



ผลการทดสอบตัวโคอิเล็กทริกชนิด เซรามิกส์และการวิเคราะห์ผล

5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวโคอิเล็กทริก

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของสเปคซิเมน ทางด้านการหดตัว ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5.1

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ของสารคิตาเนียมโคอิออกไซด์ และแบเรียมคิตาเนท แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ ในกราฟรูปที่ 5.1 ถึง 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ในเทอมของอุณหภูมิที่เผาเปรียบเทียบกันระหว่างสารโคอิเล็กทริกคิตาเนียมโคอิออกไซด์ กับแบเรียมคิตาเนท ในตาราง 5.4 แสดงผลของการวิเคราะห์ตรวจสอบของโคอิเล็กทริก ที่ได้จากต่างประเทศ และผลตรวจสอบของวัสดุที่ผลิตขึ้นเพื่อการศึกษา

5.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการหดตัว จากรูปกราฟที่ 5.1 พบว่า TiO_2 และ $Ba TiO_3$ มีการหดตัวในระหว่าง 15 - 18 % โดยการเผาที่อุณหภูมิค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวจะมีน้อย แต่การเผาที่อุณหภูมิสูง เปอร์เซ็นต์การหดตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากการเผาที่อุณหภูมิ $1,500^\circ C$ ยังไม่พบการเปลี่ยนสภาพ (deform) ของสเปคซิเมน อย่างไรก็ตามการหดตัวของ $Ba TiO_3$ เข้าสู่ค่าคงที่ แต่ TiO_2 ยังมีแนวโน้มที่จะหดตัวลงได้อีก ตัวอย่างการหดตัวของสเปคซิเมนโคอิเล็กทริกเซรามิกส์ แสดงไว้ในรูปในภาคผนวก b)

5.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความหนาแน่น จากรูปกราฟที่ 5.2 พบว่า TiO_2 มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิเผา $1,500^\circ C$ มี Bulk density ประมาณ 3.65 กรัม/ซม.^3 ในขณะที่ความหนาแน่นแท้จริง (true density) มีค่าเท่ากับ 4.00 กรัม/ซม.^3 (IEC - Pub - 672 - 3, 1984)

แต่ $Ba TiO_3$ มีความหนาแน่นสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปถึง $1,400^\circ C$ และเมื่ออุณหภูมิสูงไปกว่านั้น ค่าความหนาแน่นจะลดลง ทั้งที่อุณหภูมิเผา $1,400^\circ C$ มีค่าความหนาแน่น 4.825 กรัม/ซม.³ และที่อุณหภูมิเผา $1,500^\circ C$ ค่าความหนาแน่นลดลงเหลือ 4.702 กรัม/ซม.³ นั้นแสดงถึง $Ba TiO_3$ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสภาพของสเปคซิเมน

5.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความพรุนตัว รูปที่ 5.3 พบว่า TiO_2 มีความพรุนตัวน้อยลง เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น แสดงว่าสเปคซิเมนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติความหนาแน่น ดังที่กล่าวแล้ว สำหรับ $Ba TiO_3$ มีความพรุนต่ำสุด 2.81% ที่อุณหภูมิเผา $1,400^\circ C$ เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น ความพรุนจะเพิ่มขึ้นจากเดิม คือจากค่า 2.81% เป็น 7.965% แสดงว่าสเปคซิเมน เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสภาพที่ผลดังกล่าว สอดคล้องกับค่า ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวแล้ว

5.1.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมน้ำ รูปที่ 5.4 พบว่า TiO_2 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น ที่ค่าอุณหภูมิเผา $1,400^\circ C - 1,500^\circ C$ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลงจาก 3.7% เหลือ 2.09% แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น สำหรับ $Ba TiO_2$ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำจะลดลงเหลือประมาณ 0.06 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ $1,400^\circ C$ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปกว่านั้น กลับทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอีก พบว่าที่อุณหภูมิ $1,500^\circ$ ความดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับ 1.69%

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพอาจสรุปได้ว่า TiO_2 เมื่อเผาสูงถึง $1,500^\circ C$ ยังให้คุณสมบัติทางกายภาพต่ำกว่าคุณสมบัติที่คาดหวังว่าจะได้รับ เมื่อสารนั้นเผาถึงจุด Sintering Point. TiO_2 ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงถึง $1,500^\circ C$ ให้ความหนาแน่นเพียง 90% ของค่าความหนาแน่นที่แท้จริงของสารนั้น ค่าความพรุน 7.65% การดูดซึมน้ำ 2.09% การหดตัว 14.05% เท่านั้น ข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นการยืนยันว่า เรายังคงสามารถเผา TiO_2 ที่อุณหภูมิสูงไปกว่านี้ จึงจะให้คุณสมบัติตามที่ต้องการได้ กล่าวคือ มีความหนาแน่นเข้าใกล้ความหนาแน่นจริง (4.00 กรัม/ซม.³) มีการดูดซึมน้ำและความพรุนเข้าใกล้ศูนย์

สาร $BaTiO_3$ นั้น อุณหภูมิเผาผลาญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพต่างกับ TiO_2 กล่าวคือ การหดตัวและความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง ($1,400^\circ C$) คุณสมบัติดังกล่าวเริ่มมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางตรงกันข้าม เช่นเดียวกับความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ($1,400^\circ C$) และจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางตรงกันข้าม แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเกินกว่า $1,400^\circ C$ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสภาพเกิดขึ้น จากการพิจารณาข้อมูลต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว นี้ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม ในการเผา $BaTiO_3$ ที่ให้คุณสมบัติตรงตามต้องการเหมือนของ TiO_2 ต้องทำการเผาในช่วงอุณหภูมิ $1,350^\circ C - 1,400^\circ C$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของคิตาเนียมไดออกไซด์ และแบริยมคิตาเนต ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

คุณสมบัติทางกายภาพของสเปคซิเบ						
ลำดับที่	วัสดุ	อุณหภูมิเผา	การหดตัว	ความหนาแน่น	ความพรุน	การดูดซึมน้ำ
		c/hr	%	ρ / cm^3	%	%
1	คิตาเนียมไดออกไซด์	1,000/4	-	-	-	-
		1,200/4	5.75	2.64	26.23	9.01
		1,300/4	10.68	3.201	19.45	6.07
		1,400/4	13.21	3.502	12.97	3.70
		1,500/4	14.05	3.565	4.71	1.29
2	แบริยมคิตาเนต	1,000/4	-	-	-	-
		1,250/4	12.55	4.800	7.91	1.64
		1,300/4	13.32	4.962	4.70	0.3

ตารางที่ 5.1 การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ของ คีตาเนี่ยมไฮดรอกไซด์

อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ขนาดของลูป (มม.)				น้ำหนักลูป (กรัม)			% ความหนาแน่น	% ความพรุน	การหดตัว (Shrinkage) ม.ม.		% การดูดน้ำ
	ความหนา (มม.)		เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)		m_o	m_h	m_w			ความยาว d	ความหนา	
	A	A'	OD/A	OD/A'				$\frac{m_o \times \rho_w}{m_h - m_w}$	$\frac{m_h - m_o \times 100}{m_h - m_w}$			$\frac{OD/A - OD/A' \times 100}{OD/A}$
1,300°C	3.5	3.3	80.05	71.50	39.40	41.76	29.52	3.218	19.28	10.68	5.71	5.98
	3.5	3.3	80.05	71.50	39.40	41.93	29.52	3.182	19.66	10.68	5.71	6.17
	3.5	3.3	80.08	71.50	39.40	ค่าเฉลี่ย	26.28	3.203	19.43	10.68	5.71	6.06
1,400°C	3.5	3.2	80.05	69.4	39.46	40.87	29.65	3.516	12.56	13.30	8.57	3.57
	3.5	3.2	80.05	69.5	39.42	40.92	29.65	3.497	13.30	13.17	8.57	3.80
	3.5	3.2	80.05	69.5	36.63	ค่าเฉลี่ย	40.08	29.03	3.495	13.12	13.17	8.57
1,500°C	3.5	3.0	80.05	68.8	39.48	40.42	29.63	3.658	8.71	14.05	14.28	2.38
	3.5	3.0	80.05	68.8	39.50	40.46	29.60	3.637	8.83	14.05	14.28	2.43
	3.5	3.0	80.05	68.8	39.58	40.43	29.67	3.673	8.36	14.05	14.28	2.27
	3.5	3.0	80.05	68.8	39.59	ค่าเฉลี่ย	40.10	29.28	3.656	4.71	14.05	14.28
หมายเหตุ	<input type="radio"/> ปริมาตรก่อนเผา <input type="radio"/> ปริมาตรหลังการเผา				m_o = น้ำหนักลูปเคีตาเนี่ยมแห้ง m_h = น้ำหนักลูปเคีตาเนี่ยมซึ่งดูดน้ำ m_w = น้ำหนักลูปเคีตาเนี่ยมซึ่งในน้ำ	OD/A = ขนาดความยาวหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง ลูปเคีตาเนี่ยมก่อนการเผา OD/A' = ขนาดความยาวหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง ลูปเคีตาเนี่ยมหลังการเผา	T/A = ความหนาหน้าผกเผา T/A' = ความหนาหน้าผกเผา					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.3 การทดสอบแรงดึงของเส้นใยทางยาว ของ เมลามีนคอลลอยด์

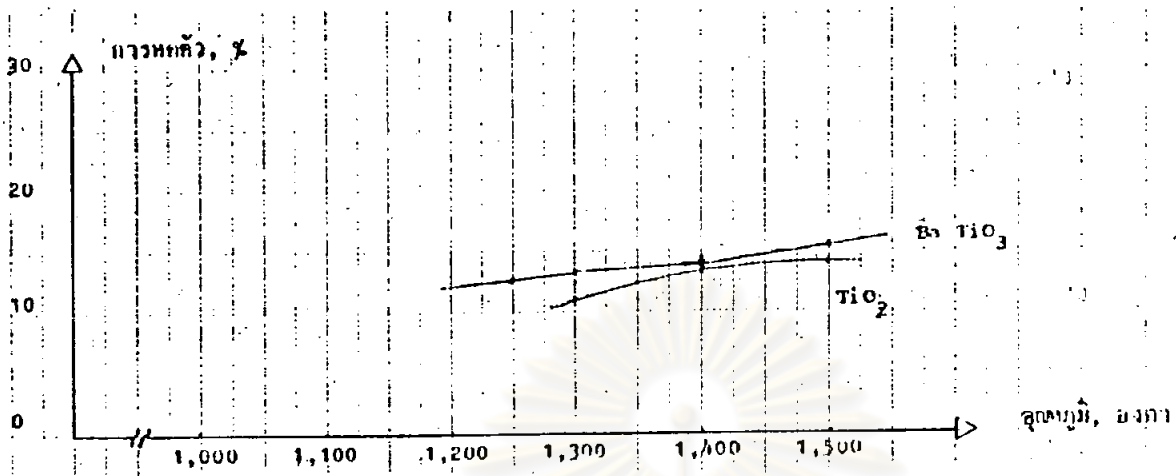
อุณหภูมิการเผาลงงาน (องศาเซลเซียส)	ขนาดของเส้นใย (มม.)				น้ำหนักเส้นใย (กรัม)			% ความหนาแน่น	% ความยาว	การหดตัว (Shrinkage) ม.ม.		% การหดตัว
	ความหนา (มม.)		เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)		m_o	m_h	m_w	$\frac{m_o \times w \times 100}{m_h - m_w}$	$\frac{m_h - m_o \times 100}{m_h - m_w}$	ความยาวยาว ϕ	ความยาวเบา	$\frac{m_h - m_o \times 100}{m_o}$
	A	A'	OD/A	OD/A'				$\frac{OD/A - OD/A' \times 100}{OD/A}$	$\frac{T/A - T/A' \times 100}{T/A}$			
1,250 °C	2.98	2.52	80.05	70	36.16	36.64	29.10	4.795	6.36	12.55	15.43	1.32
	2.90	2.50	80.05	70	45.19	46.07	36.60	4.77	9.29	12.55	13.79	1.94
	2.90	2.50	80.05	70	44.57	45.30	36.03	4.807	7.87	12.55	13.79	1.63
	2.90	2.50	80.05	70	44.40	45.17	35.95	4.805	8.33	12.55	13.79	1.72
	2.98	2.52	80.05	70	44.98	45.70	36.38	4.826	7.72	12.55	15.43	1.60
					ค่าเฉลี่ย			4.800	7.91	12.55	14.46	1.64
1,300 °C	3.8	3.3	80.05	69	35.97	36.43	29.05	4.873	6.23	13.80	13.15	1.27
	3.8	3.3	80.05	69.5	45.06	45.42	36.36	4.973	3.97	13.17	13.15	0.07
	3.8	3.3	80.05	69.5	44.87	45.31	36.27	4.963	4.86	13.17	13.15	0.09
	3.8	3.3	80.05	69.5	63.06	63.53	51.02	5.040	3.75	13.17	13.15	0.074
					ค่าเฉลี่ย			4.962	4.70	13.32	13.15	0.3
หมายเหตุ	<input type="radio"/> ปริมาณเส้นใย <input checked="" type="radio"/> ปริมาณหลังการเผา		m_o = น้ำหนักเส้นใยแห้ง m_h = น้ำหนักเส้นใยแห้ง m_w = น้ำหนักเส้นใยชื้น	OD/A = ขนาดความยาวหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง เส้นใยก่อนการเผา OD/A = ขนาดความยาวหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง เส้นใยหลังการเผา	T/A = ความยาวก่อนการเผา T/A = ความยาวหลังการเผา							

ตารางที่ 5-9 (ต่อ) การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ของ ผนังคอนกรีต

