.831	41.545	0.001641	0.000139	3.778E-03	2.73E-07	2.32E-08
91.065	41.547	0.002021	0.00051	3.779E-03	3.36E-07	8.48E-08
92.305	41.550	0.002902	0.000359	3.779E-03	4.83E-07	5.98E-08
93.477	41.554	0.002887	0.000118	3.780E-03	4.8E-07	1.97E-08
94.729	41.557	0.003188	0.000461	3.780E-03	5.3E-07	7.69E-08
95.987	41.562	0.004045	0.000684	3.781E-03	6.73E-07	1.14E-07
97.202	41.567	0.004878	0.000494	3.782E-03	8.12E-07	8.25E-08
98.447	41.574	0.005259	0.000421	3.783E-03	8.76E-07	7.04E-08
99.674	41.580	0.005918	0.000403	3.784E-03	9.86E-07	6.76E-08
100.982	41.589	0.006281	0.000464	3.786E-03	1.05E-06	7.79E-08
102.221	41.596	0.007099	0.001082	3.787E-03	1.18E-06	1.81E-07
103.517	41.607	0.009025	0.000966	3.789E-03	1.51E-06	1.62E-07
104.769	41.619	0.00956	0.00089	3.791E-03	1.6E-06	1.5E-07
106.028	41.631	0.011261	0.001485	3.793E-03	1.88E-06	2.5E-07
107.345	41.648	0.013385	0.001717	3.796E-03	2.24E-06	2.9E-07
108.643	41.666	0.015751	0.003958	3.799E-03	2.64E-06	6.69E-07
109.948	41.689	0.023689	0.006758	3.802E-03	3.98E-06	1.14E-06

ตาราง จ.22 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
111.260	41.728	0.033438	0.004052	3.809E-03	5.64E-06	6.94E-07
112.579	41.777	0.034353	0.009548	3.817E-03	5.81E-06	1.64E-06
113.880	41.818	0.058452	0.022906	3.824E-03	9.94E-06	3.95E-06
115.214	41.931	0.094702	0.018094	3.843E-03	1.62E-05	3.2E-06
116.583	42.074	0.107365	0.006246	3.868E-03	1.86E-05	1.23E-06
117.906	42.220	0.111515	0.009124	3.894E-03	1.95E-05	1.8E-06
119.318	42.379	0.132319	0.018484	3.922E-03	2.35E-05	3.56E-06
120.657	42.584	0.162362	0.019357	3.958E-03	2.93E-05	3.82E-06
122.003	42.815	0.1843	0.063718	4.000E-03	3.38E-05	1.24E-05
122.583	42.939	0.285097	0.136034	4.023E-03	5.33E-05	2.68E-05
123.136	43.138	0.33842	0.079867	4.061E-03	6.41E-05	1.72E-05
123.691	43.314	0.373597	0.156141	4.094E-03	7.23E-05	3.38E-05
124.247	43.553	0.511865	0.307369	4.141E-03	0.000102	6.63E-05
124.805	43.884	0.715875	0.351753	4.208E-03	0.000146	8.06E-05
125.084	44.152	0.80619	-0.14334	4.263E-03	0.000169	-1.5E-05
125.335	44.312	0.639779	-0.21642	4.297E-03	0.000138	-3.2E-05
125.643	44.510	0.685086	0.22455	4.341E-03	0.000151	6.33E-05
125.924	44.715	0.77187	0.37907	4.386E-03	0.000175	0.000106
126.204	44.943	0.897735	0.127491	4.439E-03	0.000211	5.4E-05
126.457	45.194	0.839895	-0.37452	4.499E-03	0.000204	-6.9E-05
126.795	45.439	0.676563	-0.31397	4.559E-03	0.00017	-5.7E-05
127.048	45.594	0.654265	0.052085	4.599E-03	0.00017	3.8E-05
127.302	45.771	0.702993	0.037006	4.646E-03	0.000189	3.28E-05
127.585	45.971	0.674111	0.366324	4.701E-03	0.000188	0.000141
127.868	46.152	0.910035	0.55802	4.752E-03	0.000269	0.000214

ตาราง จ.22 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
128.151	46.486	0.989901	-0.12537	4.853E-03	0.000309	2.03E-05
128.463	46.741	0.835437	-0.54422	4.936E-03	0.000281	-0.00011
128.718	46.960	0.68113	-0.61822	5.012E-03	0.000245	-0.00017
129.031	47.128	0.484181	-0.41237	5.075E-03	0.000186	-0.00012
129.344	47.263	0.42307	-0.07898	5.128E-03	0.000171	6.43E-06
129.600	47.369	0.439193	-0.00203	5.173E-03	0.000189	3.85E-05
129.886	47.501	0.42197	-0.30487	5.231E-03	0.000192	-0.00011
130.171	47.610	0.265072	-0.53887	5.282E-03	0.000127	-0.00024
130.429	47.645	0.129229	-0.26275	5.300E-03	6.46E-05	-0.00012
130.744	47.684	0.114616	-0.10806	5.319E-03	5.85E-05	-5.2E-05
131.031	47.714	0.064174	-0.18329	5.335E-03	3.33E-05	-9.3E-05
131.290	47.719	0.014649	-0.09524	5.338E-03	7.69E-06	-4.9E-05
131.577	47.722	0.012162	-0.00627	5.339E-03	6.4E-06	-3.2E-06
131.865	47.726	0.01104	-0.01008	5.341E-03	5.82E-06	-5.3E-06
132.211	47.729	0.005772	-0.0096	5.343E-03	3.05E-06	-5.1E-06
132.731	47.731	0.002728	-0.00296	5.344E-03	1.44E-06	-1.6E-06
133.311	47.732	0.002522	0.000526	5.344E-03	1.34E-06	2.82E-07
133.921	47.734	0.003354	0.00076	5.345E-03	1.78E-06	4.07E-07
134.504	47.736	0.003428	0.000101	5.347E-03	1.82E-06	5.97E-08
135.088	47.738	0.003472	0.000255	5.348E-03	1.85E-06	1.45E-07
136.232	47.742	0.003869	3.11E-06	5.350E-03	2.07E-06	6.28E-09
139.223	47.754	0.003485	-8.8E-05	5.356E-03	1.88E-06	-4.3E-08
142.258	47.763	0.003338	-6.3E-05	5.361E-03	1.81E-06	-3E-08
145.215	47.774	0.003108	-0.00018	5.367E-03	1.7E-06	-9.4E-08
148.371	47.782	0.002245	6.81E-06	5.371E-03	1.24E-06	1.31E-08

ตาราง จ.22 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
151.452	47.788	0.00315	0.000141	5.375E-03	1.78E-06	9.03E-08
168.053	47.844	0.005027	8.75E-05	5.406E-03	3.01E-06	6.64E-08
186.264	47.963	0.006195	2.41E-05	5.480E-03	4.09E-06	4.53E-08
206.794	48.084	0.00596	-1.7E-05	5.565E-03	4.77E-06	5.41E-08
230.898	48.229	0.005451	-1.8E-05	5.693E-03	6.51E-06	6.5E-08
261.277	48.381	0.004981		5.920E-03	8.31E-06	
264.628	48.397			5.973E-03		

ตาราง จ.23 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 15 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.030	22.797			2.738E-03		
79.210	22.794	-0.00085		2.738E-03	-1.4E-07	
80.372	22.795	0.001315	0.000942	2.738E-03	2.09E-07	1.49E-07
81.493	22.797	0.001296	-0.0002	2.738E-03	2.06E-07	-3.2E-08
82.688	22.798	0.000843	-0.00037	2.738E-03	1.34E-07	-5.8E-08
83.865	22.799	0.000424	-0.00018	2.739E-03	6.73E-08	-2.8E-08
85.047	22.799	0.000422	-5.1E-06	2.739E-03	6.7E-08	-8.1E-10
86.235	22.800	0.000412	-1.6E-06	2.739E-03	6.54E-08	-2.5E-10
87.476	22.800	0.000418	3.59E-06	2.739E-03	6.64E-08	5.71E-10
88.627	22.801	0.00042	0.000514	2.739E-03	6.67E-08	8.16E-08
89.855	22.801	0.001641	0.001349	2.739E-03	2.6E-07	2.14E-07
91.065	22.805	0.003711	0.000999	2.740E-03	5.89E-07	1.59E-07

ตาราง จ.23 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
92.281	22.810	0.004063	0.000815	2.740E-03	6.45E-07	1.3E-07
93.526	22.815	0.005717	0.001728	2.741E-03	9.08E-07	2.75E-07
94.729	22.824	0.008294	0.002113	2.743E-03	1.32E-06	3.36E-07
95.938	22.835	0.010812	0.002803	2.744E-03	1.72E-06	4.46E-07
97.227	22.851	0.015295	0.003873	2.747E-03	2.43E-06	6.17E-07
98.422	22.873	0.020433	0.003907	2.750E-03	3.25E-06	6.24E-07
99.674	22.901	0.024857	0.004454	2.755E-03	3.96E-06	7.14E-07
100.957	22.936	0.03172	0.005938	2.760E-03	5.06E-06	9.54E-07
102.196	22.981	0.039833	0.007641	2.768E-03	6.37E-06	1.23E-06
103.517	23.038	0.051288	0.017953	2.777E-03	8.22E-06	2.9E-06
104.769	23.113	0.086039	0.037609	2.789E-03	1.38E-05	6.12E-06
106.028	23.254	0.145704	0.047307	2.811E-03	2.36E-05	7.77E-06
107.371	23.492	0.209093	0.09078	2.850E-03	3.41E-05	1.51E-05
108.123	23.692	0.335867	0.158544	2.883E-03	5.52E-05	2.67E-05
108.669	23.928	0.414905	0.215486	2.922E-03	6.88E-05	3.73E-05
109.164	24.124	0.560231	0.178682	2.954E-03	9.4E-05	3.18E-05
109.686	24.498	0.596702	0.032722	3.017E-03	0.000101	7.62E-06
110.210	24.748	0.59445	0.765569	3.060E-03	0.000102	0.000137
110.472	24.965	1.198133	0.991453	3.097E-03	0.000209	0.000179
110.760	25.408	1.140599	-0.84755	3.175E-03	0.000201	-0.00014
111.023	25.594	0.730737	-0.28868	3.208E-03	0.00013	-4.2E-05
111.260	25.773	0.996403	0.624509	3.240E-03	0.00018	0.00012
111.497	26.066	1.02657	-0.16979	3.293E-03	0.000187	-2.4E-05
111.813	26.341	0.902456	0.483007	3.344E-03	0.000167	0.000102
112.024	26.542	1.281332	1.826617	3.381E-03	0.000241	0.000363

ตาราง จ.23 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
112.288	26.950	1.770623	0.844041	3.458E-03	0.000339	0.000186
112.553	27.478	1.727515	-0.49508	3.560E-03	0.000339	-6.8E-05
112.844	27.910	1.495501	2.357043	3.646E-03	0.000301	0.000552
113.109	28.310	3.038821	2.711241	3.728E-03	0.000646	0.000641
113.375	29.522	2.93373	0.551147	3.989E-03	0.000642	0.000287
113.667	29.946	3.346169	4.569755	4.086E-03	0.000806	0.001444
113.880	31.212	5.241709	0.227698	4.396E-03	0.001371	0.000404
114.146	32.457	3.455246	-4.72378	4.743E-03	0.001	-0.00083
114.413	33.053	2.72482	-1.56674	4.929E-03	0.000928	-8.4E-05
114.733	34.056	2.535842	-2.58485	5.288E-03	0.00095	-0.00067
114.973	34.475	1.275339	-3.44023	5.462E-03	0.000551	-0.00117
115.268	34.738	0.696143	-1.96338	5.582E-03	0.000323	-0.00082
115.482	34.829	0.276927	-1.18089	5.626E-03	0.000135	-0.00054
115.777	34.879	0.094884	-0.44597	5.651E-03	4.72E-05	-0.00022
116.072	34.885	0.013718	-0.15315	5.654E-03	6.89E-06	-7.6E-05
116.287	34.886	0.016733	-0.00019	5.655E-03	8.42E-06	-5.4E-08
116.610	34.894	0.013614	-0.01248	5.659E-03	6.86E-06	-6.3E-06
117.095	34.897	0.006651	-0.0029	5.660E-03	3.36E-06	-1.4E-06
117.662	34.901	0.010564	0.003304	5.662E-03	5.34E-06	1.68E-06
118.231	34.909	0.010405	-0.00374	5.666E-03	5.27E-06	-1.9E-06
118.719	34.912	0.006605	-0.00332	5.668E-03	3.35E-06	-1.7E-06
119.291	34.916	0.006888	-0.00013	5.670E-03	3.51E-06	-5.9E-08
122.058	34.935	0.006166	-0.00011	5.680E-03	3.16E-06	-4.8E-08
124.805	34.950	0.006301	-0.00054	5.687E-03	3.25E-06	-2.7E-07
127.613	34.970	0.003184	-0.00065	5.698E-03	1.65E-06	-3.3E-07

ตาราง จ.23 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
130.458	34.968	0.002619	0.000563	5.697E-03	1.36E-06	2.97E-07
133.340	34.985	0.006408	0.000797	5.705E-03	3.35E-06	4.35E-07
136.232	35.005	0.00722	-2.4E-05	5.716E-03	3.88E-06	-4E-09
151.484	35.116	0.005971	-0.00012	5.776E-03	3.28E-06	-6.2E-08
168.053	35.195	0.003368	0.000117	5.820E-03	1.91E-06	9.1E-08
185.038	35.229	0.009897	0.000248	5.840E-03	6.33E-06	1.83E-07
206.750	35.578	0.012967		6.065E-03	8.98E-06	
225.912	35.759			6.207E-03		

ตาราง จ.24 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเม็ดสาร ตัวอย่างที่ 18 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag_2O)_{0.2}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
81.025	24.257			3.094E-03		
81.493	24.254	-0.02993		3.094E-03	-5.4E-06	
81.961	24.229	-0.02642	0.029412	3.089E-03	-4.8E-06	5.3E-06
82.477	24.228	-0.00099	0.02618	3.089E-03	-1.8E-07	4.72E-06
82.970	24.228	0	-0.00013	3.089E-03	0	-2.4E-08
83.417	24.228	-0.00112	-0.00121	3.089E-03	-2E-07	-2.2E-07
83.865	24.227	-0.00109	0.001214	3.089E-03	-2E-07	2.19E-07
84.337	24.227	0	0.002324	3.089E-03	0	4.18E-07
84.787	24.227	0.001056	0	3.089E-03	1.9E-07	0
85.285	24.228	0	-0.00114	3.089E-03	0	-2.1E-07
85.712	24.227	0	0.001002	3.089E-03	0	1.8E-07

ตาราง จ.24 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
86.259	24.228	0.000977	0	3.089E-03	1.76E-07	0
86.736	24.228	0	-0.00105	3.089E-03	0	-1.9E-07
87.189	24.228	0	0.004065	3.089E-03	0	7.32E-07
87.691	24.228	0.003885	0.004263	3.089E-03	6.99E-07	7.67E-07
88.219	24.232	0.004389	-0.00303	3.090E-03	7.9E-07	-5.5E-07
88.603	24.232	0.001125	-0.00382	3.090E-03	2.02E-07	-6.9E-07
89.108	24.233	0.000989	0.00084	3.090E-03	1.78E-07	1.51E-07
89.614	24.233	0.001974	0.001119	3.090E-03	3.55E-07	2.01E-07
90.121	24.235	0.002122	-0.0021	3.090E-03	3.82E-07	-3.8E-07
90.556	24.235	0	-0.00012	3.090E-03	0	-2.2E-08
91.041	24.235	0.002011	0.001971	3.090E-03	3.62E-07	3.55E-07
91.551	24.237	0.00196	-0.00096	3.091E-03	3.53E-07	-1.7E-07
92.061	24.237	0.001027	0.000146	3.091E-03	1.85E-07	2.64E-08
92.524	24.238	0.002102	0.001126	3.091E-03	3.79E-07	2.03E-07
93.013	24.239	0.002098	0.001008	3.091E-03	3.78E-07	1.82E-07
93.477	24.240	0.003063	-6.1E-05	3.091E-03	5.52E-07	-1.1E-08
93.992	24.242	0.002038	-0.00211	3.092E-03	3.67E-07	-3.8E-07
94.459	24.242	0.000992	0.002007	3.092E-03	1.79E-07	3.62E-07
95.000	24.243	0.004061	0.011334	3.092E-03	7.32E-07	2.04E-06
95.444	24.246	0.012156	0.008495	3.092E-03	2.19E-06	1.53E-06
95.987	24.255	0.012447	0.000613	3.094E-03	2.24E-06	1.12E-07
96.408	24.258	0.012747	0.007658	3.094E-03	2.3E-06	1.38E-06
96.929	24.267	0.019655	0.006289	3.096E-03	3.54E-06	1.14E-06
97.425	24.278	0.019147	0.002314	3.098E-03	3.45E-06	4.21E-07
97.973	24.287	0.022073	0.00934	3.100E-03	3.98E-06	1.69E-06

ตาราง จ.24 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
98.422	24.300	0.028455	0.014753	3.102E-03	5.14E-06	2.67E-06
98.922	24.314	0.036071	0.01589	3.105E-03	6.52E-06	2.88E-06
99.448	24.337	0.044755	0.005523	3.109E-03	8.1E-06	1.01E-06
99.950	24.360	0.041748	-0.00285	3.113E-03	7.56E-06	-5E-07
100.478	24.380	0.041823	0.01956	3.117E-03	7.58E-06	3.57E-06
100.906	24.400	0.060455	0.020324	3.120E-03	1.1E-05	3.71E-06
101.487	24.441	0.062329	-0.00738	3.128E-03	1.13E-05	-1.3E-06
101.917	24.463	0.052993	-0.00237	3.132E-03	9.65E-06	-4E-07
102.449	24.492	0.06005	0.005621	3.137E-03	1.1E-05	1.05E-06
102.983	24.527	0.058984	-0.00515	3.143E-03	1.08E-05	-9.1E-07
103.517	24.555	0.054552	-0.00072	3.148E-03	9.98E-06	-1E-07
104.028	24.584	0.058234	0.018787	3.154E-03	1.07E-05	3.48E-06
104.513	24.613	0.073263	0.038346	3.159E-03	1.34E-05	7.09E-06
105.051	24.659	0.09749	0.048545	3.167E-03	1.79E-05	9.01E-06
105.539	24.713	0.123058	0.063981	3.177E-03	2.27E-05	1.2E-05
106.002	24.776	0.158321	0.047436	3.189E-03	2.93E-05	8.99E-06
106.543	24.872	0.170698	0.064582	3.207E-03	3.17E-05	1.24E-05
107.086	24.961	0.228315	0.114874	3.223E-03	4.27E-05	2.2E-05
107.630	25.120	0.295476	0.144689	3.253E-03	5.56E-05	2.82E-05
108.149	25.275	0.382074	0.182033	3.283E-03	7.27E-05	3.62E-05
108.669	25.517	0.48462	0.106748	3.329E-03	9.32E-05	2.26E-05
109.164	25.767	0.490448	0.195689	3.377E-03	9.56E-05	4.22E-05
109.686	26.016	0.683721	0.38358	3.426E-03	0.000136	8.19E-05
110.210	26.482	0.891577	0.270748	3.520E-03	0.000181	6.44E-05
110.708	26.927	0.960368	0.159328	3.611E-03	0.000202	4.62E-05

ตาราง จ.24 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
111.286	27.516	1.063121	0.065072	3.737E-03	0.000231	2.89E-05
111.760	28.046	1.02886	-0.29566	3.854E-03	0.000232	-5.1E-05
112.262	28.520	0.774604	-0.31632	3.964E-03	0.000181	-6.2E-05
112.871	28.906	0.677662	0.090572	4.056E-03	0.000164	3.67E-05
113.295	29.220	0.868161	0.260466	4.133E-03	0.000219	8.25E-05
113.880	29.782	0.94048	0.002708	4.277E-03	0.000247	2.07E-05
114.413	30.271	0.871187	-0.01208	4.409E-03	0.000242	2.43E-05
115.000	30.758	0.926947	0.214694	4.548E-03	0.000274	0.000101
115.509	31.287	1.106508	0.097912	4.710E-03	0.000353	8.1E-05
115.991	31.855	1.024017	-0.28511	4.898E-03	0.000355	-4.1E-05
116.529	32.332	0.815556	-0.29058	5.072E-03	0.000311	-5.2E-05
117.095	32.755	0.703347	-0.29233	5.242E-03	0.000297	-7.9E-05
117.662	33.129	0.484297	-0.39254	5.408E-03	0.000222	-0.00015
118.204	33.292	0.268092	-0.2676	5.487E-03	0.000133	-0.00011
118.774	33.427	0.186844	-0.17002	5.556E-03	9.69E-05	-8.1E-05
119.263	33.490	0.087919	-0.14686	5.590E-03	4.71E-05	-7.5E-05
119.809	33.518	0.034842	-0.06342	5.605E-03	1.9E-05	-3.4E-05
120.383	33.529	0.016934	-0.01772	5.611E-03	9.3E-06	-9.6E-06
120.931	33.537	0.014955	-0.00339	5.616E-03	8.25E-06	-1.8E-06
121.453	33.545	0.013303	-0.00522	5.620E-03	7.36E-06	-2.9E-06
122.058	33.552	0.00907	-0.00714	5.624E-03	5.03E-06	-3.9E-06
122.555	33.555	0.005427	-0.00289	5.626E-03	3.02E-06	-1.6E-06
123.164	33.558	0.005876	0.000161	5.627E-03	3.27E-06	1.08E-07
123.747	33.562	0.005619	-0.00011	5.630E-03	3.15E-06	-5.4E-08
127.613	33.583	0.005387	-2.7E-05	5.641E-03	3.03E-06	-8.9E-09

ตาราง จ.24 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
130.429	33.598	0.005441	2.73E-05	5.650E-03	3.09E-06	2.43E-08
133.311	33.614	0.005543	0.000188	5.659E-03	3.17E-06	1.31E-07
136.202	33.630	0.006526	2.18E-06	5.668E-03	3.84E-06	1.11E-08
151.547	33.733	0.005583	-2E-05	5.729E-03	3.37E-06	-1.4E-09
168.087	33.808	0.005883	9.83E-05	5.776E-03	3.8E-06	8.91E-08
186.226	33.937	0.008991	7.73E-05	5.861E-03	6.46E-06	9.17E-08
206.794	34.156	0.008875	-3.8E-05	6.026E-03	7.35E-06	1.04E-08
230.845	34.333	0.007308		6.189E-03	6.93E-06	
236.215	34.371			6.230E-03		

ตาราง จ.25 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าความเหนี่ยวนำ ค่าระยะเจาะลึกยังผล อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของค่าระยะเจาะลึกยังผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของเมดสาร ตัวอย่างที่ 19 ในแผนภาพสมมูลของระบบ YBCO เจือด้วย (Ag_2O)_{0.2}

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
78.054	37.406			5.291E-03		
79.164	37.405	-0.00059		5.291E-03	-2.8E-07	
81.446	37.404	0.000213	0.000259	5.290E-03	1.02E-07	1.24E-07
83.865	37.406	0.000626	7.12E-05	5.291E-03	3E-07	3.42E-08
86.235	37.407	0.000554	0.000167	5.292E-03	2.65E-07	8.02E-08
87.476	37.408	0.00123	0.000643	5.292E-03	5.9E-07	3.09E-07
88.675	37.410	0.002123	0.001077	5.293E-03	1.02E-06	5.18E-07
89.831	37.413	0.003766	0.000295	5.295E-03	1.81E-06	1.43E-07
91.065	37.419	0.002829	-0.00036	5.298E-03	1.36E-06	-1.7E-07
92.305	37.420	0.002872	0.00072	5.298E-03	1.39E-06	3.5E-07

ตาราง จ.25 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ ($\mu\text{H/K}$)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ ($\mu\text{H/K}^2$)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
93.502	37.426	0.004584	0.000666	5.301E-03	2.21E-06	3.25E-07
94.705	37.431	0.004471	-0.00041	5.303E-03	2.17E-06	-2E-07
95.962	37.437	0.003569	-0.00016	5.306E-03	1.73E-06	-7.4E-08
97.227	37.440	0.004066	0.000687	5.308E-03	1.98E-06	3.39E-07
98.422	37.447	0.005259	0.00029	5.311E-03	2.56E-06	1.46E-07
99.699	37.453	0.004782	-0.00069	5.314E-03	2.34E-06	-3.3E-07
100.931	37.459	0.003533	-0.00048	5.317E-03	1.73E-06	-2.3E-07
102.246	37.462	0.00355	0.000483	5.319E-03	1.74E-06	2.41E-07
103.466	37.468	0.004756	0.000716	5.322E-03	2.34E-06	3.58E-07
104.769	37.474	0.005358	0.000409	5.325E-03	2.65E-06	2.08E-07
106.079	37.482	0.005825	-9.1E-05	5.328E-03	2.89E-06	-3.9E-08
107.345	37.489	0.005124	-0.00033	5.332E-03	2.55E-06	-1.6E-07
108.617	37.495	0.004994	-6E-05	5.335E-03	2.49E-06	-2.4E-08
109.948	37.502	0.004968	-0.00018	5.338E-03	2.48E-06	-8.6E-08
111.234	37.508	0.004514	-0.00048	5.341E-03	2.26E-06	-2.3E-07
112.606	37.514	0.003705	-0.00112	5.344E-03	1.86E-06	-5.6E-07
113.933	37.518	0.001503	-0.00068	5.346E-03	7.57E-07	-3.4E-07
115.268	37.518	0.001887	0.000834	5.346E-03	9.52E-07	4.23E-07
116.583	37.523	0.003714	0.000685	5.349E-03	1.88E-06	3.48E-07
117.960	37.528	0.003731	1.19E-05	5.352E-03	1.89E-06	9.46E-09
119.263	37.533	0.003746	-4.4E-05	5.354E-03	1.9E-06	-1.9E-08
120.629	37.538	0.003614	0.000219	5.357E-03	1.84E-06	1.16E-07
122.031	37.543	0.004353	0.000913	5.359E-03	2.22E-06	4.72E-07
123.386	37.550	0.006129	0.000457	5.363E-03	3.14E-06	2.4E-07
124.805	37.560	0.00562	-0.0009	5.368E-03	2.89E-06	-4.6E-07

ตาราง จ.25 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
126.232	37.566	0.003561	-7.3E-05	5.371E-03	1.84E-06	-3E-08
127.613	37.570	0.005415	0.001407	5.373E-03	2.81E-06	7.37E-07
129.002	37.581	0.007457	-0.00031	5.379E-03	3.88E-06	-1.5E-07
130.429	37.591	0.004541	-0.0014	5.384E-03	2.37E-06	-7.3E-07
131.865	37.594	0.003435	8.13E-05	5.385E-03	1.8E-06	4.84E-08
133.340	37.601	0.004778	0.000244	5.389E-03	2.51E-06	1.32E-07
134.795	37.608	0.00415	-0.00023	5.393E-03	2.19E-06	-1.1E-07
136.232	37.613	0.004121	0.000412	5.395E-03	2.18E-06	2.24E-07
137.707	37.620	0.005349	0.000176	5.399E-03	2.84E-06	9.87E-08
139.223	37.629	0.004647	-0.00121	5.404E-03	2.48E-06	-6.4E-07
140.720	37.634	0.001698	-0.00022	5.407E-03	9.07E-07	-1.1E-07
142.167	37.634	0.004005	0.001602	5.407E-03	2.15E-06	8.63E-07
143.716	37.646	0.006496	0.000302	5.413E-03	3.49E-06	1.68E-07
145.246	37.654	0.004934	-0.00074	5.417E-03	2.67E-06	-3.9E-07
146.756	37.661	0.004243	-0.00028	5.421E-03	2.3E-06	-1.4E-07
148.309	37.667	0.004087	0.000137	5.424E-03	2.23E-06	8.04E-08
149.937	37.674	0.004679	3.24E-05	5.428E-03	2.56E-06	2.43E-08
151.515	37.682	0.00419	-0.00033	5.433E-03	2.3E-06	-1.8E-07
154.710	37.694	0.003104	-0.00025	5.439E-03	1.71E-06	-1.3E-07
157.958	37.702	0.002594	2.98E-05	5.444E-03	1.44E-06	1.99E-08
161.263	37.711	0.003299	0.000352	5.449E-03	1.84E-06	2.01E-07
164.626	37.724	0.004939	0.000756	5.456E-03	2.78E-06	4.4E-07
167.742	37.743	0.008197	0.000786	5.467E-03	4.69E-06	4.72E-07
171.580	37.781	0.010402	0.000226	5.489E-03	6.07E-06	1.61E-07
175.144	37.820	0.009871	-0.00025	5.512E-03	5.89E-06	-1.1E-07

ตาราง จ.25 (ต่อ)

T (K)	L (μH)	$\frac{dL}{dT}$ (μH/K)	$\frac{d^2L}{dT^2}$ (μH/K ²)	λ (m)	$\frac{d\lambda}{dT}$ (m/K)	$\frac{d^2\lambda}{dT^2}$ (m/K ²)
178.672	37.851	0.008608	-0.0003	5.530E-03	5.26E-06	-1.5E-07
182.462	37.883	0.007639	-0.00019	5.550E-03	4.76E-06	-8.9E-08
186.264	37.909	0.007184	9.56E-05	5.567E-03	4.58E-06	9.3E-08
190.118	37.938	0.008371	0.000192	5.585E-03	5.48E-06	1.59E-07
194.149	37.975	0.008702	-4.8E-05	5.610E-03	5.84E-06	6.16E-09
198.163	38.008	0.007985	-0.00017	5.632E-03	5.53E-06	-7.7E-08
202.415	38.041	0.007299	-0.00011	5.655E-03	5.2E-06	-4E-08
206.794	38.071	0.00704	-3.8E-05	5.677E-03	5.18E-06	1E-08
211.222	38.103	0.006961	-5E-05	5.701E-03	5.29E-06	7.55E-10
215.844	38.134	0.006588	3.38E-07	5.725E-03	5.19E-06	4.53E-08
220.633	38.165	0.006965	5.74E-05	5.750E-03	5.72E-06	9.71E-08
225.608	38.202	0.007148	-1.4E-05	5.781E-03	6.13E-06	1.6E-07
230.845	38.238	0.006819		5.812E-03	7.35E-06	
260.070	38.437			6.034E-03		

ตาราง จ.26 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 5, 6 และ 9 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม

เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.250	-3.657	-0.199	-3.903	-0.176	-3.137
-0.243	-3.259	-0.187	-3.301	-0.170	-2.941
-0.237	-3.113	-0.175	-3.125	-0.163	-2.868
-0.231	-3.004	-0.164	-3.125	-0.157	-2.727
-0.224	-2.879	-0.152	-3.125	-0.151	-2.520
-0.218	-2.782	-0.141	-2.903	-0.145	-2.157
-0.212	-2.453	-0.130	-2.672	-0.139	-2.096
-0.206	-2.132	-0.119	-2.560	-0.133	-2.069
-0.200	-2.126	-0.108	-2.471	-0.127	-2.039
-0.194	-2.119	-0.098	-2.398	-0.121	-2.010
-0.188	-2.113	-0.087	-2.312	-0.115	-1.979
-0.183	-2.107	-0.077	-2.259	-0.110	-1.934
-0.177	-2.107	-0.067	-2.204	-0.104	-1.887
-0.171	-2.101	-0.057	-2.155	-0.098	-1.831
-0.165	-2.095	-0.047	-2.104	-0.093	-1.772
-0.160	-2.089	-0.037	-2.046	-0.087	-1.719
-0.154	-2.083	-0.032	-2.017	-0.082	-1.687
-0.149	-2.077	-0.029	-1.984	-0.076	-1.573
-0.143	-2.066	-0.027	-1.974	-0.071	-1.437
-0.138	-2.039	-0.025	-1.959	-0.065	-1.262
-0.132	-2.024	-0.023	-1.935	-0.060	-1.117
-0.127	-2.019	-0.021	-1.912	-0.054	-1.031
-0.122	-2.009	-0.019	-1.886	-0.049	-0.968
-0.116	-2.050	-0.017	-1.843	-0.044	-0.909

ตาราง จ.26 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.111	-1.946	-0.015	-1.786	-0.039	-0.866
-0.106	-2.009	-0.013	-1.702	-0.034	-0.837
-0.101	-2.004	-0.012	-1.592	-0.028	-0.795
-0.096	-1.967	-0.010	-1.398	-0.023	-0.759
-0.090	-1.967	-0.008	-1.182	-0.018	-0.712
-0.085	-1.950	-0.006	-0.972	-0.013	-0.653
-0.080	-1.937	-0.004	-0.856	-0.010	-0.600
-0.075	-1.921	-0.002	-0.722	-0.008	-0.575
-0.070	-1.921	0.000	-0.539	-0.006	-0.538
-0.065	-1.913	0.002	-0.471	-0.004	-0.511
-0.060	-1.909	0.004	-0.471	-0.002	-0.486
-0.056	-1.902	0.006	-0.471	0.000	-0.458
-0.050	-1.898	0.007	-0.470	0.002	-0.437
-0.046	-1.872	0.009	-0.470	0.004	-0.421
-0.041	-1.848	0.011	-0.470	0.006	-0.405
-0.036	-1.835	0.016	-0.469	0.008	-0.399
-0.031	-1.800	0.021	-0.468	0.010	-0.396
-0.026	-1.766	0.025	-0.468	0.012	-0.396
-0.022	-1.711	0.030	-0.467	0.014	-0.395
-0.017	-1.623	0.039	-0.465	0.016	-0.395
-0.012	-1.506	0.048	-0.463	0.018	-0.395
-0.009	-1.235	0.057	-0.461	0.020	-0.395
-0.009	-1.060	0.066	-0.460	0.022	-0.394
-0.008	-0.924	0.075	-0.459	0.031	-0.393
-0.007	-0.827	0.084	-0.457	0.041	-0.392

ตาราง จ.26 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.006	-0.782	0.093	-0.456	0.050	-0.391
-0.005	-0.732	0.102	-0.455	0.060	-0.389
-0.004	-0.663	0.147	-0.442	0.106	-0.383
-0.003	-0.631	0.192	-0.420	0.151	-0.378
-0.002	-0.595	0.240	-0.395	0.195	-0.364
-0.001	-0.559	0.294	-0.361	0.241	-0.348
0.000	-0.514	0.314	-0.338	0.289	-0.329
0.001	-0.479			0.342	-0.299
0.002	-0.472			0.361	-0.283
0.003	-0.469				
0.004	-0.467				
0.005	-0.467				
0.005	-0.467				
0.007	-0.467				
0.008	-0.467				
0.008	-0.467				
0.009	-0.466				
0.011	-0.466				
0.016	-0.465				
0.020	-0.464				
0.025	-0.463				
0.030	-0.462				
0.034	-0.461				
0.039	-0.460				
0.048	-0.458				

ตาราง จ.26 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.057	-0.455				
0.066	-0.453				
0.075	-0.450				
0.084	-0.444				
0.128	-0.441				
0.174	-0.408				
0.221	-0.383				
0.261	-0.357				

ตาราง จ.27 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 10, 13 และ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO ไม่เจือ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม

เม็ดสารตัวอย่างที่ 10		เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.239	-3.586	-0.191	-1.653	-0.247	-3.213
-0.227	-3.218	-0.185	-1.605	-0.241	-2.815
-0.215	-3.064	-0.178	-1.589	-0.229	-2.500
-0.203	-2.950	-0.172	-1.572	-0.216	-2.629
-0.191	-2.809	-0.166	-1.559	-0.204	-2.845
-0.179	-2.684	-0.160	-1.540	-0.192	-2.991
-0.167	-2.617	-0.154	-1.520	-0.180	-2.991
-0.156	-2.587	-0.148	-1.503	-0.169	-2.991
-0.145	-2.496	-0.142	-1.491	-0.158	-2.912
-0.134	-2.411	-0.136	-1.475	-0.147	-2.787
-0.123	-2.332	-0.130	-1.453	-0.136	-2.690

ตาราง จ.27 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 10		เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.113	-2.316	-0.124	-1.426	-0.125	-2.611
-0.102	-2.272	-0.119	-1.385	-0.114	-2.529
-0.092	-2.226	-0.113	-1.354	-0.104	-2.473
-0.082	-2.208	-0.107	-1.310	-0.093	-2.401
-0.072	-2.168	-0.102	-1.250	-0.083	-2.339
-0.062	-2.111	-0.096	-1.173	-0.073	-2.276
-0.052	-2.024	-0.091	-1.085	-0.063	-2.221
-0.042	-1.852	-0.085	-0.977	-0.053	-2.173
-0.037	-1.736	-0.080	-0.901	-0.044	-2.084
-0.034	-1.606	-0.074	-0.847	-0.034	-1.976
-0.032	-1.539	-0.069	-0.778	-0.024	-1.775
-0.030	-1.422	-0.063	-0.691	-0.023	-1.697
-0.028	-1.347	-0.058	-0.626	-0.021	-1.594
-0.027	-1.247	-0.053	-0.581	-0.019	-1.517
-0.025	-1.168	-0.048	-0.514	-0.017	-1.428
-0.023	-1.018	-0.042	-0.466	-0.015	-1.340
-0.022	-0.937	-0.037	-0.411	-0.014	-1.306
-0.021	-0.901	-0.032	-0.364	-0.013	-1.255
-0.020	-0.828	-0.027	-0.317	-0.012	-1.209
-0.019	-0.769	-0.022	-0.262	-0.011	-1.142
-0.018	-0.742	-0.019	-0.221	-0.010	-1.076
-0.017	-0.708	-0.017	-0.199	-0.009	-1.010
-0.016	-0.652	-0.016	-0.185	-0.008	-0.941
-0.015	-0.610	-0.015	-0.176	-0.007	-0.869
-0.014	-0.577	-0.014	-0.165	-0.006	-0.834

ตาราง จ.27 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 10		เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.013	-0.543	-0.013	-0.156	-0.004	-0.563
-0.012	-0.518	-0.012	-0.142	-0.003	-0.438
-0.011	-0.493	-0.011	-0.131	-0.002	-0.378
-0.010	-0.448	-0.010	-0.120	-0.001	-0.313
-0.009	-0.427	-0.009	-0.114	0.000	-0.262
-0.008	-0.397	-0.008	-0.110	0.001	-0.193
-0.008	-0.366	-0.007	-0.103	0.002	-0.178
-0.007	-0.349	-0.006	-0.095	0.003	-0.159
-0.006	-0.312	-0.005	-0.091	0.004	-0.141
-0.005	-0.272	-0.004	-0.087	0.005	-0.128
-0.004	-0.250	-0.003	-0.083	0.006	-0.122
-0.003	-0.231	-0.002	-0.078	0.007	-0.116
-0.002	-0.209	-0.001	-0.074	0.007	-0.114
-0.001	-0.180	0.000	-0.066	0.008	-0.113
0.000	-0.134	0.001	-0.063	0.009	-0.113
0.001	-0.111	0.002	-0.060	0.010	-0.113
0.002	-0.105	0.003	-0.058	0.011	-0.113
0.003	-0.102	0.004	-0.055	0.012	-0.113
0.004	-0.102	0.005	-0.053	0.013	-0.113
0.005	-0.102	0.006	-0.052	0.018	-0.112
0.006	-0.102	0.007	-0.049	0.022	-0.112
0.007	-0.102	0.008	-0.045	0.027	-0.112
0.009	-0.102	0.009	-0.044	0.031	-0.112
0.011	-0.102	0.010	-0.041	0.036	-0.112
0.013	-0.102	0.011	-0.038	0.041	-0.111

ตาราง จ.27 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 10		เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.015	-0.102	0.012	-0.036	0.050	-0.111
0.019	-0.102	0.013	-0.035	0.059	-0.111
0.024	-0.101	0.014	-0.034	0.068	-0.110
0.028	-0.101	0.014	-0.033	0.077	-0.110
0.033	-0.101	0.016	-0.032	0.085	-0.110
0.038	-0.101	0.016	-0.032	0.130	-0.106
0.042	-0.101	0.018	-0.032	0.176	-0.101
0.051	-0.101	0.018	-0.032	0.224	-0.096
0.060	-0.100	0.019	-0.032	0.277	-0.087
0.069	-0.100	0.020	-0.032	0.289	-0.084
0.078	-0.100	0.021	-0.032		
0.087	-0.100	0.022	-0.032		
0.132	-0.098	0.027	-0.032		
0.177	-0.094	0.032	-0.032		
0.225	-0.091	0.037	-0.032		
0.271	-0.086	0.041	-0.032		
		0.046	-0.032		
		0.051	-0.032		
		0.060	-0.032		
		0.069	-0.032		
		0.079	-0.032		
		0.088	-0.032		
		0.097	-0.031		
		0.142	-0.031		
		0.187	-0.031		

ตาราง จ.27 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 10		เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
		0.232	-0.030		
		0.280	-0.029		
		0.334	-0.028		
		0.349	-0.027		

ตาราง จ.28 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 3, 5 และ 6 ในแผนภาพสมดุลของระบบ

YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรการส่วนลอการิทึม

เม็ดสารตัวอย่างที่ 3		เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.211	-3.160	-0.156	-3.753	-0.208	-3.999
-0.199	-2.775	-0.143	-3.452	-0.195	-3.999
-0.186	-2.558	-0.131	-2.975	-0.178	-2.796
-0.174	-2.461	-0.119	-2.799	-0.150	-2.150
-0.162	-2.414	-0.107	-2.673	-0.127	-1.998
-0.151	-2.372	-0.095	-2.606	-0.102	-1.931
-0.139	-2.342	-0.084	-2.497	-0.081	-1.879
-0.128	-2.315	-0.078	-2.451	-0.059	-1.717
-0.117	-2.273	-0.072	-2.160	-0.040	-1.528
-0.106	-2.242	-0.067	-2.098	-0.029	-1.418
-0.095	-2.265	-0.061	-2.043	-0.024	-1.329
-0.084	-2.186	-0.056	-2.002	-0.020	-1.220
-0.074	-2.113	-0.051	-1.987	-0.015	-0.967
-0.063	-2.032	-0.045	-1.979	-0.013	-0.827
-0.053	-1.960	-0.040	-1.957	-0.013	-0.731

ตาราง จ.28 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 3		เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.043	-1.891	-0.034	-1.937	-0.011	-0.579
-0.033	-1.850	-0.029	-1.898	-0.011	-0.516
-0.023	-1.777	-0.024	-1.868	-0.010	-0.453
-0.021	-1.757	-0.019	-1.824	-0.009	-0.398
-0.020	-1.736	-0.013	-1.756	-0.007	-0.348
-0.017	-1.677	-0.012	-1.739	-0.007	-0.315
-0.016	-1.566	-0.010	-1.694	-0.005	-0.269
-0.014	-1.456	-0.008	-1.621	-0.005	-0.237
-0.012	-1.347	-0.006	-1.583	-0.003	-0.205
-0.010	-1.144	-0.004	-1.551	-0.003	-0.176
-0.008	-0.984	-0.002	-1.507	-0.002	-0.132
-0.006	-0.857	0.000	-1.470	-0.001	-0.114
-0.004	-0.774	0.002	-1.422	0.000	-0.074
-0.002	-0.715	0.004	-1.403	0.001	-0.053
0.000	-0.628	0.006	-1.373	0.002	-0.046
0.002	-0.586	0.008	-1.352	0.003	-0.044
0.004	-0.550	0.010	-1.327	0.004	-0.043
0.006	-0.528	0.012	-1.304	0.005	-0.042
0.007	-0.517	0.014	-1.284	0.006	-0.042
0.009	-0.515	0.016	-1.264	0.008	-0.042
0.011	-0.515	0.018	-1.247	0.010	-0.042
0.013	-0.514	0.020	-1.234	0.014	-0.042
0.015	-0.514	0.022	-1.218	0.019	-0.042
0.017	-0.514	0.024	-1.205	0.029	-0.042
0.019	-0.514	0.026	-1.200	0.038	-0.042

ตาราง จ.28 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 3		เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.021	-0.514	0.028	-1.184	0.056	-0.042
0.024	-0.513	0.030	-1.176	0.075	-0.042
0.034	-0.511	0.032	-1.161	0.120	-0.041
0.043	-0.509	0.034	-1.161	0.164	-0.041
0.052	-0.507	0.036	-1.155	0.210	-0.041
0.061	-0.504	0.038	-1.151	0.258	-0.040
0.071	-0.502	0.040	-1.148	0.307	-0.038
0.080	-0.501	0.042	-1.146		
0.089	-0.499	0.043	-1.140		
0.116	-0.496	0.046	-1.140		
0.160	-0.486	0.047	-1.138		
0.206	-0.463	0.049	-1.137		
0.254	-0.440	0.051	-1.134		
0.302	-0.448	0.056	-1.128		
		0.061	-1.122		
		0.066	-1.116		
		0.070	-1.109		
		0.075	-1.103		
		0.080	-1.098		
		0.089	-1.083		
		0.098	-1.071		
		0.107	-1.059		
		0.117	-1.047		
		0.126	-1.034		
		0.171	-0.990		

ตาราง จ.28 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 3		เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
		0.216	-0.919		
		0.261	-0.815		
		0.309	-0.827		
		0.356	-0.717		

ตาราง จ.29 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 9 และ 10 ในแผนภาพสมดุของระบบ

YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตราส่วนลอการิทึม

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.145	-2.952	-0.143	-2.979	-0.167	-3.649
-0.131	-2.567	-0.130	-2.678	-0.154	-2.679
-0.120	-2.383	-0.118	-2.543	-0.142	-2.608
-0.108	-2.279	-0.106	-2.430	-0.130	-2.483
-0.097	-2.207	-0.094	-2.201	-0.118	-2.483
-0.091	-2.165	-0.083	-1.834	-0.107	-2.411
-0.063	-2.050	-0.072	-1.724	-0.095	-2.363
-0.052	-1.870	-0.066	-1.652	-0.084	-2.241
-0.041	-1.738	-0.063	-1.576	-0.072	-2.168
-0.030	-1.549	-0.061	-1.509	-0.062	-2.098
-0.028	-1.493	-0.057	-1.391	-0.051	-1.903
-0.026	-1.439	-0.055	-1.287	-0.040	-1.633
-0.024	-1.381	-0.054	-1.247	-0.030	-1.405
-0.022	-1.315	-0.053	-1.202	-0.028	-1.309
-0.022	-1.289	-0.052	-1.178	-0.025	-1.177

ตาราง จ.29 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.020	-1.250	-0.050	-1.137	-0.023	-1.101
-0.019	-1.167	-0.049	-1.114	-0.022	-1.039
-0.018	-1.128	-0.048	-1.083	-0.021	-1.000
-0.017	-1.086	-0.047	-1.047	-0.020	-0.969
-0.017	-1.042	-0.046	-1.026	-0.019	-0.911
-0.015	-0.944	-0.045	-0.999	-0.018	-0.888
-0.014	-0.868	-0.044	-0.974	-0.017	-0.867
-0.013	-0.774	-0.043	-0.958	-0.016	-0.843
-0.012	-0.691	-0.042	-0.927	-0.015	-0.804
-0.011	-0.615	-0.041	-0.904	-0.014	-0.774
-0.010	-0.531	-0.039	-0.891	-0.013	-0.762
-0.009	-0.474	-0.039	-0.875	-0.012	-0.710
-0.008	-0.450	-0.038	-0.854	-0.011	-0.692
-0.007	-0.401	-0.036	-0.840	-0.010	-0.645
-0.006	-0.379	-0.035	-0.825	-0.009	-0.616
-0.005	-0.347	-0.034	-0.808	-0.008	-0.595
-0.004	-0.322	-0.033	-0.792	-0.007	-0.577
-0.003	-0.302	-0.032	-0.778	-0.006	-0.557
-0.002	-0.278	-0.031	-0.766	-0.005	-0.530
-0.001	-0.262	-0.030	-0.756	-0.004	-0.499
0.000	-0.238	-0.029	-0.749	-0.003	-0.484
0.001	-0.219	-0.028	-0.734	-0.002	-0.448
0.002	-0.212	-0.027	-0.722	-0.001	-0.420
0.003	-0.208	-0.026	-0.707	0.000	-0.390
0.004	-0.196	-0.025	-0.696	0.001	-0.339

ตาราง จ.29 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.005	-0.189	-0.024	-0.686	0.002	-0.327
0.006	-0.175	-0.023	-0.679	0.003	-0.310
0.007	-0.167	-0.021	-0.670	0.004	-0.293
0.008	-0.158	-0.020	-0.662	0.005	-0.284
0.009	-0.153	-0.020	-0.648	0.006	-0.279
0.010	-0.150	-0.018	-0.641	0.007	-0.278
0.011	-0.143	-0.018	-0.634	0.008	-0.277
0.012	-0.141	-0.016	-0.624	0.009	-0.277
0.013	-0.136	-0.015	-0.613	0.010	-0.277
0.014	-0.134	-0.014	-0.604	0.011	-0.277
0.015	-0.130	-0.013	-0.594	0.021	-0.276
0.016	-0.128	-0.012	-0.583	0.030	-0.275
0.017	-0.126	-0.011	-0.576	0.040	-0.274
0.018	-0.123	-0.010	-0.569	0.068	-0.273
0.019	-0.121	-0.009	-0.553	0.115	-0.268
0.020	-0.120	-0.008	-0.545	0.160	-0.263
0.021	-0.118	-0.007	-0.533	0.204	-0.234
0.022	-0.117	-0.006	-0.520		
0.023	-0.116	-0.005	-0.514		
0.024	-0.115	-0.004	-0.499		
0.025	-0.115	-0.003	-0.487		
0.026	-0.115	-0.002	-0.476		
0.031	-0.115	-0.001	-0.468		
0.042	-0.114	0.000	-0.456		
0.079	-0.113	0.001	-0.441		

ตาราง จ.29 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.124	-0.111	0.002	-0.431		
0.170	-0.110	0.003	-0.419		
0.214	-0.107	0.004	-0.409		
0.260	-0.106	0.005	-0.396		
0.297	-0.103	0.006	-0.390		
		0.007	-0.384		
		0.008	-0.376		
		0.009	-0.372		
		0.010	-0.369		
		0.011	-0.366		
		0.012	-0.363		
		0.013	-0.362		
		0.014	-0.361		
		0.015	-0.361		
		0.016	-0.360		
		0.017	-0.360		
		0.018	-0.360		
		0.023	-0.360		
		0.028	-0.359		
		0.033	-0.359		
		0.043	-0.358		
		0.052	-0.358		
		0.127	-0.355		
		0.172	-0.348		
		0.216	-0.344		

ตาราง จ.29 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
		0.262	-0.325		
		0.310	-0.303		
		0.340	-0.293		

ตาราง จ.30 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 13 และ 14 ในแผนภาพสมดุลของระบบ

YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.1}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม

เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.174	-3.374	-0.134	-3.987
-0.168	-3.198	-0.131	-3.385
-0.161	-3.073	-0.129	-3.084
-0.155	-2.897	-0.126	-2.988
-0.149	-2.897	-0.124	-2.946
-0.143	-2.772	-0.122	-2.842
-0.137	-2.721	-0.119	-2.733
-0.131	-2.634	-0.117	-2.709
-0.125	-2.562	-0.114	-2.666
-0.119	-2.530	-0.112	-2.573
-0.114	-2.472	-0.110	-2.541
-0.108	-2.397	-0.107	-2.470
-0.102	-2.375	-0.105	-2.307
-0.096	-2.279	-0.103	-2.281
-0.091	-2.245	-0.100	-2.204
-0.086	-2.146	-0.098	-2.163

ตาราง จ.30 (ต่อ)

เมตสารตัวอย่างที่ 13		เมตสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.080	-2.065	-0.096	-2.120
-0.074	-1.979	-0.093	-2.097
-0.069	-1.880	-0.091	-2.071
-0.064	-1.777	-0.089	-2.036
-0.058	-1.653	-0.086	-1.990
-0.053	-1.512	-0.084	-1.570
-0.048	-1.360	-0.082	-1.549
-0.043	-1.099	-0.079	-1.530
-0.041	-1.003	-0.077	-1.506
-0.040	-0.927	-0.075	-1.478
-0.039	-0.873	-0.073	-1.449
-0.038	-0.820	-0.070	-1.413
-0.036	-0.755	-0.068	-1.376
-0.035	-0.717	-0.066	-1.350
-0.034	-0.673	-0.064	-1.309
-0.033	-0.613	-0.062	-1.256
-0.032	-0.588	-0.059	-1.205
-0.031	-0.525	-0.057	-1.154
-0.030	-0.506	-0.055	-1.110
-0.029	-0.492	-0.053	-1.070
-0.028	-0.464	-0.051	-1.026
-0.027	-0.446	-0.049	-0.986
-0.026	-0.429	-0.046	-0.946
-0.025	-0.396	-0.044	-0.917
-0.024	-0.376	-0.042	-0.870

ตาราง จ.30 (ต่อ)

เมตสารตัวอย่างที่ 13		เมตสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.023	-0.358	-0.040	-0.839
-0.022	-0.338	-0.038	-0.806
-0.021	-0.312	-0.036	-0.772
-0.020	-0.296	-0.033	-0.735
-0.019	-0.272	-0.031	-0.702
-0.018	-0.255	-0.029	-0.661
-0.017	-0.239	-0.027	-0.607
-0.016	-0.223	-0.025	-0.563
-0.015	-0.210	-0.023	-0.501
-0.014	-0.191	-0.021	-0.458
-0.013	-0.178	-0.019	-0.418
-0.012	-0.165	-0.017	-0.385
-0.011	-0.148	-0.015	-0.354
-0.010	-0.137	-0.012	-0.318
-0.009	-0.123	-0.010	-0.289
-0.008	-0.109	-0.008	-0.256
-0.007	-0.096	-0.006	-0.220
-0.006	-0.086	-0.004	-0.186
-0.005	-0.074	-0.002	-0.153
-0.004	-0.059	0.000	-0.120
-0.003	-0.048	0.002	-0.093
-0.002	-0.037	0.004	-0.081
-0.001	-0.026	0.006	-0.073
0.000	-0.017	0.008	-0.072
0.001	-0.012	0.010	-0.071

ตาราง จ.30 (ต่อ)

เมตสารตัวอย่างที่ 13		เมตสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.002	-0.009	0.012	-0.071
0.003	-0.008	0.014	-0.071
0.004	-0.008	0.016	-0.071
0.005	-0.008	0.018	-0.071
0.006	-0.008	0.020	-0.071
0.007	-0.008	0.024	-0.071
0.008	-0.008	0.034	-0.071
0.010	-0.008	0.082	-0.069
0.013	-0.008	0.127	-0.066
0.018	-0.008	0.173	-0.063
0.027	-0.008		
0.046	-0.008		
0.147	-0.008		
0.237	-0.007		
0.285	-0.007		
0.290	-0.007		

ตาราง จ.31 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเมตสารตัวอย่างที่ 3, 5 และ 6 ในแผนภาพสมดุลงของระบบ

YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตราส่วนลอการิทึม

เมตสารตัวอย่างที่ 3		เมตสารตัวอย่างที่ 5		เมตสารตัวอย่างที่ 6	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.121	-2.862	-0.135	-3.477	-0.140	-3.656
-0.109	-2.662	-0.129	-3.477	-0.128	-3.480
-0.097	-2.616	-0.123	-3.477	-0.116	-2.957

ตาราง จ.31 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 3		เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.086	-2.562	-0.117	-3.301	-0.104	-2.843
-0.074	-2.440	-0.111	-3.301	-0.092	-2.702
-0.064	-2.218	-0.104	-3.176	-0.081	-2.480
-0.052	-2.089	-0.099	-3.079	-0.069	-2.366
-0.042	-1.939	-0.093	-3.079	-0.059	-2.202
-0.031	-1.756	-0.087	-3.000	-0.048	-2.028
-0.021	-1.512	-0.081	-3.000	-0.042	-1.924
-0.015	-1.309	-0.076	-2.875	-0.037	-1.659
-0.013	-1.167	-0.070	-2.698	-0.031	-1.410
-0.010	-1.078	-0.064	-2.522	-0.026	-1.256
-0.008	-0.995	-0.059	-2.397	-0.021	-1.115
-0.006	-0.890	-0.053	-2.285	-0.015	-0.974
-0.005	-0.807	-0.048	-2.208	-0.010	-0.852
-0.004	-0.732	-0.042	-2.245	-0.005	-0.746
-0.003	-0.679	-0.037	-2.299	0.000	-0.637
-0.002	-0.638	-0.031	-2.258	0.005	-0.564
-0.001	-0.602	-0.026	-2.163	0.010	-0.506
0.000	-0.509	-0.021	-2.085	0.015	-0.486
0.001	-0.448	-0.016	-1.989	0.020	-0.479
0.002	-0.433	-0.010	-1.881	0.025	-0.478
0.003	-0.416	-0.005	-1.763	0.030	-0.477
0.004	-0.396	0.000	-1.643	0.035	-0.477
0.005	-0.379	0.005	-1.555	0.040	-0.476
0.006	-0.369	0.010	-1.478	0.044	-0.476
0.007	-0.361	0.015	-1.421	0.049	-0.475

ตาราง จ.31 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 3		เม็ดสารตัวอย่างที่ 5		เม็ดสารตัวอย่างที่ 6	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.008	-0.357	0.020	-1.378	0.054	-0.474
0.009	-0.354	0.025	-1.354	0.059	-0.473
0.010	-0.340	0.030	-1.333	0.064	-0.473
0.011	-0.337	0.035	-1.316	0.069	-0.472
0.012	-0.334	0.040	-1.302	0.073	-0.471
0.013	-0.329	0.045	-1.289	0.078	-0.470
0.014	-0.328	0.050	-1.274	0.083	-0.469
0.015	-0.327	0.055	-1.262	0.092	-0.468
0.016	-0.325	0.059	-1.281	0.102	-0.467
0.017	-0.324	0.064	-1.274	0.110	-0.466
0.018	-0.324	0.069	-1.269	0.120	-0.463
0.020	-0.324	0.074	-1.265	0.129	-0.461
0.030	-0.322	0.079	-1.257	0.138	-0.460
0.039	-0.321	0.083	-1.254	0.147	-0.459
0.049	-0.320	0.088	-1.248	0.156	-0.457
0.059	-0.319	0.106	-1.227	0.165	-0.455
0.068	-0.318	0.125	-1.225	0.174	-0.453
0.078	-0.318	0.143	-1.207	0.218	-0.440
0.096	-0.316	0.161	-1.194	0.264	-0.418
0.169	-0.316	0.179	-1.173	0.312	-0.390
0.213	-0.310	0.197	-1.149	0.333	-0.377
0.259	-0.303	0.215	-1.082		
0.307	-0.287	0.233	-1.005		
0.338	-0.286	0.269	-0.899		
		0.317	-0.783		

ตาราง จ.32 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 8, 9 และ 10 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.156	-4.064	-0.192	-3.881	-0.156	-3.778
-0.150	-3.110	-0.185	-3.580	-0.149	-3.234
-0.144	-2.860	-0.179	-3.404	-0.143	-3.000
-0.138	-2.703	-0.173	-3.279	-0.137	-2.875
-0.132	-2.633	-0.166	-3.103	-0.131	-2.737
-0.126	-2.573	-0.161	-3.036	-0.125	-2.682
-0.120	-2.546	-0.155	-2.978	-0.119	-2.588
-0.114	-2.521	-0.149	-2.978	-0.113	-2.548
-0.108	-2.497	-0.143	-2.927	-0.107	-2.500
-0.102	-2.497	-0.137	-2.927	-0.101	-2.390
-0.096	-2.463	-0.131	-2.927	-0.095	-2.356
-0.091	-2.402	-0.125	-2.881	-0.089	-2.309
-0.085	-2.366	-0.119	-2.840	-0.084	-2.254
-0.079	-2.246	-0.114	-2.767	-0.078	-2.223
-0.074	-2.190	-0.108	-2.626	-0.072	-2.151
-0.069	-2.053	-0.106	-2.580	-0.067	-2.089
-0.063	-1.970	-0.104	-2.539	-0.061	-2.028
-0.057	-1.894	-0.101	-2.466	-0.056	-1.932
-0.052	-1.825	-0.099	-2.434	-0.050	-1.839
-0.047	-1.752	-0.097	-2.389	-0.045	-1.685
-0.041	-1.661	-0.095	-2.362	-0.040	-1.548
-0.036	-1.554	-0.093	-2.324	-0.034	-1.379
-0.031	-1.421	-0.090	-2.290	-0.031	-1.295
-0.026	-1.251	-0.088	-2.257	-0.029	-1.226

ตาราง จ.32 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.022	-1.126	-0.086	-2.218	-0.027	-1.127
-0.019	-0.903	-0.084	-2.182	-0.025	-1.061
-0.019	-0.868	-0.082	-2.132	-0.023	-1.003
-0.017	-0.805	-0.080	-2.088	-0.021	-0.939
-0.016	-0.747	-0.077	-2.041	-0.018	-0.874
-0.015	-0.670	-0.075	-1.982	-0.016	-0.817
-0.014	-0.608	-0.073	-1.950	-0.014	-0.756
-0.013	-0.548	-0.071	-1.897	-0.012	-0.690
-0.012	-0.513	-0.069	-1.834	-0.010	-0.619
-0.011	-0.466	-0.067	-1.779	-0.008	-0.567
-0.010	-0.422	-0.065	-1.733	-0.006	-0.511
-0.009	-0.399	-0.063	-1.694	-0.004	-0.450
-0.008	-0.381	-0.060	-1.648	-0.002	-0.392
-0.007	-0.354	-0.058	-1.611	0.000	-0.340
-0.006	-0.330	-0.056	-1.570	0.002	-0.299
-0.005	-0.308	-0.054	-1.535	0.004	-0.266
-0.004	-0.295	-0.052	-1.502	0.006	-0.251
-0.003	-0.271	-0.050	-1.470	0.008	-0.241
-0.002	-0.255	-0.048	-1.440	0.010	-0.237
-0.001	-0.241	-0.046	-1.410	0.012	-0.234
0.000	-0.226	-0.044	-1.380	0.014	-0.234
0.001	-0.210	-0.042	-1.358	0.016	-0.233
0.002	-0.199	-0.040	-1.329	0.018	-0.233
0.003	-0.189	-0.038	-1.299	0.020	-0.233
0.004	-0.179	-0.036	-1.278	0.022	-0.233

ตาราง จ.32 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 8		เม็ดสารตัวอย่างที่ 9		เม็ดสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.005	-0.169	-0.034	-1.246	0.024	-0.233
0.006	-0.163	-0.032	-1.230	0.026	-0.233
0.007	-0.155	-0.030	-1.210	0.028	-0.232
0.008	-0.147	-0.028	-1.183	0.032	-0.232
0.009	-0.141	-0.025	-1.158	0.042	-0.232
0.010	-0.135	-0.024	-1.137	0.051	-0.231
0.011	-0.129	-0.022	-1.111	0.061	-0.230
0.012	-0.125	-0.020	-1.089	0.070	-0.230
0.013	-0.122	-0.018	-1.072	0.080	-0.229
0.014	-0.118	-0.016	-1.044	0.126	-0.226
0.015	-0.116	-0.014	-1.021	0.167	-0.223
0.016	-0.113	-0.012	-0.998	0.215	-0.213
0.017	-0.111	-0.010	-0.978	0.259	-0.201
0.018	-0.109	-0.008	-0.944		
0.019	-0.107	-0.006	-0.916		
0.020	-0.104	-0.004	-0.894		
0.021	-0.103	-0.002	-0.862		
0.022	-0.102	0.000	-0.828		
0.023	-0.102	0.002	-0.797		
0.024	-0.100	0.004	-0.775		
0.025	-0.099	0.006	-0.762		
0.026	-0.099	0.008	-0.755		
0.027	-0.098	0.010	-0.751		
0.028	-0.098	0.012	-0.749		
0.029	-0.097	0.014	-0.747		

ตาราง จ.32 (ต่อ)

เมตสารตัวอย่างที่ 8		เมตสารตัวอย่างที่ 9		เมตสารตัวอย่างที่ 10	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.030	-0.097	0.016	-0.746		
0.031	-0.097	0.018	-0.746		
0.032	-0.097	0.020	-0.745		
0.033	-0.097	0.022	-0.744		
0.034	-0.097	0.023	-0.744		
0.035	-0.096	0.025	-0.743		
0.044	-0.096	0.044	-0.735		
0.054	-0.096	0.090	-0.712		
0.073	-0.096	0.135	-0.696		
0.119	-0.095	0.171	-0.677		
0.164	-0.094	0.225	-0.624		
0.208	-0.091	0.273	-0.577		
0.254	-0.087	0.288	-0.562		
0.302	-0.083				
0.305	-0.083				

ตาราง จ.33 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเมตสารตัวอย่างที่ 13 และ 14 ในแผนภาพสมมูลของระบบ

YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตรฐานลอการิทึม

เมตสารตัวอย่างที่ 13		เมตสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.197	-3.359	-0.215	-2.977
-0.191	-3.183	-0.209	-2.489
-0.184	-3.183	-0.202	-2.423
-0.178	-3.058	-0.196	-2.404

ตาราง จ.33 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.172	-2.961	-0.190	-2.376
-0.166	-2.961	-0.184	-2.367
-0.160	-2.882	-0.178	-2.349
-0.154	-2.815	-0.172	-2.341
-0.148	-2.757	-0.166	-2.325
-0.143	-2.706	-0.160	-2.309
-0.137	-2.706	-0.154	-2.294
-0.131	-2.619	-0.148	-2.279
-0.126	-2.581	-0.142	-2.258
-0.120	-2.515	-0.137	-2.231
-0.114	-2.431	-0.131	-2.212
-0.109	-2.360	-0.126	-2.182
-0.103	-2.300	-0.120	-2.154
-0.098	-2.319	-0.115	-2.118
-0.092	-2.247	-0.109	-2.089
-0.087	-2.171	-0.103	-2.049
-0.082	-2.083	-0.098	-2.020
-0.077	-2.000	-0.093	-1.979
-0.071	-1.900	-0.087	-1.937
-0.066	-1.801	-0.082	-1.900
-0.061	-1.707	-0.077	-1.851
-0.056	-1.585	-0.072	-1.806
-0.051	-1.424	-0.067	-1.753
-0.045	-1.240	-0.061	-1.677
-0.041	-1.016	-0.056	-1.598

ตาราง จ.33 (ต่อ)

เมตสารตัวอย่างที่ 13		เมตสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.036	-0.817	-0.051	-1.541
-0.031	-0.649	-0.046	-1.414
-0.028	-0.577	-0.041	-1.295
-0.026	-0.531	-0.036	-1.200
-0.024	-0.495	-0.031	-1.117
-0.021	-0.452	-0.026	-1.030
-0.020	-0.407	-0.021	-0.949
-0.018	-0.345	-0.019	-0.912
-0.016	-0.323	-0.017	-0.858
-0.014	-0.294	-0.015	-0.816
-0.012	-0.257	-0.013	-0.765
-0.011	-0.234	-0.011	-0.704
-0.010	-0.218	-0.011	-0.660
-0.009	-0.203	-0.010	-0.637
-0.008	-0.189	-0.009	-0.609
-0.007	-0.156	-0.008	-0.582
-0.006	-0.136	-0.007	-0.554
-0.005	-0.119	-0.006	-0.525
-0.004	-0.096	-0.005	-0.499
-0.003	-0.074	-0.004	-0.483
-0.002	-0.057	-0.003	-0.466
-0.001	-0.034	-0.002	-0.447
0.000	-0.017	-0.001	-0.431
0.001	-0.010	0.000	-0.401
0.002	-0.009	0.001	-0.380

ตาราง จ.33 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.003	-0.009	0.002	-0.362
0.004	-0.009	0.003	-0.348
0.005	-0.009	0.004	-0.337
0.006	-0.009	0.005	-0.329
0.007	-0.009	0.006	-0.318
0.008	-0.009	0.007	-0.309
0.010	-0.009	0.008	-0.306
0.012	-0.009	0.009	-0.303
0.013	-0.009	0.010	-0.300
0.015	-0.009	0.011	-0.300
0.017	-0.009	0.011	-0.300
0.019	-0.009	0.012	-0.299
0.023	-0.009	0.014	-0.299
0.028	-0.009	0.015	-0.299
0.032	-0.009	0.017	-0.299
0.042	-0.009	0.019	-0.299
0.051	-0.009	0.021	-0.298
0.060	-0.009	0.023	-0.298
0.069	-0.009	0.027	-0.298
0.078	-0.009	0.036	-0.297
0.123	-0.009	0.045	-0.296
0.168	-0.008	0.054	-0.295
0.213	-0.008	0.064	-0.294
0.261	-0.008	0.073	-0.294
0.315	-0.007	0.118	-0.289

ตาราง จ.33 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 13		เม็ดสารตัวอย่างที่ 14	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.317	-0.007	0.162	-0.278
		0.208	-0.267
		0.256	-0.251
		0.309	-0.226
		0.315	-0.220

ตาราง จ.34 แสดงค่าระยะเจาะลึกยังผลของเม็ดสารตัวอย่างที่ 15 และ 18 ในแผนภาพสมดุลของระบบ YBCO เจือด้วย $(\text{Ag}_2\text{O})_{0.2}$ เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสาร มาตราส่วนลอการิทึม

เม็ดสารตัวอย่างที่ 15		เม็ดสารตัวอย่างที่ 18	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.139	-3.936	-0.119	-3.456
-0.133	-3.635	-0.117	-3.456
-0.127	-3.635	-0.115	-3.332
-0.121	-3.459	-0.112	-3.332
-0.115	-3.459	-0.110	-3.156
-0.109	-3.334	-0.108	-3.156
-0.103	-3.334	-0.105	-3.156
-0.097	-3.033	-0.103	-3.031
-0.091	-2.822	-0.100	-3.031
-0.086	-2.681	-0.098	-2.980
-0.080	-2.505	-0.096	-2.934
-0.074	-2.357	-0.094	-2.892
-0.069	-2.205	-0.091	-2.820
-0.063	-2.057	-0.089	-2.820

ตาราง จ.34 (ต่อ)

เมตสารตัวอย่างที่ 15		เมตสารตัวอย่างที่ 18	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
-0.058	-1.922	-0.087	-2.788
-0.052	-1.797	-0.085	-2.704
-0.047	-1.676	-0.082	-2.519
-0.041	-1.561	-0.080	-2.472
-0.036	-1.445	-0.078	-2.355
-0.031	-1.289	-0.076	-2.245
-0.026	-1.114	-0.073	-2.172
-0.023	-1.010	-0.071	-2.084
-0.020	-0.915	-0.069	-2.006
-0.018	-0.851	-0.067	-1.903
-0.016	-0.753	-0.065	-1.820
-0.014	-0.701	-0.062	-1.759
-0.013	-0.661	-0.061	-1.705
-0.012	-0.591	-0.058	-1.613
-0.011	-0.566	-0.056	-1.571
-0.010	-0.544	-0.054	-1.521
-0.009	-0.511	-0.052	-1.467
-0.008	-0.482	-0.049	-1.429
-0.007	-0.463	-0.047	-1.393
-0.006	-0.428	-0.045	-1.360
-0.005	-0.389	-0.043	-1.312
-0.004	-0.360	-0.041	-1.262
-0.003	-0.337	-0.039	-1.210
-0.002	-0.277	-0.037	-1.143
-0.001	-0.259	-0.035	-1.089

ตาราง จ.34 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 15		เม็ดสารตัวอย่างที่ 18	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.000	-0.213	-0.032	-1.008
0.001	-0.176	-0.030	-0.942
0.002	-0.160	-0.028	-0.858
0.003	-0.136	-0.026	-0.787
0.004	-0.126	-0.024	-0.728
0.005	-0.120	-0.022	-0.639
0.006	-0.117	-0.020	-0.572
0.007	-0.116	-0.018	-0.500
0.008	-0.116	-0.016	-0.447
0.009	-0.116	-0.014	-0.406
0.010	-0.116	-0.012	-0.377
0.012	-0.116	-0.010	-0.355
0.014	-0.116	-0.008	-0.320
0.016	-0.116	-0.006	-0.293
0.018	-0.115	-0.004	-0.269
0.020	-0.115	-0.002	-0.244
0.030	-0.115	0.000	-0.220
0.040	-0.115	0.002	-0.201
0.049	-0.114	0.004	-0.185
0.059	-0.114	0.006	-0.172
0.069	-0.114	0.008	-0.166
0.078	-0.113	0.010	-0.161
0.124	-0.111	0.012	-0.158
0.169	-0.109	0.014	-0.157
0.211	-0.108	0.016	-0.157

ตาราง จ.34 (ต่อ)

เม็ดสารตัวอย่างที่ 15		เม็ดสารตัวอย่างที่ 18	
$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$	$\log\left(\frac{T}{T_c}\right)$	$\log\left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]$
0.259	-0.099	0.018	-0.157
0.297	-0.094	0.020	-0.156
		0.022	-0.156
		0.024	-0.156
		0.026	-0.156
		0.028	-0.156
		0.041	-0.155
		0.051	-0.154
		0.060	-0.154
		0.070	-0.153
		0.116	-0.149
		0.161	-0.146
		0.206	-0.141
		0.251	-0.132
		0.299	-0.124
		0.309	-0.123

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายพิพัฒน์ เชื้อเมืองพาน
ที่อยู่	303 หมู่ 1 ร่องคต ตำบลทานตะวัน อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57280
ที่ทำงาน	โรงเรียนจุฬารณราชวิทยาลัย เชียงราย ตำบลรอบเวียง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย 57000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2540	สำเร็จการศึกษาปริญญาครุศาสตรบัณฑิต (โครงการครูทายาท) สาขาวิชาเอกฟิสิกส์ วิชาโทคณิตศาสตร์ จากมหาวิทยาลัย- ราชภัฏเชียงราย
พ.ศ. 2546	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2540 – ปัจจุบัน	ครูสอนวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนจุฬารณราชวิทยาลัย เชียงราย ตำบลรอบเวียง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย