แผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O ที่ 950 °C
Equilibrium Diagrams of Y-Ba-Cu-O System at 950 °C

กำชัย ตรีชัยรัศมี
จำนงค์ ฉายเชิด
พูลศักดิ์ อินทวี
สงวนสิริ รุ่งเกียรติ์สกุล
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทคัดย่อ

สารตัวอย่างต่างๆ ของพวกออกไซด์สามตัว (Y_2O_3, BaO, CuO) ได้เตรียมขึ้นโดยการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลเบื้องต้นเขียนสรุปในแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O สารตัวอย่างแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด, สารตัวอย่างสีดำ, สารตัวอย่างสีเขียว และสารตัวอย่างที่เกิดการหลอมเหลวแสดงให้เห็นด้วยเครื่องหมายวงกลม, วงกลมทึบ, สามเหลี่ยมทึบ และกากบาท ตามลำดับ สารตัวอย่างที่มีสัดส่วนเป็น $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ ซึ่งมีค่า $1 \leq x \leq 3$, $2 \leq y \leq 4$ และ $4 \leq z \leq 6$ มีการแสดงสมบัติสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

Abstract

Various samples of the ternary oxides (Y_2O_3, BaO, CuO) were prepared by sintering at 950 °C for 24 hours. The preliminary results are summarized in equilibrium diagrams of Y-Ba-Cu-O system.Superconducting samples, black samples, green samples and melted samples are marked with circle, a solid circle, a solid triangle and a cross respectively. The samples of nominal $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ which $1 \leq x \leq 2$, $2 \leq y \leq 4$ และ $4 \leq z \leq 6$ s property of superconductivity.

คำนำ

ตั้งแต่บีดโนร์ด และมูลเลอร์ ได้ค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงในระบบ La-Sr-Cu-O ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้มีความพยายามในการหาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) สูงขึ้น ชูกับคณะ และวู กับคณะ ได้ค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงในระบบ Y-Ba-Cu-O (123) ที่มีค่า $T_c \sim 85^\circ K - 95^\circ K$(1) ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมสาร โดยการใช้สารประกอบเริ่มต้นพวก Y_2O_3, BaO หรือ BaO_2 หรือ $Ba(OH)_2$ หรือ $Ba(NO_3)_2$ หรือ $BaCO_3$ และ CuO ผสมกันให้มีสัดส่วนอะตอมของ Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C-1200 °C แล้วปล่อยให้สารมีการเย็นตัวภายในเตาก็จะได้สารตัวนำ

ไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตแตกต่างกัน นักวิจัยหลายกลุ่มมีการลองเปลี่ยนสัดส่วนมวลสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผสม เพื่อต้องการหาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวใหม่ๆ พร้อมทั้งศึกษาพฤติกรรมของสารในระบบ Y-Ba-Cu-O ในการเปลี่ยนสัดส่วนมวลของสารประกอบเริ่มต้นในการผสมมีอยู่หลายๆ แบบ และปัจจุบันนี้มีการใช้สารประกอบเริ่มต้นเพื่อการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากกว่าสามชนิดแล้ว เช่น พวกของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในระบบของ Bi-Sr-Ca-Cu-O ซึ่งมีการใช้สารประกอบเริ่มต้นถึงสี่ชนิด ถ้ามีการใช้สารประกอบเริ่มต้นมากกว่าสองชนิดขึ้นไปก็จะทำให้เกิดความยุ่งยากและมีลักษณะที่ซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แผนภาพสมดุลเข้ามาช่วย ทำให้เกิดมีการเปลี่ยนสัดส่วนมวลสารประกอบเริ่มต้นในการผสมสำหรับเตรียมสารอย่างเป็นระบบ ช่วยให้สามารถเลือกสัดส่วนมวลสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผสมสำหรับเตรียมสารที่เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้ และยังทำให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของสารด้วยซึ่งจะเกิดประโยชน์อย่างมากถ้ามีการทำแผนภาพสมดุลที่สมบูรณ์ ดังนั้นคณะนักวิจัยกลุ่มนี้ได้เล็งเห็นถึงประโยชน์ของการทำแผนภาพสมดุล จึงได้ศึกษาค้นคว้าและเริ่มทำแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O ขึ้นมา

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ขั้นที่ 1 การเตรียมผงสารและการอัดเม็ดสารตัวอย่าง

ทำการเตรียมสารตัวอย่างตามสูตรของ $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ เมื่อค่า x, y, z สามารถหาค่าจากแผนภาพสมดุลดังแสดงในรูปที่ 1.1 จะได้สารตัวอย่างทั้งหมด 36 สารดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยใช้ผงสารประกอบเริ่มต้นเป็นพวกของ Y_2O_3, BaO และ CuO ที่มีความบริสุทธิ์ 99.0% ผสมกันในสัดส่วนต่างๆ กันตามที่ต้องการ แล้วทำการบดคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดี จะสังเกตเห็นเป็นสีเดียวกันในครกหินอ่อน แล้วนำผงสารที่ได้ไปทำการชั่งให้ได้มวลของผงสารประมาณ 2 กรัม ไปทำการอัดเม็ดโดยใช้ความดัน 2 ตัน เป็นเวลานาน 3 นาที ผลได้เม็ดสารทั้งหมด 36 เม็ด มีลักษณะสี เส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนา และมวลสาร ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยที่สารตัวอย่างแต่ละเม็ดมีสีของเม็ดสารส่วนใหญ่เป็นสีดำเทา ยกเว้นเม็ดสารที่ 32 ถึง 36 มีสีขาวขุ่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 13.16 มิลลิเมตร ความหนาเฉลี่ย 4.65 มิลลิเมตร และมวลสารเฉลี่ย 1.9484 กรัม

ขั้นที่ 2 การเผาเม็ดสารและผลที่ได้จากการเผาเม็ดสารตัวอย่าง

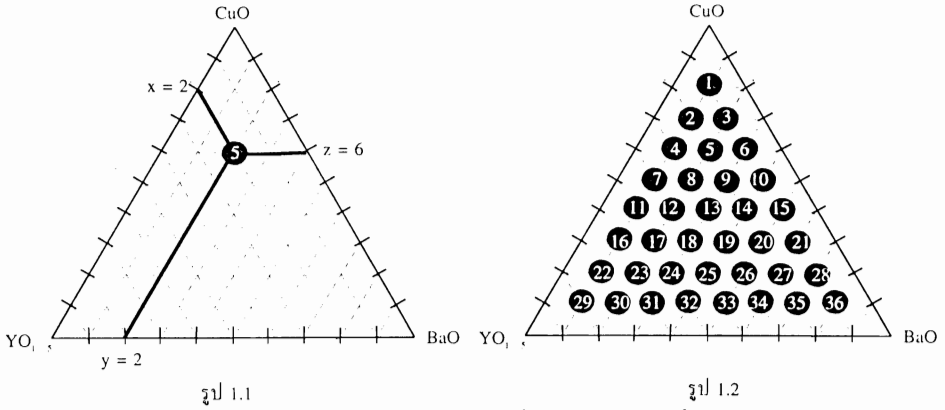
นำเม็ดสารทั้ง 36 เม็ด มาทำการเผาโดยใช้เตาที่สามารถทำการควบคุมได้ โดยการใช้โปรแกรมสั่งงานแบบมีขั้นตอนในการเผาสารแต่ละเม็ดดังนี้ ตอนแรกมีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องทดลองขึ้นทีละ 5° C ต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 950° C ส่วนตอนสองดำเนินการเผาเม็ดสารที่อุณหภูมิ 950° C อยู่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และในตอนสุดท้ายลดอุณหภูมิจาก 950° C ลงทีละ 5° C ต่อนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้องทดลองจึงสิ้นสุดกระบวนการเผา นำเม็ดสารที่ผ่านการเผามาสังเกตลักษณะของเม็ดสารซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ในตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. แสดงลักษณะเม็ดสารตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาเม็ดสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ ทั้งหมด 36 เม็ด แสดงสี เส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนา มวลสาร และผลของการแสดงปรากฏการณ์ไมสส์เนอร์ที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว สำหรับเม็ดสารที่ผ่านการเผาเม็ดที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมกับแสดงสัญลักษณ์ของเม็ดสารที่ได้หลังเผาไว้ทางด้านข้างของตาราง

	เม็ดที่	สัดส่วน	ลักษณะเม็ดสารก่อนเผา				ลักษณะเม็ดสารหลังเผา				การแสดง
		x , y , z	สี	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	หนา (มม.)	มวลสาร (กรัม)	สี	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	หนา (มม.)	มวลสาร (กรัม)	ไมสส์เนอร์ที่ N_2เหลว
○	1	118	ดำ	13.10	4.30	1.9209	ดำปนเขียว	11.90	4.10	1.4282	ไม่แสดง
○	2	217	ดำเทา	13.15	4.40	1.8608	ดำปนเขียว	10.15	3.10	0.6012	ไม่แสดง
△	3	127	ดำเทา	13.20	4.40	1.8482	เขียว	13.15	4.40	1.6699	ไม่แสดง
△	4	316	ดำเทา	13.15	4.30	1.9153	เขียว	13.10	4.30	1.7968	ไม่แสดง
○	5	226	ดำเทา	13.05	4.30	1.9283	ดำปนเขียวแววววาว	10.30	3.30	1.1722	แสดง
○	6	136	ดำเทา	13.00	4.30	1.9381	ดำปนเขียวแววววาว	10.50	3.20	1.0576	แสดง
△	7	415	ดำเทา	13.00	4.15	1.9036	เขียว	13.30	4.50	1.7407	ไม่แสดง
○	8	325	ดำเทา	13.00	4.20	1.9424	ดำปนเขียวแววววาว	12.95	4.40	1.7662	ไม่แสดง
○	9	235	เทาดำ	13.00	4.35	1.9971	ดำปนเขียวแววววาว	12.70	4.30	1.7758	แสดง
○	10	145	เทาดำ	13.00	4.40	1.9822	ดำปนเขียวแววววาว	12.15	4.10	1.6723	แสดง
△	11	514	เทาดำ	13.00	4.70	1.9061	เขียวปนดำจุดขาว	13.30	4.70	1.7473	ไม่แสดง
△	12	424	เทาดำ	13.00	4.65	1.9161	เขียวปนเทาดำ	13.12	4.65	1.6855	ไม่แสดง
○	13	334	เทาดำ	13.00	4.50	1.9231	ดำปนเขียวแววววาว	12.39	4.37	1.6413	แสดง
○	14	244	เทาดำ	13.00	4.50	1.9477	เทาดำเขียวไม่วาว	13.10	4.37	1.6443	แสดง
○	15	154	เทาดำ	13.60	4.30	1.9450	ดำปนเขียว	12.40	3.20	1.5196	ไม่แสดง
△	16	613	เทาดำ	13.15	4.30	1.9546	เขียว	13.50	4.30	1.8143	ไม่แสดง
△	17	523	เทาดำ	13.60	4.30	1.9512	เขียว	13.20	5.00	1.6539	ไม่แสดง
○	18	433	เทาดำ	13.10	4.40	1.9573	ดำปนเขียว	13.20	4.40	1.6439	ไม่แสดง
○	19	343	เทาดำ	13.50	5.00	1.8908	ดำปนเขียว	14.50	7.00	1.7254	ไม่แสดง
○	20	253	เทาดำ	13.50	7.00	1.9294	ดำปนเขียว	14.50	9.00	1.8125	ไม่แสดง
X	21	163	เทาดำ	13.50	5.00	1.8993	เทาดำหลอมเหลว	15.50	6.00	1.4089	ไม่แสดง
△	22	712	เทาดำ	13.50	4.90	1.9635	เขียว	13.10	4.90	1.8390	ไม่แสดง
△	23	622	เทาดำ	13.00	4.60	1.9660	เขียว	13.40	4.70	1.7846	ไม่แสดง
○	24	532	เทาดำ	13.10	4.80	1.9920	ดำปนเขียว	13.50	5.00	1.7897	ไม่แสดง
○	25	442	เทาดำ	13.00	4.90	1.9982	ดำปนเขียว	13.70	5.10	1.7900	ไม่แสดง
○	26	352	เทาดำ	13.00	4.70	2.0000	ดำปนเขียว	13.10	6.70	1.5932	ไม่แสดง
X	27	262	เทาดำ	13.00	4.90	2.0000	ดำหลอมเหลว	–	–	–	ไม่แสดง
X	28	172	เทาดำ	14.10	4.90	1.9050	ดำหลอมเหลว		–		ไม่แสดง

* (ยังมีต่ออีก)

	เม็ดที่	สัดส่วน x , y , z	ลักษณะเม็ดสารก่อนเผา				ลักษณะเม็ดสารหลังเผา				การแสดงไมสส์เนอร์ที่ N_2เหลว
			สี	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	หนา (มม.)	มวลสาร (กรัม)	สี	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	หนา (มม.)	มวลสาร (กรัม)	
△	29	811	เทาดำ	13.10	4.90	1.9076	เขียว	13.00	4.90	1.7351	ไม่แสดง
△	30	721	เทาดำ	13.10	5.10	1.9965	เขียวปนดำ	13.40	5.20	1.7733	ไม่แสดง
○	31	631	เทาดำ	13.10	4.80	1.9297	ดำปนเขียว	13.30	4.90	1.7103	ไม่แสดง
○	32	514	ขาวขุ่น	13.00	4.55	1.9971	ดำปนขาว	15.10	5.65	2.0850	ไม่แสดง
X	33	451	ขาวขุ่น	13.00	4.60	2.0071	ดำหลอมเหลว	–	–	–	ไม่แสดง
X	34	361	ขาวขุ่น	13.00	4.65	2.0298	ดำหลอมเหลว	–	–	–	ไม่แสดง
X	35	271	ขาวขุ่น	13.10	4.60	1.9993	ดำหลอมเหลว	–	–	–	ไม่แสดง
X	36	181	ขาวขุ่น	13.00	4.80	1.9950	ดำหลอมเหลว	–	–	–	ไม่แสดง



รูป 1.1 รูป 1.2

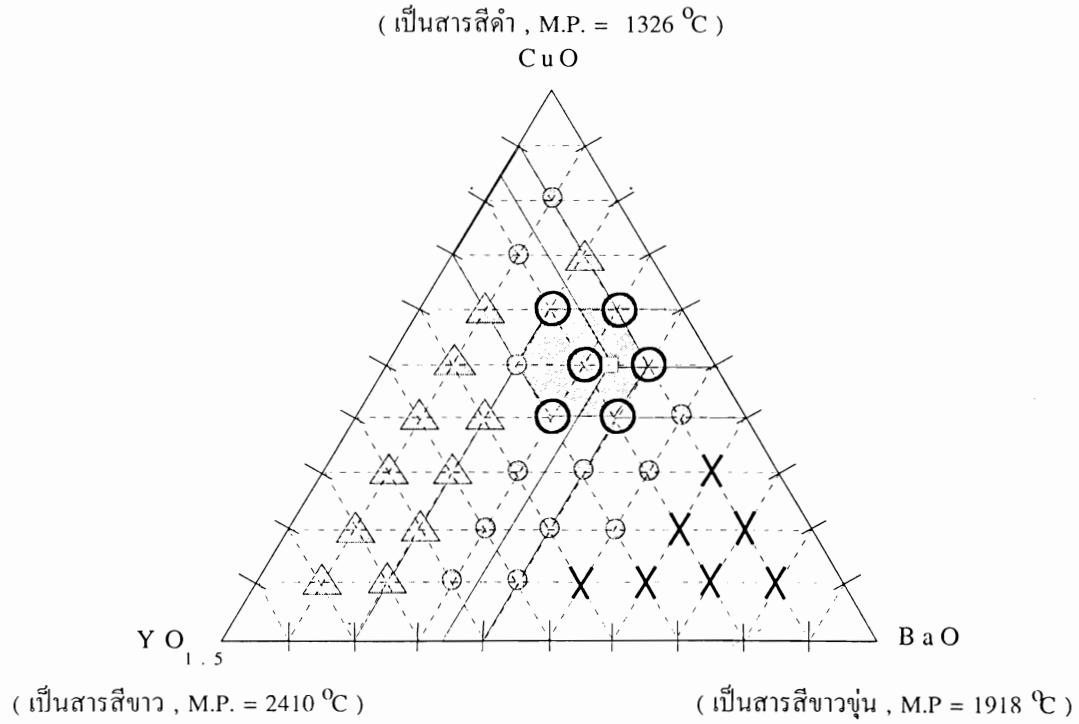
รูปที่ 1 แสดงแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O โดยที่รูป 1.1 เป็นรูปที่แสดงตัวอย่างการหาค่า x,y,z เพื่อใช้ในการเตรียมสารตัวอย่างเม็ดที่ 5 ซึ่งเป็นสารที่มีสูตร $(YO_{1.5})_2(BaO)_2(CuO)_6$ ส่วนรูป 1.2 แสดงจำนวนของสารตัวอย่างที่ต้องเตรียมทั้งหมด 36 เม็ด

จากตารางที่ 1 พบว่าลักษณะเม็ดสารตัวอย่างหลังเผาสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ซึ่งผลของแต่ละกลุ่มมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

กลุ่ม 1 <u>เม็ดสารตัวอย่างเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ใช้สัญลักษณ์ ○</u>

เม็ดสารตัวอย่างในกลุ่มนี้มี 6 เม็ดดังนี้ เม็ดสารที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14 มีตำแหน่งอยู่ในแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O ตามที่แสดงไว้ในรูป 2 ซึ่งสีของเม็ดสารส่วนใหญ่เป็นสีดำปนเขียวมีเกล็ดแววววาวกระจายทั่วเม็ด (ยกเว้นเม็ด 14 สีเทาดำปนเขียวไม่วาว) เส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดสารส่วนใหญ่มีค่าน้อยลง (ยกเว้นเม็ด 14 มีค่ามากขึ้นเล็กน้อย) ส่วนความหนากับมวลสารของเม็ดสารมีค่าน้อยลงทุกเม็ด และเม็ดสารในกลุ่มนี้มีความสามารถผลักแท่งแม่เหล็กเล็กๆ (Sm-Co) ให้ลอยตัวอยู่เหนือเม็ดสารได้ในขณะที่เม็ดสารเหล่านี้แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว

ดังนั้นถ้าต้องการเตรียมเม็ดสารตัวอย่างแล้ว ทำให้ได้เม็ดสารเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดภายหลังจากการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 ° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ควรที่จะต้องเตรียมสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ โดยที่มีค่า x,y,z เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้ $1 \le x \le 3$, $2 \le y \le 4$ และ $4 \le z \le 6$ (ยกเว้นเม็ดสารที่ 8)



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O เม็ดสารตัวอย่างทั้ง 36 เม็ด ที่ได้หลังเผาที่อุณหภูมิ 950° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการใช้สัญลักษณ์ต่างๆ ที่แสดงไว้ในรูปเป็นดังต่อไปนี้

○	เม็ดสารเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
◎	เม็ดสารเป็นสีดำปนเขียวแต่ไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว
△	เม็ดสารเป็นสีเขียวส่วนใหญ่และไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว
X	เม็ดสารมีการหลอมเหลวปรากฏให้เห็นชัดเจนและไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด
□	เป็นจุดที่มีสัดส่วนของสารเป็น $(YO_{1.5})_{1.65}(BaO)_{3.3}(CuO)_{4.95} = Y_1Ba_2Cu_3O_{6.5}$

M.P. คือ จุดหลอมเหลวของสาร

กลุ่มที่ 2 <u>เม็ดสารตัวอย่างเป็นสีดำปนเขียวแต่ไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ใช้สัญลักษณ์ ○</u>

เม็ดสารตัวอย่างในกลุ่มนี้มี 12 เม็ด ดังนี้ เม็ดสารที่ 1, 2, 8, 15, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 31 และ 32 มีตำแหน่งอยู่ในแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O ตามที่แสดงไว้ในรูป 2 ซึ่งมีสีดำปนเขียวทั้งหมด มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยลง 4 เม็ด (เม็ดที่ 1, 2, 8 และ15) มากขึ้น 8 เม็ด (เม็ดที่ 18, 19, 20, 24, 25, 26, 31 และ 32)ความหนาน้อยลง 3 เม็ด (เม็ดที่ 1, 2 และ 15) มากขึ้น 9 เม็ด (เม็ดที่ 8, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 31 และ 32) และส่วนใหญ่มีมวลสารลดลง (ยกเว้นเม็ดที่ 32)

กลุ่มที่ 3 <u>เม็ดสารตัวอย่างสีเขียวเป็นส่วนใหญ่และไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ใช้สัญลักษ์ △</u>

เม็ดสารตัวอย่างในกลุ่มนี้มี 11 เม็ด ดังนี้ เม็ดสารที่ 3, 4, 7, 11, 12, 16, 17, 22, 23, 29 และ 30 มีตำแหน่งอยู่ในแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O ตามที่แสดงไว้ในรูป 2 ซึ่งมีสีเขียวเป็นส่วนใหญ่ (ยกเว้นเม็ดที่ 11, 12 และ 30 ซึ่งจะมีสีเขียวปนดำให้เห็น) มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากขึ้น 6 เม็ด (เม็ดที่ 7, 11, 12, 16, 23 และ 30) ลดลง

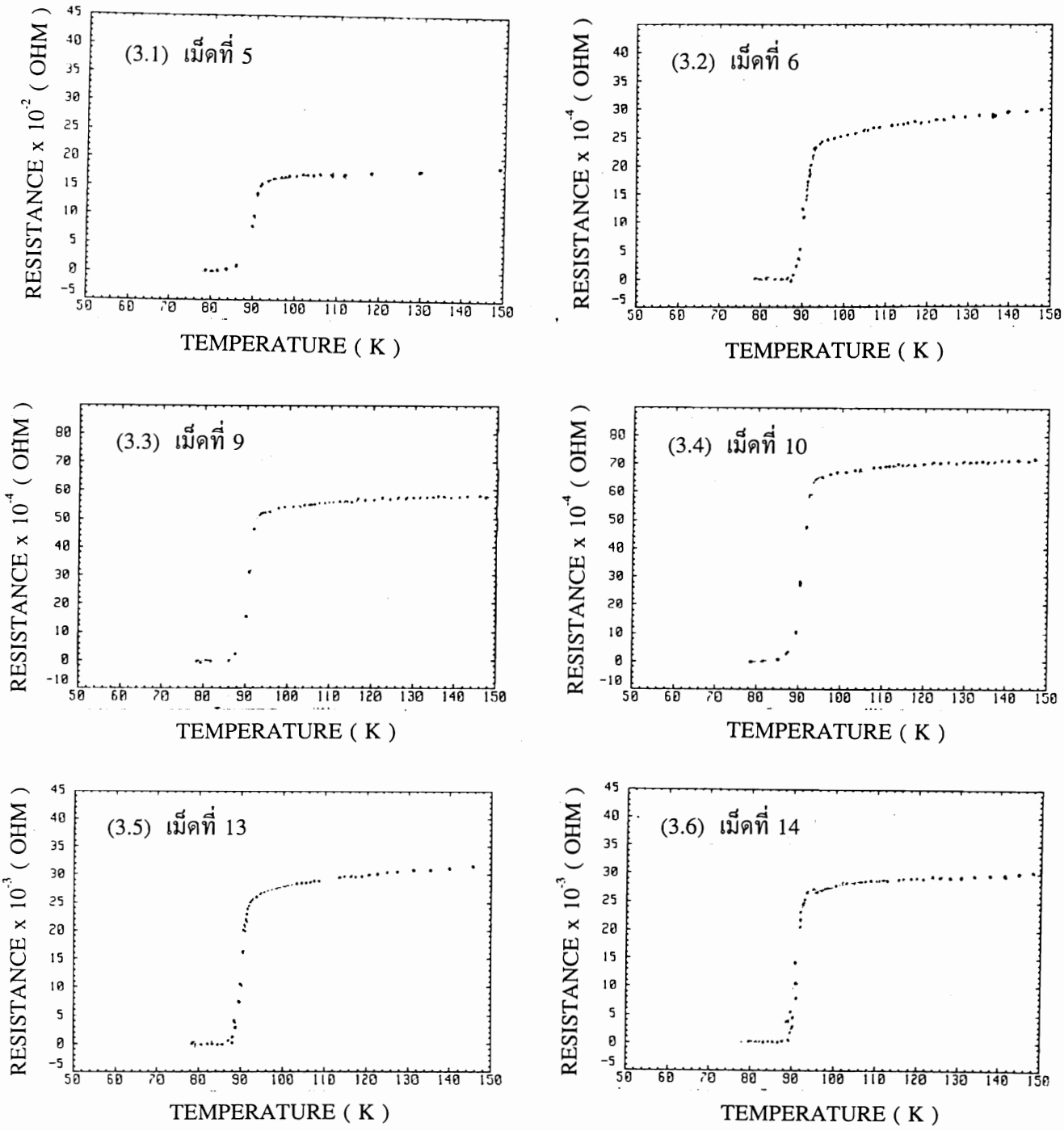
5 เม็ด(เม็ดที่ 3, 4, 17, 22 และ 29) ความหนาไม่เปลี่ยนแปลง 7 เม็ด (เม็ดที่ 3, 4, 11, 12, 16, 22 และ 29 มากขึ้น 4 เม็ด (เม็ดที่ 7, 17, 23 และ 30) และมีมวลสารลดลงทุกเม็ด จากการศึกษาสารในกลุ่ม 3 พบว่าภายในเม็ดสารมีสารสีเขียวเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งคาดคะเนว่าสารสีเขียวที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นสารพวก Y_2BaCuO_5 สารนี้สามารถก่อตัวเกิดขึ้นมามาก เมื่อมีการเตรียมเม็ดสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ ที่มีค่า x, y, z เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้ $1 \leq x \leq 8$, $1 \leq y \leq 2$ และ $1 \leq z \leq 7$ (ยกเว้นเม็ดสารที่ 2 กับ 8)

กลุ่มที่ 4 <u>เม็ดสารตัวอย่างมีการหลอมเหลวและไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ใช้สัญลักษณ์ **X**</u>

เม็ดสารตัวอย่างในกลุ่มนี้มี 7 เม็ด ดังนี้ เม็ดสารที่ 21, 27, 28, 33, 34, 35 และ มีตำแหน่งอยู่ในแผนภาพสมดุลของระบบ Y-Ba-Cu-O ตามที่แสดงไว้ในรูป 2 ซึ่งมีสีดำหลอมติดก้นภาชนะจนไม่สามารถทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนา และมวลสารได้ (ยกเว้นเม็ดที่ 21 มีลักษณะของการหลอมเหลวแต่สามารถแกะออกมาวัดได้) เมื่อศึกษาในกลุ่ม 4 ได้พบว่าเม็ดสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y\ (CuO)_z$ ที่มีค่า x, y, z เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้ $1 \leq x \leq 4$, $5 \leq y \leq 8$ และ $1 \leq z \leq 3$ เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 950 ° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีการหลอมเหลวติดภาชนะ (ยกเว้นเม็ดสารที่ 20 กับ 26) ซึ่งกลุ่มผู้ทดลองคาดคะเนว่าการหลอมเหลวของเม็ดสารในกลุ่มนี้ไม่ได้เกิดจากสารพวกออกไซด์ Y_2O_3 หรือ BaO หรือ CuO มีการหลอมเพราะ Y_2O_3 , BaO และ CuO มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2410 °C, 1918 °C และ 1326 °C ตามลำดับ แต่เป็นเพราะสารเริ่มต้นเหล่านี้มีการก่อปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction) ที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งมีค่าต่ำกว่า 950 °C ก่อนทำให้ได้สารใหม่ที่จุดหลอมเหลวต่ำกว่า 950 °C จึงทำให้เกิดการหลอมเหลวเกิดขึ้น

ขั้นที่ 3 ศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิและความสามารถยกแม่เหล็กของสารตัวอย่างในกลุ่ม 1

นำเม็ดสารตัวอย่างในกลุ่ม 1 จำนวน 6 เม็ดไปทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ โดยใช้เทคนิคขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว ดีซี (4-probe dc techniqe) ที่ควบคุมได้ด้วยคอมพิวเตอร์ มีการใช้ปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับสารตัวอย่าง 1 มิลลิ-แอมแปร์ ได้ผลออกมาเป็นกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิดังแสดงในรูป 3 เมื่อพิจารณากราฟในรูป 3 สามารถทำการหาค่า $T_{c(onset)}$ และ $T_{c(zero)}$ ของสารทุกเม็ดได้ ต่อมานำสารตัวอย่างทั้งหมดไปแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วนำแท่งแม่เหล็ก Sm-Co ที่มีมวล 0.0573 กรัม ไปวางเหนือเม็ดสาร แท่งแม่เหล็กสามารถลอยตัวอยู่เหนือผิวของเม็ดสารในระดับความสูงต่างๆ กันแสดงในตาราง 2 พบว่าเม็ดสารที่ 5 ถึง 14 มีค่า $T_{c(onset)}$ มากขึ้นแต่ $T_{c(zero)}$ มีการเปลี่ยนไม่เป็นระบบ



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของสาร $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ ที่เตรียมได้โดยการเผาที่อุณหภูมิ 950° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแสดงไว้ดังนี้

(3.1) เม็ดสารที่ 5 มีค่า x = 2, y = 2, z = 6
(3.2) เม็ดสารที่ 6 มีค่า x = 1, y = 3, z = 6
(3.3) เม็ดสารที่ 9 มีค่า x = 2, y = 3, z = 5
(3.4) เม็ดสารที่ 10 มีค่า x = 1, y = 4, z = 5
(3.5) เม็ดสารที่ 13 มีค่า x = 3, y = 3, z = 4
(3.6) เม็ดสารที่ 14 มีค่า x = 2, y = 4, z = 4

ตาราง 2 แสดงค่า $T_{c(onset)}$ และ $T_{c(zero)}$ ของสารตัวอย่างในกลุ่ม 1 (เม็ดที่ 5, 6, 9, 10, 13 และ 14) พร้อมทั้งแสดงความสูงของแท่งแม่เหล็ก Sm-Co ที่มีมวล 0.0573 กรัมลอยสูงขึ้นจากผิวของเม็ดสารตัวอย่างที่แช่ในไนโตรเจนเหลว

เม็ดที่	สัดส่วน x,y,z	ความสูงที่ยกแท่งแม่เหล็ก Sm-Co จากผิวสารที่แช่ใน N_2 เหลว(มม.)	อุณหภูมิวิกฤต [T_c] ($^\circ$ C)	
			อุณหภูมิที่ค่า R เริ่มลด	อุณหภูมิที่ค่า R=O
5	226	1	95	83
6	136	1	96	87
9	235	1.5	96	86
10	145	1.5	96	84
13	334	1	98	87
14	244	1.5	98	87

สรุปผลการทดลอง

ในการเตรียมเม็ดสารตัวอย่าง $(YO_{1.5})_x(BaO)_y(CuO)_z$ ตามสัดส่วนต่างๆ กัน 36 เม็ด เมื่อผ่านการเผาเม็ดที่อุณหภูมิ 950 $^\circ$C อยู่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถแบ่งเม็ดสารออกได้เป็น 4 กลุ่ม

กลุ่ม 1 เม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีลักษณะสีดำปนเขียวแวววาว เส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนาและมวลสารลดลงหลังจากผ่านการเผาเป็นส่วนใหญ่ สามารถยกแท่งแม่เหล็กเล็กๆ ได้ เม็ดสารที่ 5 ถึง 14 มีค่า $T_{c(onset)}$ มากขึ้นแต่ค่า $T_{c(zero)}$ มีการเปลี่ยนไม่เป็นระบบเม็ดสารในกลุ่มนี้พบว่ามีเงื่อนไขของสัดส่วนเป็น $1 \leq x \leq 3$, $2 \leq y \leq 4$ และ $4 \leq z \leq 6$ (ยกเว้นเม็ด 8)

กลุ่มที่ 2 เม็ดสารสีดำปนเขียวไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนามากขึ้น ส่วนมวลสารลดลงหลังจากผ่านการเผาเป็นส่วนใหญ่

กลุ่มที่ 3 เม็ดสารสีเขียวไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด เส้นผ่าศูนย์กลางมีทั้งมากขึ้นและลดลงคละกัน ความหนาไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นส่วนมาก ส่วนมวลสารลดลงทุกเม็ดหลังจากผ่านการเผา เม็ดสารในกลุ่มนี้พบว่ามีเงื่อนไขของสัดส่วนเป็น $1 \leq x \leq 8$, $1 \leq y \leq 2$, $1 \leq z \leq 7$ (ยกเว้นเม็ด 2, 8) ซึ่งสารสีเขียวที่เกิดขึ้นคาดคะเนว่าน่าจะเป็นสาร Y_2BaCuO_5

กลุ่มที่ 4 เม็ดสารมีการหลอมเหลวไม่แสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดทุกเม็ดหลังจากผ่านการเผา เม็ดสารในกลุ่มนี้พบว่ามีเงื่อนไขของสัดส่วนเป็น $1 \leq x \leq 4$, $5 \leq y \leq 8$ และ $1 \leq z \leq 3$ ซึ่งสารที่หลอมเหลวไม่ใช่ Y_2O_3, BaO, CuO แต่เป็นสารใหม่ที่เกิดจากสารเริ่มต้นเหล่านี้ทำปฏิกิริยาของแข็งกัน

เอกสารอ้างอิง

1. C.P. Poole Jr., T Datta and K.A. Farach (1988), Copper Oxide Superconductors., pp. 1-10.

2. J.B. Torrance, E.M. Engler, V.Y. Lee, A.I. Nazzal, Y. Tokura, M.L. Ramirez, J.E. Vazquez, R.D. Jacowitz, and P.M. Grant . (1987), Chemistry of High-Temperature Superconductors., pp 85-93.