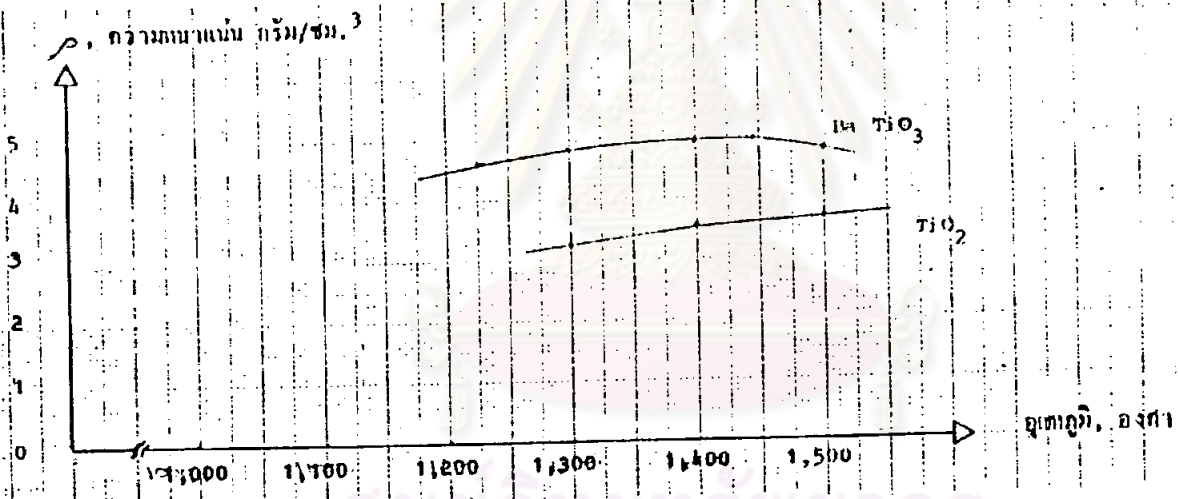
อุณหภูมิการเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)	ขนาดของลูปคอนกรีต (มม.)				น้ำหนักลูปคอนกรีต (กรัม)			% ความหนาแน่น	% ความชื้น	% การหดตัว (Shrinkage) ม.ม.		% การยุบตัว
	ความหนา (มม.)		เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)		m_o	m_h	m_w	$m_o \times w \times 100$	$m_h - m_o \times 100$	ตามความยาว ϕ	ตามความหนา	$\frac{m_h - m_o}{m_o} \times 100$
	A	A'	OD/A	OD/A'				$\frac{m_h - m_w}{m_o}$	$\frac{m_h - m_w}{m_o}$	$\frac{OD/A - OD/A'}{OD/A} \times 100$	$\frac{T/A - T/A'}{T/A} \times 100$	
1,400 °C	3.55	3.4	80.05	69	58.02	58.40	46.42	4.843	3.17	13.80	4.22	0.065
	3.55	3.4	80.05	69	30.66	30.86	24.42	4.760	3.10	13.80	4.22	0.065
	3.55	3.3	80.05	69	58.59	56.85	46.83	4.874	2.16	13.80	7.04	0.044
						ค่าเฉลี่ย		4.825	2.81	13.80	5.16	0.058
1,500 °C	4.00	3.25	80.05	67.8	51.12	51.80	41.07	4.764	6.33	15.30	18.75	1.33
	4.00	3.25	80.05	67.8	50.82	51.60	40.85	4.727	7.25	15.30	16.75	1.53
	3.95	3.20	80.05	67.8	47.89	49.00	38.67	4.636	10.74	15.30	16.98	2.31
	3.95	3.20	80.05	67.8	37.23	37.83	29.88	4.683	7.54	15.30	18.98	1.61
						ค่าเฉลี่ย		4.702	7.965	15.30	18.86	1.69



หมายเหตุ:
 ปริมาณก่อนเผา m_o = น้ำหนักลูปคอนกรีตซึ่งจะแห้ง OD/A = ขนาดความยาวหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง ลูปคอนกรีตก่อนการเผา T/A = ความหนาก่อนเผา
 ปริมาณหลังการเผา m_h = น้ำหนักลูปคอนกรีตซึ่งจะแห้งมีน้ำ OD/A' = ขนาดความยาวหรือเส้นผ่าศูนย์กลางลูปคอนกรีตหลังการเผา T/A' = ความหนาหลังเผา
 m_w = น้ำหนักลูปคอนกรีตซึ่งมีน้ำ



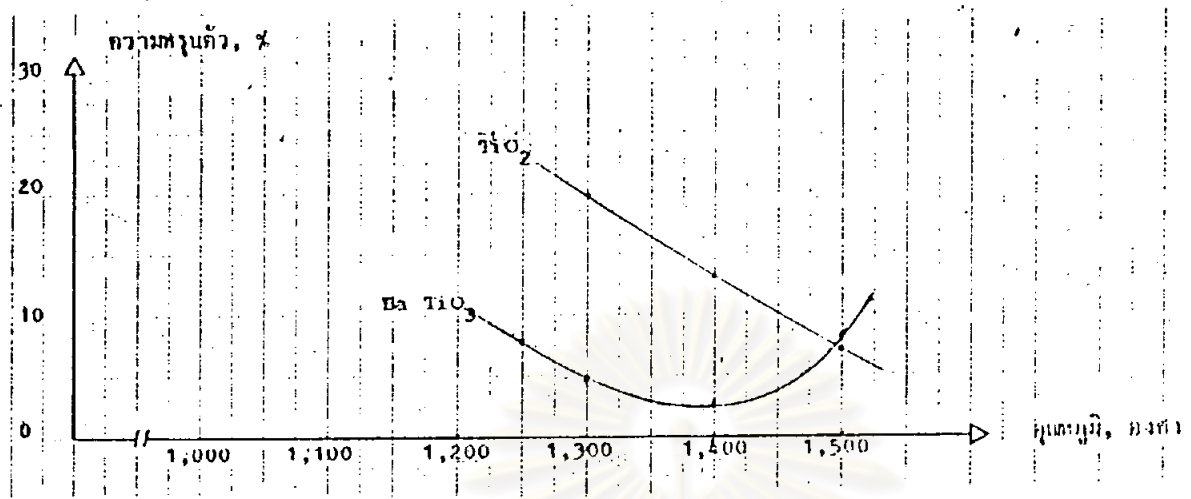
รูปที่ 5.1 แสดงผลการหดตัวของสเปกซิเมนของสาร TiO_2 และ BaTiO_3 ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ



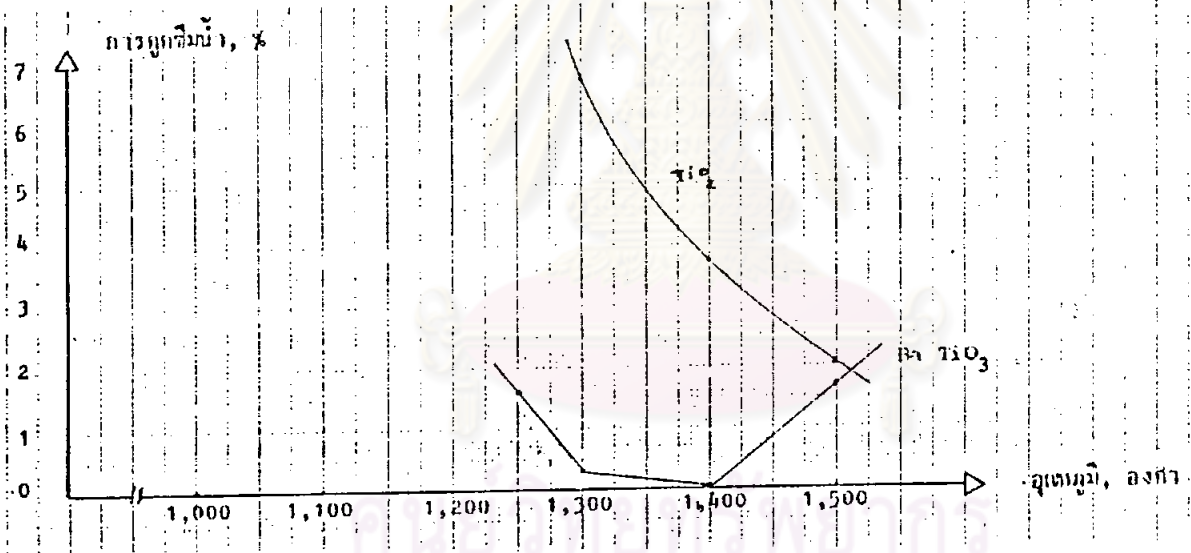
รูปที่ 5.2 แสดงค่าความหนาแน่นของสเปกซิเมนของสาร TiO_2 และ

BaTiO_3 ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 แสดงผลความหดตัวของสเปกซิเมนของสาร TiO_2 และ $BaTiO_3$ ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ



รูปที่ 5.4 แสดงผลการถูกซึมน้ำของสเปกซิเมนของสาร TiO_2 และ $BaTiO_3$ ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ

5.1.5 ผลการตรวจเฟส การตรวจเฟสของวัตถุตัวอย่างจากต่างประเทศ และวัตถุที่ทำขึ้น แสดงในตารางที่ 5.4 และเฟสโคอะแกรมในรูปที่ 5.5 และ 5.6 ให้ผลการวิเคราะห์ คือ

ตัวอย่างจากสหรัฐอเมริกา เมื่อตรวจดูเฟสแล้วพบว่า เป็นวัสดุที่บริสุทธิ์ TiO_2 มีโครงสร้างเป็น Rutile หรือเฟสที่มีอุณหภูมิสูงของ TiO_2 จากรูปที่ 5.4 จากรูปพบว่า ปราศจากเฟสที่ไม่ต้องการ

ตัวอย่างจากประเทศญี่ปุ่น เมื่อตรวจดูเฟสพบว่า เป็นวัสดุที่มี 2 เฟส เฟสที่มีปริมาณมาก คือ Rutile - s.s. (s.s. = Solid Solution) ส่วนเฟสที่มีปริมาณน้อย คือ Ti_3O_5 - s.s

จากเฟสโคอะแกรม อัตราส่วนระหว่าง Ti : TiO_2 รูป A 1 ในภาคผนวก A จะพบว่า TiO_2 มี 2 เฟส คือ เฟสที่อุณหภูมิต่ำ (Anatase) และเฟสที่อุณหภูมิสูง (Rutile) โดยเฟสที่อุณหภูมิต่ำจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสที่อุณหภูมิสูง ได้ที่อุณหภูมิประมาณ $700^\circ C$ และเฟสอุณหภูมิสูง (Rutile) จะคงสภาพอยู่ได้จนถึงอุณหภูมิประมาณ $1,870^\circ C$ แล้วจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นของเหลว

ตัวอย่างจากสหรัฐอเมริกา ผ่านการเผาจนกระทั่งได้เฟสที่อุณหภูมิสูง เป็นเฟสเดียว ตัวอย่างนั้นจะต้องมี O : Ti สูงกว่า 1.90 นับว่าเป็นตัวอย่างที่มีอัตราส่วน O : Ti เข้าใกล้สูตรของ TiO_2 มาก ๆ เมื่อเทียบกับตัวอย่างจากประเทศญี่ปุ่น

ตัวอย่างของญี่ปุ่นมี Ti_3O_5 เป็นเฟสแปลกปลอม ดูจากโคอะแกรมนี้ ตัวอย่างของญี่ปุ่นมี O : Ti ต่ำกว่า 1.80 นับว่าห่างจากสูตร TiO_2 มาก

ตัวอย่างที่ทำขึ้น รูปที่ 5.5 พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิ $1,000^\circ C$ เฟสที่พบประกอบด้วย TiO_2 (Anatase) เป็นส่วนใหญ่ ส่วน Rutile นั้นพบปริมาณน้อยมาก เฟสที่แปลกปลอมอื่นไม่มี เมื่อเทียบกับ เฟสโคอะแกรม ในรูป A1 ในภาคผนวก A จะมี 2 เฟสก็ต่อเมื่อ สารนั้นมีส่วนประกอบอยู่ในพื้นที่ที่มี 2 เฟสรวมกันที่อุณหภูมิสูงประมาณ $750^\circ C - 820^\circ C$ เท่านั้น

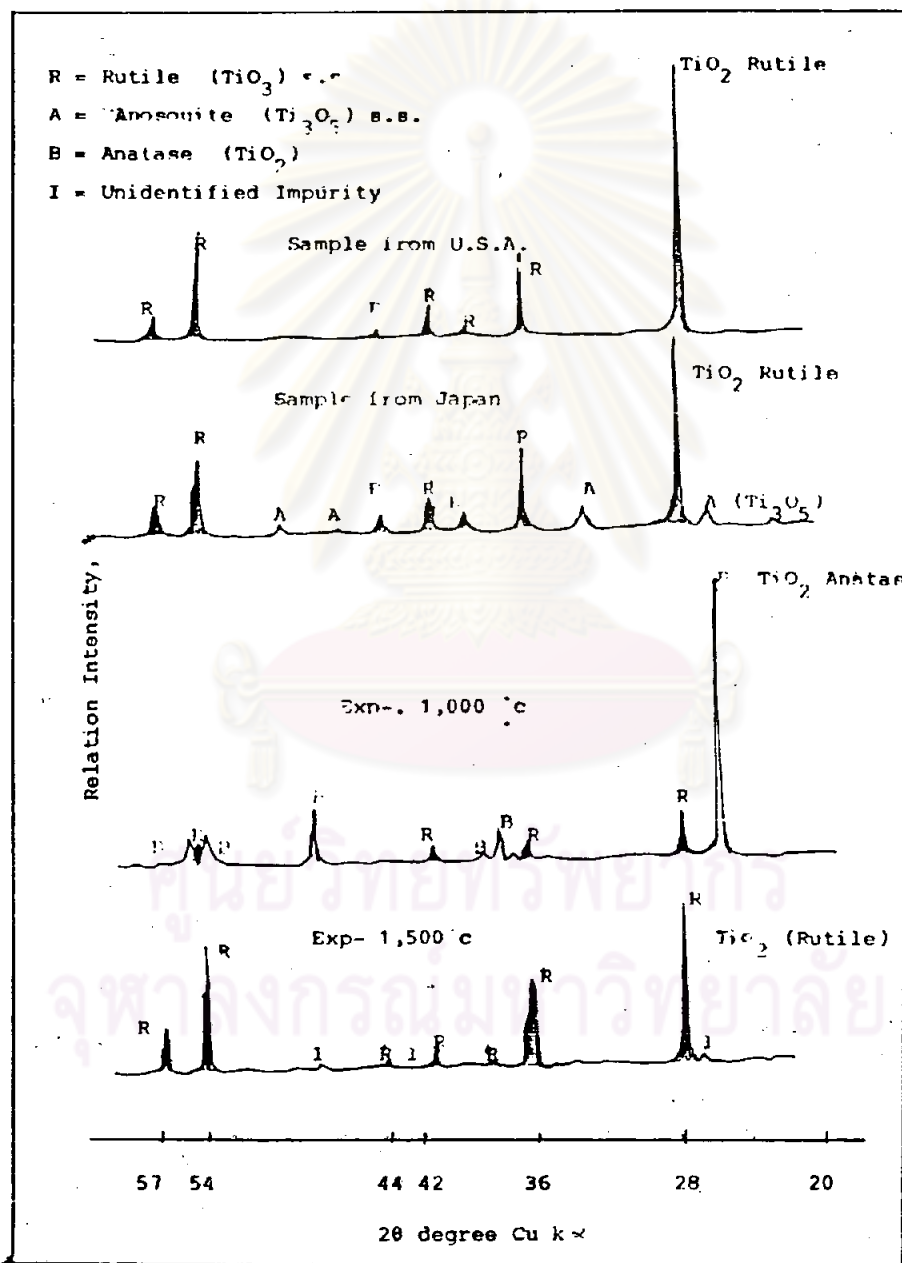
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการตรวจ Phase ของวัสดุ

Type of Materials	Heat - Treatment °c / hr	Phase Present	
		Major Phase	Minor Phase
วัสดุตัวอย่างจาก U.S.A.	-	TiO ₂ (Rutile)	
วัสดุตัวอย่างจาก Japan	-	TiO ₂ - s.s. (Rutile)	Ti ₃ O ₅ - s.s.
วัสดุตัวอย่างจาก France	-	Sr (Fe) TiO ₃ - s.s.	
วัสดุที่ผลิตขึ้น TiO ₂	1,000/4	TiO ₂ - s.s. (Anatase)	TiO ₂ - s.s. (Rutile)
	1,500/4	TiO ₂ - s.s. (Rutile)	Unidentified Impurity
วัสดุที่ผลิต Ba TiO ₃	1,000/4	Ba TiO ₃	-
	1,250/4	Ba TiO ₃	-
	1,300/4	Ba TiO ₃	-

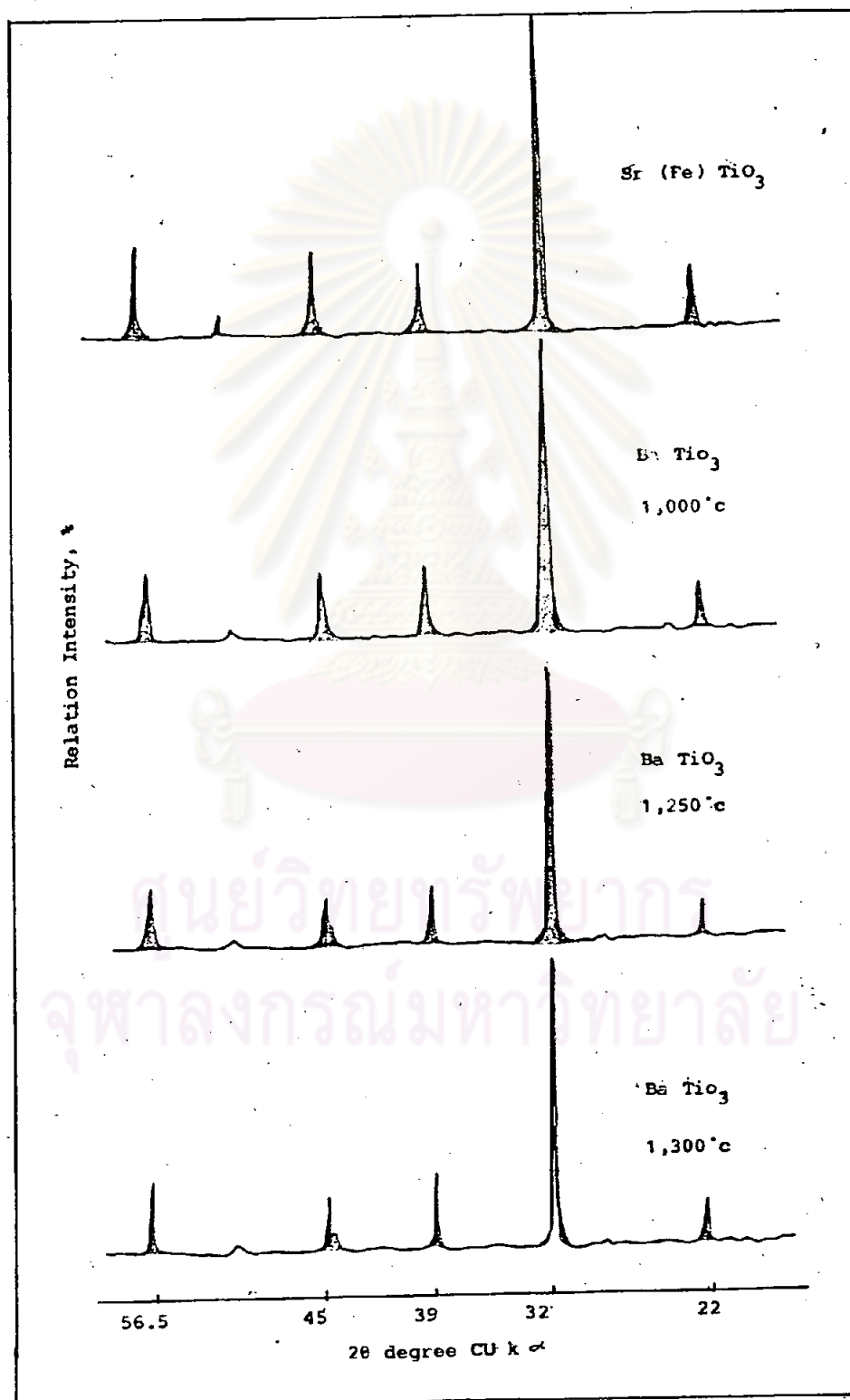


หมายเหตุ S.S. = Solid Solution

รูปที่ 5.5 แสดงผล Diffractograms ของ TiO_2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างจาก U.S.A. และ Japan



รูปที่ 5.6 แสดงผล Diffractograms ของ $BaTiO_3$ ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ
เปรียบเทียบกับตัวอย่าง $Sr(Fe)TiO_3$ จากฝรั่งเศส



และมี $O : Ti$ เกินกว่า 1.90 แสดงว่าตัวอย่างทำขึ้นโดยผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1,000 °C นี้ มีส่วนประกอบเข้าใกล้สูตร TiO_2 มาก แต่อุณหภูมิที่เผาอาจต่ำกว่า 1,000 °C มีสาเหตุเกิดในกระบวนการเผา และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาไปเป็น 1,500 °C รูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่า TiO_2 (Anatase) ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็น Rutile จนหมด แต่กลับพบว่า ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมีสิ่งแปลกปลอมปนเข้ามา ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก สิ่งแปลกปลอมนี้ไม่ใช่ Ti_3O_5 เหมือนกับตัวอย่างของญี่ปุ่น และไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เป็นสิ่งแปลกปลอมมาจากสารใด เพราะยอด (Peak) ที่ปรากฏมีเพียง 2 - 3 ยอด และมีความเข้มต่ำมาก แสดงว่าสิ่งแปลกปลอมที่น่าจะปะปนเข้ามาในระหว่างผ่านกระบวนการผลิต

สรุปผลการตรวจเฟส ของวัตถุที่เตรียมขึ้นนี้ ได้เฟสเหมือนกับวัสดุของสหรัฐอเมริกา ถ้าไม่มีสิ่งแปลกปลอมในระหว่างกระบวนการผลิต

ตัวอย่างจากฝรั่งเศสวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์* ประกอบด้วยธาตุสตรอนเทียม (Sr) เหล็ก (Fe) และทิตาเนียม (Ti) และจากผลวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ รูปที่ 5.6 เพื่อประกอบการพิจารณาจึงสรุปผลได้ว่า วัสดุนี้เป็นสตรอนเทียมทิตาเนต ($Sr TiO_3$) ที่มีเหล็กละลายอยู่ในรูปของแข็ง Solid Solution = (s.s) อาจเขียนแทนได้ด้วยสูตร $Sr (Fe) TiO_3$

ตัวอย่างจากวัสดุที่เตรียมขึ้น เพื่อให้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับวัสดุตัวอย่างจากฝรั่งเศส ได้เลือกใช้แบเรียมทิตาเนต ($Ba TiO_3$) เพราะแบเรียมทิตาเนต เป็นต้นตระกูลของสาร $Sr (Fe) TiO_3$

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ทำขึ้น เมื่อผ่านกระบวนการแคลไซน์ที่ 1,000 °C ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 5.5 พบว่าประกอบด้วยเฟส เพียงเฟสเดียว คือแบเรียมทิตาเนต เช่นเดียวกับในตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C และ 1,300 °C

เมื่อเปรียบเทียบ x - Ray แพทเทอน จากรูปที่ 5.6 จะพบว่าที่อุณหภูมิสูง ยอดที่แคบจับกลุ่มเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกที่ 20 เท่ากับ 22 และ 24 องศา กลุ่มที่สองที่

* x - Ray Fluorescent ทำการวิเคราะห์โดยภาควิชานิวเคลียร์ เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

20 เท่ากับ 44.8 และ 45.7 องศา และกลุ่มที่สามที่ 20 เท่ากับ 55.8 และ 56 องศา จะเริ่มแยกตัวออกจากกันให้เห็นชัดเจนดังรูปที่ 5.6 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C และ 1,300 °C เป็นต้น แสดงให้เห็นถึงผลึกของแบเรียมทิตาเนต ที่เกิดจากปฏิกิริยา Solid state reaction ระหว่าง $BaCO_3$ and TiO_2 สมบูรณ์ขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

5.1.6 ผลการตรวจโครงสร้างโคอิเล็กทริกต่างประเทศ

จากผลการศึกษาจุลโครงสร้างด้วยเครื่องสแกนนิ่ง อีเล็กโทรไมโครสโคป (SEM.) ของตัวอย่างจากต่างประเทศรูปที่ 5.7 เป็นตัวอย่างจากอเมริกา โดยการถ่ายภาพผิวของวัสดุที่พบแตก จะเห็นว่าเนื้อของโคอิเล็กทริกยังมีความพรุนตัวอยู่ กระจุกกระจาย สามารถดูได้จากรูโพรงซึ่งมีขนาดประมาณ 2 - 3 ไมครอน แต่สภาพของเกรนหรืออนุภาคได้เชื่อมต่อกันแล้วระหว่างเกรนต่อเกรน แสดงว่าวัสดุนี้ผ่านการเผาจนถึงจุด ซินเทอริง (Sintering) ของเนื้อวัสดุแล้ว โดยมีขนาดของเกรนโตประมาณ 3 - 5 ไมครอน

ตัวอย่างจากประเทศญี่ปุ่น รูปที่ 5.8 (a,b) จะเห็นความพรุนตัว และมีขนาดเกรนขนาดเดียวกับของอเมริกา เกรนโดยทั่วไปผ่านการซินเทอริง ที่จุดซินเทอริง เช่นเดียวกับของอเมริกา ในรูป 5.8 a แสดงให้เห็นถึงโพรงอากาศขนาดใหญ่ ที่มีปะปนอยู่ในเนื้อของโคอิเล็กทริก สังเกตได้จากสภาพเกรนที่แยกเป็นชั้นมีความลึกไม่เท่ากัน

ตัวอย่างจากฝรั่งเศส รูปที่ 5.9 ลักษณะเกรนค่อนข้างละเอียด และมีรูพรุนหรือโพรงอากาศเช่นเดียวกับของญี่ปุ่น และอเมริกา ขนาดของเกรนเล็กและละเอียดกว่าจับตัวกันเป็นเนื้อเดียวกันเกือบหมด แสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นสูงมาก

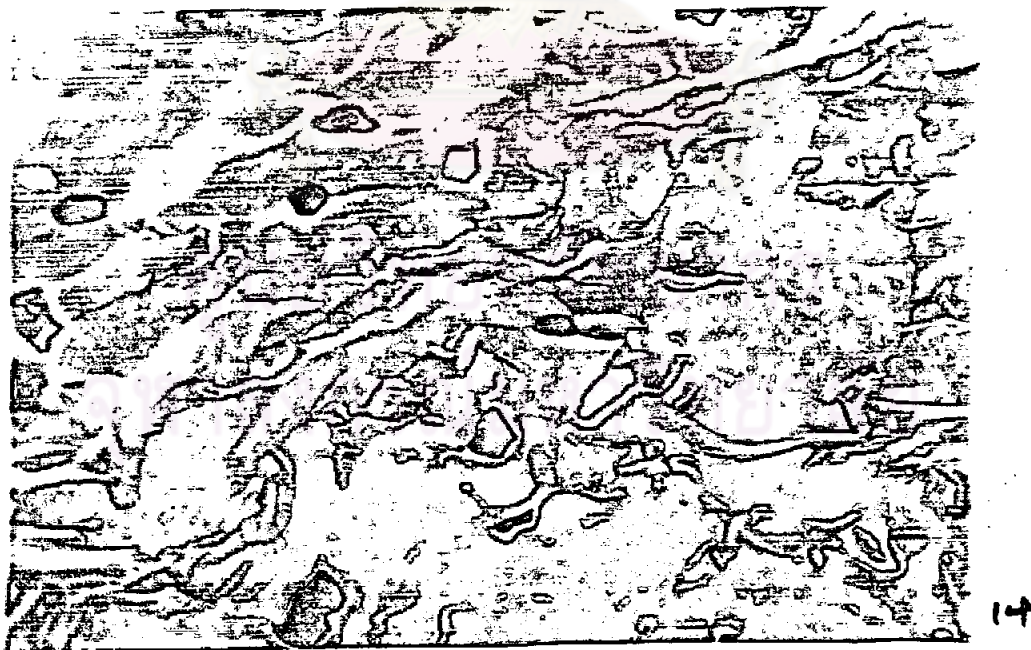
5.1.7 ผลการตรวจโครงสร้างโคอิเล็กทริกที่ทำขึ้น

ตัวอย่างทิตาเนียมออกไซด์ (TiO_2) ที่เตรียมขึ้นมาเพื่อศึกษาแสดงในรูปที่ 5.10 a,b ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1,400 °C และ 1,500 °C ตามลำดับ พบว่าการซินเทอริงยังไม่สมบูรณ์ ดูได้จากเส้นระหว่างเกรน (boundary) ยังปรากฏให้เห็นชัดเจน และมีขนาดเกรนไม่สม่ำเสมอ ใหญ่และเล็กปนกัน จากรูปแสดงให้เห็นว่าวัสดุนี้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดซินเทอริง ซึ่งให้ผลตรงกันกับการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

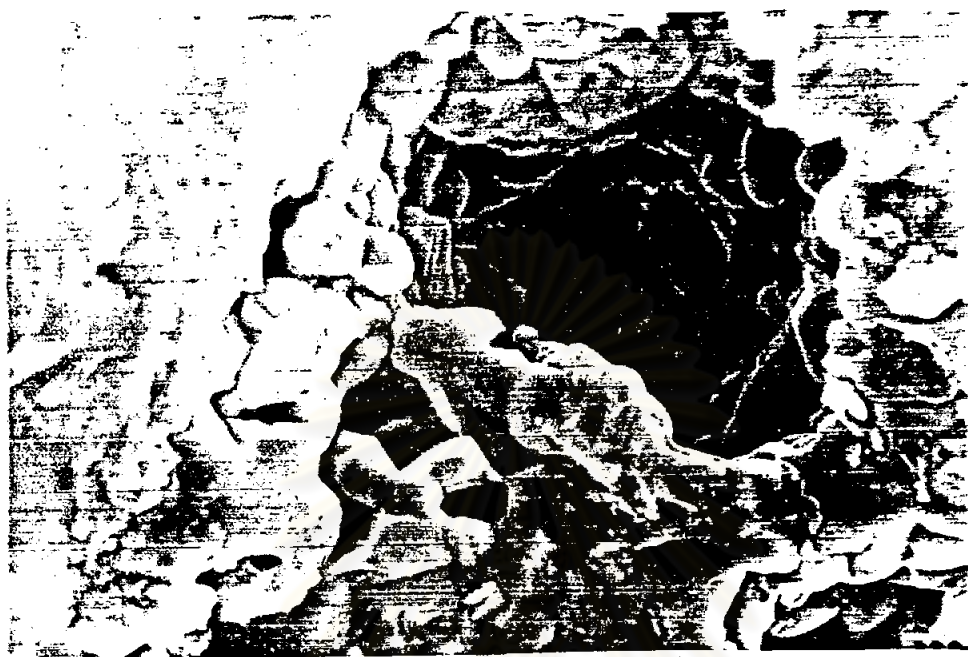
ภาพจุลโครงสร้างของสารแบบเรียมิตาเนต แสดงในรูป 5.11 a, b ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ และ $1,300^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า วัสดุนี้ผ่านการขึ้นเทอริง แล้ว ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิตั้งกล่าว สังกะสีจากเกรนที่เชื่อมติดกัน แต่วัสดุนี้ยังมีความพรุนตัวมากที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ และดีขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ $1,300^{\circ}\text{C}$ ซึ่งตรงกับข้อมูลที่ได้ศึกษาคูสมบัติทางกายภาพ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.7 แสดงจุลโครงสร้างของ TiO_2 (Rutile)
ตัวอย่างจากประเทศสหรัฐอเมริกา ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า



b

a)



b

b)

รูปที่ 5.8 แสดงจุลโครงสร้างของ TiO_2 (Rutile)
จากตัวอย่างของประเทศญี่ปุ่น ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

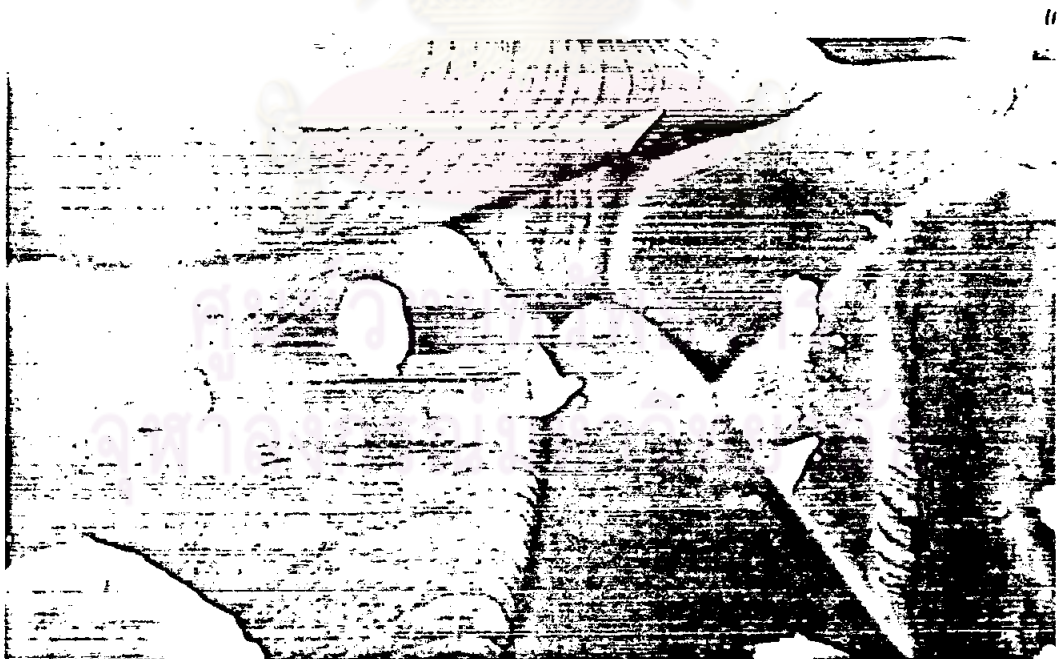


รูปที่ 5.9 แสดงจุลโครงสร้างของ $\text{Sr}(\text{Fe})\text{TiO}_3$
จากตัวอย่างของประเทศฝรั่งเศส ถ่ายด้วยเครื่อง SEM. กำลังขยาย 3,500 เท่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a) เฝ้าที่อุณหภูมิ 1400 °c

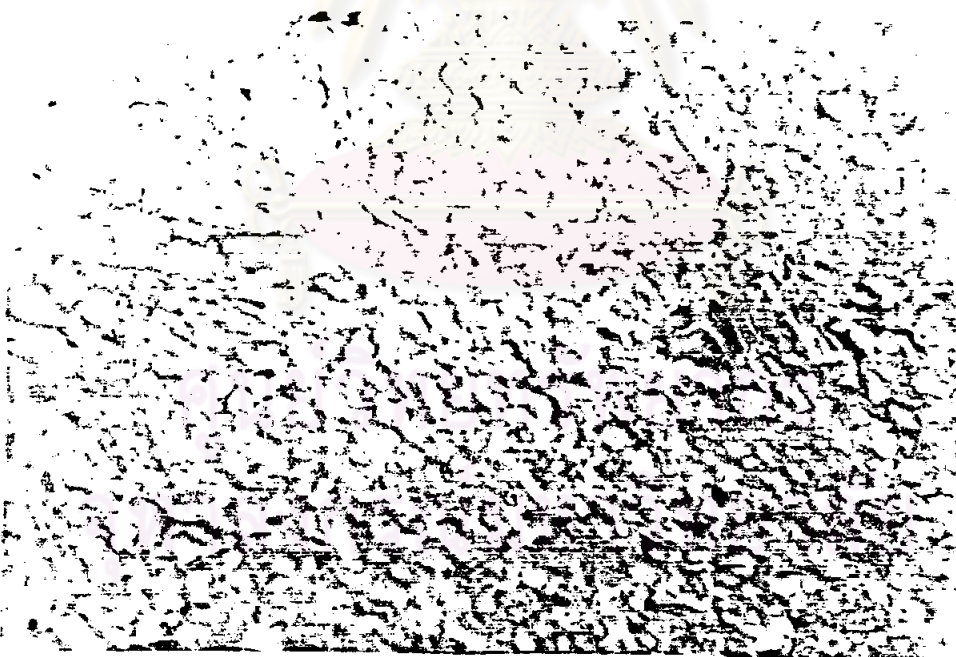


b) เฝ้าที่อุณหภูมิ 1500 °c

รูปที่ 5.10 แสดงจุลโครงสร้างของ TiO_2 ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า



a) เผาที่อุณหภูมิ 1250 °C



b) เผาที่อุณหภูมิ 1300 °C

รูปที่ 5.11 แสดงจุลโครงสร้างของ Ba TiO₃ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM
กำลังขยาย 3,500 เท่า

2

5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวโคอิเล็กทริก

เนื่องจากการศึกษาตัวโคอิเล็กทริกชนิดเซรามิกส์ โดยการวิเคราะห์สารผสม จากตัวอย่างโคอิเล็กทริก ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ผลิตในต่างประเทศ แล้วทำการ-
สังเคราะห์สารให้มีคุณสมบัติเหมือนของต่างประเทศต้องใช้เวลามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง
การขึ้นรูปและการเผา ต้องประสบปัญหาเพราะสเปคซิเมนจะเกิดการแตกร้าวหลังการขึ้นรูป
และหลังการเผาดังตัวอย่างรูปที่แสดงในภาคผนวก จึงเป็นการยากที่จะทำให้ได้ชิ้นงาน
สเปคซิเมนที่สมบูรณ์ ที่จะนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามผู้วิจัยก็ได้
พยายามแก้ไขปัญหานี้ เพื่อทำตัวอย่างสเปคซิเมนสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในช่วง
ระยะเวลาที่มีเหลือจำกัด จึงได้ตัวอย่างที่ไม่สมบูรณ์ตามที่ต้องการ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ
ตัวโคอิเล็กทริกที่สามารถวัดได้มี 3 ประการ คือ

- 1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- 2) ค่าเปอร์มิตทิวิตีสัมพัทธ์
- 3) ค่าแฟคเตอร์หลังงานสูญเสียในโคอิเล็กทริก

ผลของการทดสอบทั้ง 3 รายการแสดงไว้ในตาราง 5.5 เมื่อพิจารณาจาก
ผลที่ทดสอบได้ จะพบว่ายังมีค่าต่ำกว่าค่าที่คาดหวังอีกมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขาด
ประสบการณ์ในการเตรียมเนื้อสาร การขึ้นรูปและการเผา กล่าวคือในการเตรียมเนื้อสาร
นั้น ขนาดเกรนของผงสารก่อนทำการขึ้นรูป ยังมีขนาดโตเกินไป ซึ่งสังเกตได้จากภาพ
จุลโครงสร้างที่ได้จากเครื่อง S.E.M. ในด้านการขึ้นรูปก่อนเผา แบบอัดที่ใช้ในการ
ขึ้นรูปที่สร้างขึ้นเองนั้นยังมีคุณภาพและประสิทธิภาพไม่ดีพอ ทำให้ตัวอย่างสเปคซิเมนที่อัด
ออกมาได้มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการเสียรูปและแตกร้าวก่อนและหลังการเผา
ยิ่งกว่านั้นยังมีผลจากการใส่สารไบนเดอร์ที่ช่วยในการขึ้นรูป พบว่าการใส่สารไบนเดอร์
ยังไม่ดีพอ คือสารไบนเดอร์กระจายตัวไม่ทั่วถึง ทำให้การหดตัวของปริมาตรโคอิเล็กทริก
ไม่เท่ากัน จึงมีผลทำให้เกิดการเสียรูปได้เช่นกัน และเป็นผลทำให้เกิดโพรงในเนื้อโคอิ-
เล็กทริกหลังการเผา ซึ่งทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำ สาเหตุสำคัญประการ
หนึ่งที่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างโคอิเล็กทริกมีค่าต่ำ คือกระบวนการขึ้นเนื้อจริง

ซึ่งหมายถึง อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ/อุณหภูมิเผาที่เหมาะสม และช่วงระยะเวลาที่เผาอุณหภูมิสูงสุดคงที่ เพราะกระบวนการนี้มีผลสำคัญยิ่งต่อเนื้อสารที่เผาได้ ซึ่งต้องอาศัยประสิทธิภาพที่สูง

อนึ่งผลการทดสอบที่ได้ตั้งแสดงในตาราง 5.5 นั้นเป็นผลที่ได้จากตัวอย่างที่มีได้มีการเตรียมให้ถูกต้องคือพอน้ำมันตัวอย่างสเปคซิเมนยังมีให้ทำการซัคมันเรียบ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการซัคมันเรียบมาก ทำให้การสัมผัสระหว่างผิวสเปคซิเมนกับอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์วัดยังไม่ดีพอ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชนิดของสาร ไดอิเล็กตริก	รายการทดสอบ			หมายเหตุ
	E_b kV/mm.	ϵ_r	tg δ	
Ba TiO ₃ (1,250 °C)	4.08	72.3	0.07	
TiO ₃ (1,500 °C)	2.0	31.6	$<0.5 \times 10^{-5}$	

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างรายการละ 5 ตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย