

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัย และการอภิปรายผลการทดลองซึ่งประกอบด้วยส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างของผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM-EDX), การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ส่วนเม็ดวัสดุที่เตรียมได้วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDX) และส่วนสุดท้ายในบทนี้เป็นผลของปริมาณ Ti และผลของ Sr, Pr และ Sn ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') การสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear current voltage) ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ผ่านพื้นผิวของเม็ดวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060°C ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน 6 และ 10 ชั่วโมง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะป็นค่าที่บ่งบอกความเป็นไปได้ในวัสดุว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุวาริสเตอร์ได้หรือไม่ โดยของผลการวิจัย และการอภิปรายผลมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การศึกษาสัณฐานวิทยาและโครงสร้างผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$

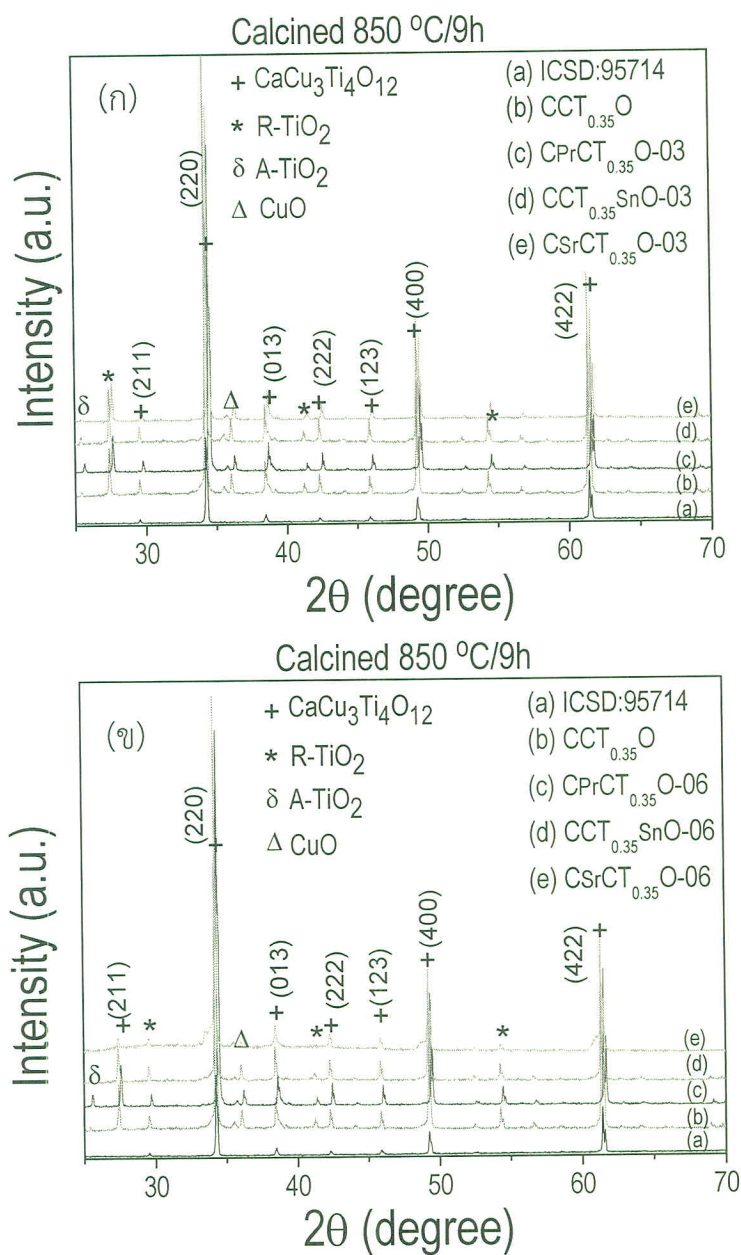
1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ด้วยเทคนิค XRD

ผลการศึกษาโครงสร้างของผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ด้วยการเจือที่ปริมาณ 0.03 และ 0.06 ด้วยเทคนิค XRD ที่เตรียมโดยวิธีสารละลายโพลิเมอร์ไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิแคลไซด์ 850°C โดยใช้เวลา 9 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 4-1 (ก) และ (ข) จากภาพที่ 4-1 (ก) เป็น XRD ของวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$ -03, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ -03 และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ -03 จากภาพจะเห็นว่าเกิดเฟสหลักของวัสดุ CCTO ในวัสดุที่เตรียมได้เมื่อเทียบกับค่าพีคหลักมาตรฐาน (ICSD. 95714) พบว่าตำแหน่งพีคหลัก (main peak) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สำหรับผงวัสดุที่เตรียมได้ เกิดขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 34.2841, 38.5033, 42.3056, 45.8828, 49.2547 และ 61.3786 สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์ (ICSD. 95714) โดยมีพีคของสาร CuO เจือปน (impurity) เมื่อเปรียบเทียบกับพีคหลักกับพีคมาตรฐาน CCTO (ICSD: 95714) และนอกจากนี้ยังพบเฟสเจือปนของ Rutile- TiO_2 และ Anates- TiO_2 เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณหาขนาดผลึกโดยใช้การเลี้ยวเบนผ่านระนาบ (220), (330), (222), (231), (400)

และ (422) และใช้โปรแกรม profile fit 1.0 พบว่าขนาดผลึกเฉลี่ยของวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ มีขนาดเท่ากับ 91 ± 27 nm ส่วนวัสดุผง $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}-03$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}-03$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-03$ เมื่อใช้วิธีการคำนวณเดียวกันพบว่าขนาดของผลึกเท่ากับ 128 ± 11 , 125 ± 11 และ 128 ± 7 nm ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งพีคหลักที่เกิด 2θ และขนาดของผลึก ดังแสดงในตารางที่ 4-1

จากภาพที่ 4-1 (ข) เป็น XRD ของวัสดุผง $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}-06$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}-06$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-06$ จากภาพจะเห็นว่าเกิดเฟสหลักของวัสดุ CCTO ในวัสดุที่เตรียมได้เมื่อเทียบกับค่าพีคหลักมาตรฐาน (ICSD. 95714) พบว่าตำแหน่งพีคหลัก (main peak) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สำหรับผงวัสดุที่เตรียมได้ เกิดขึ้นที่มุม 2θ ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์ (ICSD. 95714) โดยมีพีคของสาร CuO เจือปน (impurity) เมื่อเปรียบเทียบกับพีคหลักกับพีคมาตรฐาน CCTO (ICSD: 95714) และนอกจากนี้ยังพบเฟสเจือปนของ Rutile- TiO_2 และ Anates- TiO_2 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาขนาดผลึกโดยใช้การเลี้ยวเบนผ่านระนาบ (220), (330), (222), (231), (400) และ (422) และใช้โปรแกรม profile fit 1.0 พบว่าขนาดผลึกเฉลี่ยของวัสดุผง $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}-06$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}-06$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-06$ มีขนาดเท่ากับ 127 ± 9 , 82 ± 24 และ 99 ± 24 nm ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งพีคหลักที่เกิด 2θ และขนาดของผลึก ดังแสดงในตารางที่ 4-1

จากการศึกษาโครงสร้างเฟสหลักของวัสดุผง ที่เตรียมได้จะเห็นว่าขนาดผลึกของวัสดุที่เพิ่มปริมาณ Ti ขนาดของผลึกเฉลี่ย (D) จะมีขนาดเล็กกว่าวัสดุผงที่เจือด้วยปริมาณ Sr, Pr และ Sn เนื่องจากปริมาณสารเจือที่เจือเข้าไปทำให้สารเจือนั้นเข้าไปในองค์ประกอบได้บางส่วน แต่ส่วนที่เหลือจะตกก่อนเฟสใหม่ เป็น CuO และ TiO_2 จึงทำให้ขนาดผลึกนั้นมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุที่ไม่ได้เจือ



ภาพที่ 4-1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงวัสดุ (ก) $\text{CCTO}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCTO}_{0.35}\text{O-03}$, $\text{CsrCTO}_{0.35}\text{O-03}$, $\text{CCTO}_{0.35}\text{SnO-03}$ และ (ข) $\text{CCTO}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCTO}_{0.35}\text{O-06}$, $\text{CsrCTO}_{0.35}\text{O-06}$, $\text{CCTO}_{0.35}\text{SnO-06}$ เตรียมโดยวิธีสารละลายโพลิเมอร์ไพโรไลซิสเผาแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 850 °C โดยใช้เวลา 9 ชั่วโมง โดยเทียบกับพีคมาตรฐานของ CCTO (ICSD: 95714)

ตารางที่ 4-1 แสดงขนาดผลึกเฉลี่ย (D) ของวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-03}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-06}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-06}$ เตรียมโดยวิธีสารละลายโพลิเมอร์ไพโรไลซิส

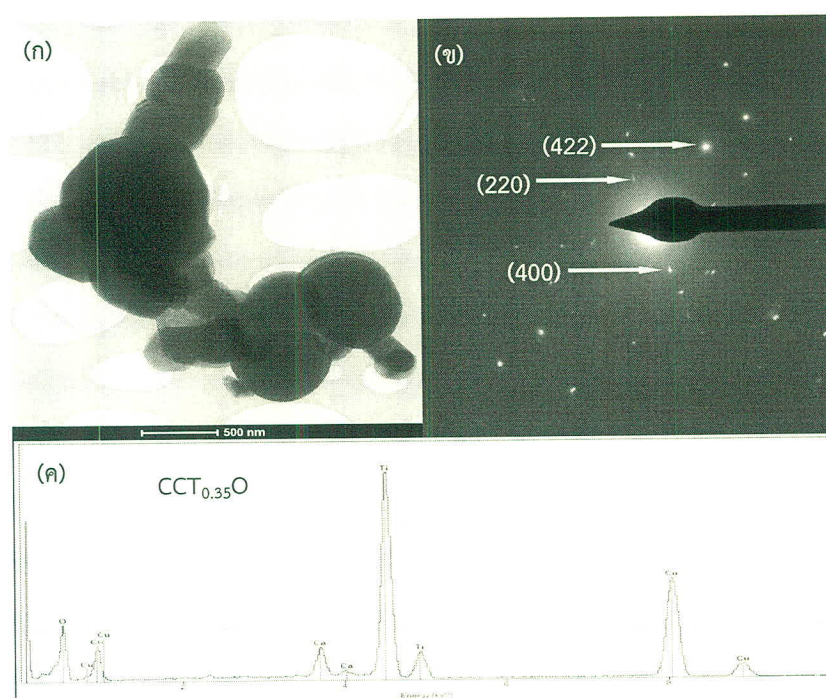
สารตัวอย่าง	ระนาบ (hkl)	2θ (องศา)	FWHM (องศา)	Crystallite size (D) (nm)
$\text{CCT}_{0.35}\text{O}$	220	34.2841	0.1285	70.08
	330	38.5033	0.2055	44.36
	222	42.3056	0.0842	109.59
	231	45.8828	0.0856	109.17
	400	49.2547	0.0878	107.83
	422	61.3786	0.0952	105.12
$\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-3}$	220	34.5222	0.0772	116.73
	330	38.7154	0.0775	117.70
	222	42.5552	0.0763	121.04
	231	46.1282	0.0669	139.82
	400	49.4956	0.0685	138.34
	422	61.6105	0.0746	134.31
$\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-3}$	220	34.4659	0.0793	113.62
	330	38.6602	0.0602	151.50
	222	42.5011	0.0799	115.57
	231	46.0734	0.0766	122.09
	400	49.441	0.0729	129.96
	422	61.7282	0.0845	118.65

ตารางที่ 4-1(ต่อ) แสดงขนาดผลึกเฉลี่ย (D) ของวัสดุผง CCT_{0.35}O, CPrCT_{0.35}O-03, CSrCT_{0.35}O-03, CCT_{0.35}SnO-03, CCT_{0.35}O, CPrCT_{0.35}O-06, CSrCT_{0.35}O-06 และ CCT_{0.35}SnO-06 เตรียมโดยวิธีสารละลายโพลิเมอร์ไพโรไลซิส

สารตัวอย่าง	ระนาบ (hkl)	2θ (องศา)	FWHM (องศา)	Crystallite size (D) (nm)
CCT _{0.35} SnO-3	220	34.2651	0.0776	116.05
	330	38.463	0.0678	134.43
	222	42.303	0.074	124.70
	231	45.8768	0.0751	124.43
	400	49.2474	0.0706	134.09
	422	61.3692	0.0755	132.54
CPrCT _{0.35} O-6	220	34.4317	0.0754	119.49
	330	38.6261	0.0782	116.61
	222	42.4657	0.0763	121.01
	231	46.0401	0.0699	133.77
	400	49.4077	0.0685	138.29
	422	61.6105	0.0746	134.31
CSrCT _{0.35} O-6	220	34.2723	0.1421	63.37
	330	38.4767	0.2017	45.19
	222	42.297	0.1183	78.00
	231	45.9944	0.0979	95.49
	400	49.2471	0.0898	105.42
	422	61.3715	0.0978	102.32
CCT _{0.35} SnO-6	220	34.2529	0.0843	106.82
	330	38.4644	0.136	67.02
	222	42.3007	0.1329	69.43
	231	45.8603	0.0765	122.15
	400	49.2323	0.0815	116.15
	422	61.3509	0.0883	113.32

1.2 ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ด้วยเทคนิค TEM

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ด้วยเทคนิคการเตรียม โดยวิธีโพลีเมอร์ไพโรไลซิส ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมที่ทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และใช้เวลาในการเผาแคลไซด์ต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้หาขนาดอนุภาคของวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ที่เจือด้วยปริมาณ 0.03 และ 0.06 และทำการศึกษาร่องรอยของสารเจือ Sr, Pr และ Sn ที่เจือโดยการยิง EDS ซึ่งข้อมูลการทดลองเพื่อหาขนาดอนุภาคของวัสดุผงที่เตรียมได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-2 ถึง 4-5 โดยที่ภาพที่ 4-2 เป็นภาพการศึกษาขนาดอนุภาคและรูปแบบการเลี้ยวเบน



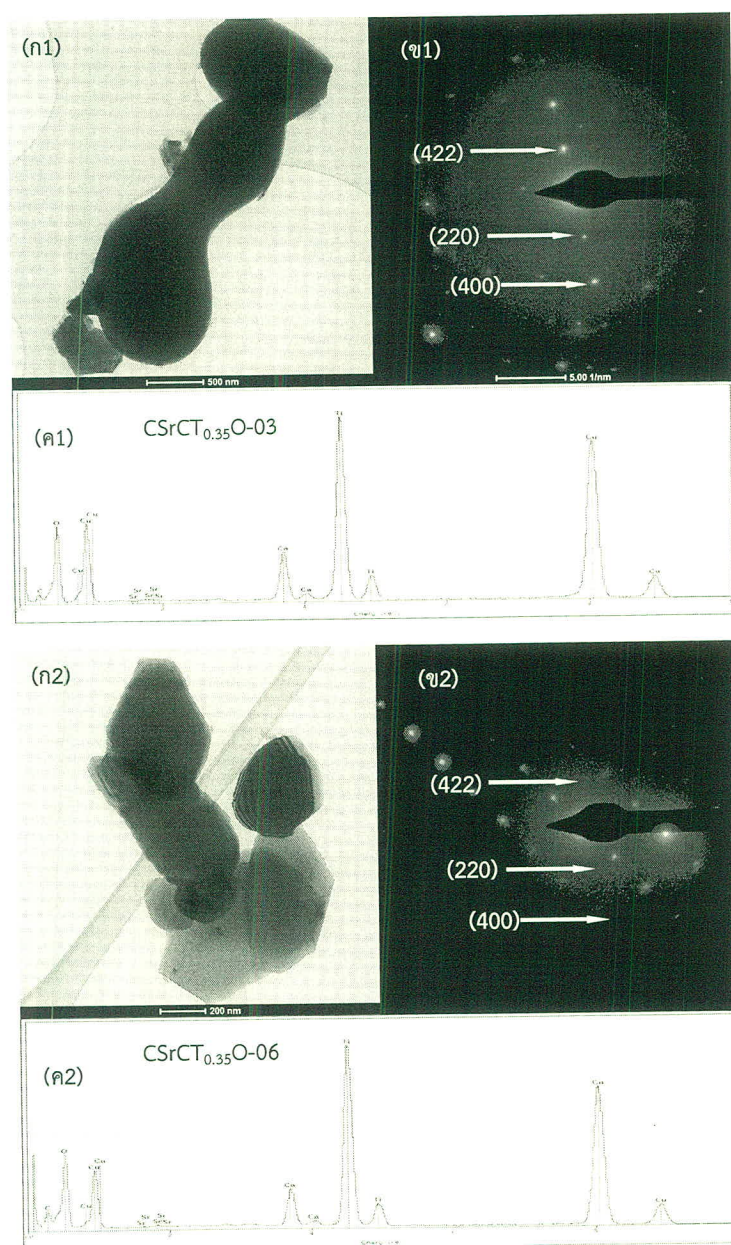
ภาพที่ 4-2 แสดงภาพถ่ายผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ด้วยเทคนิค TEM (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (ข) และองค์ประกอบของธาตุเมื่อศึกษาด้วย EDS (ค)

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาเชิงลึกด้วยภาพถ่าย TEM ดังแสดงในภาพที่ 4-2 (ก) ขนาดอนุภาคของวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ โดยเทคนิคสารละลายโพลีเมอร์ไพโรไลซิสที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยเวลา 9 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มมีรูปร่างและมีขนาดที่ไม่แน่นอนและมีขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 200-300 นาโนเมตร อาจเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซด์มากกว่าที่ได้มีรายงานการวิจัยที่ผ่านมา หรืออาจเนื่องจากสารเจือที่เจือเข้าไปอาจทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการขึ้น ส่วนภาพที่ 4.2 (ข) เป็นภาพรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ที่

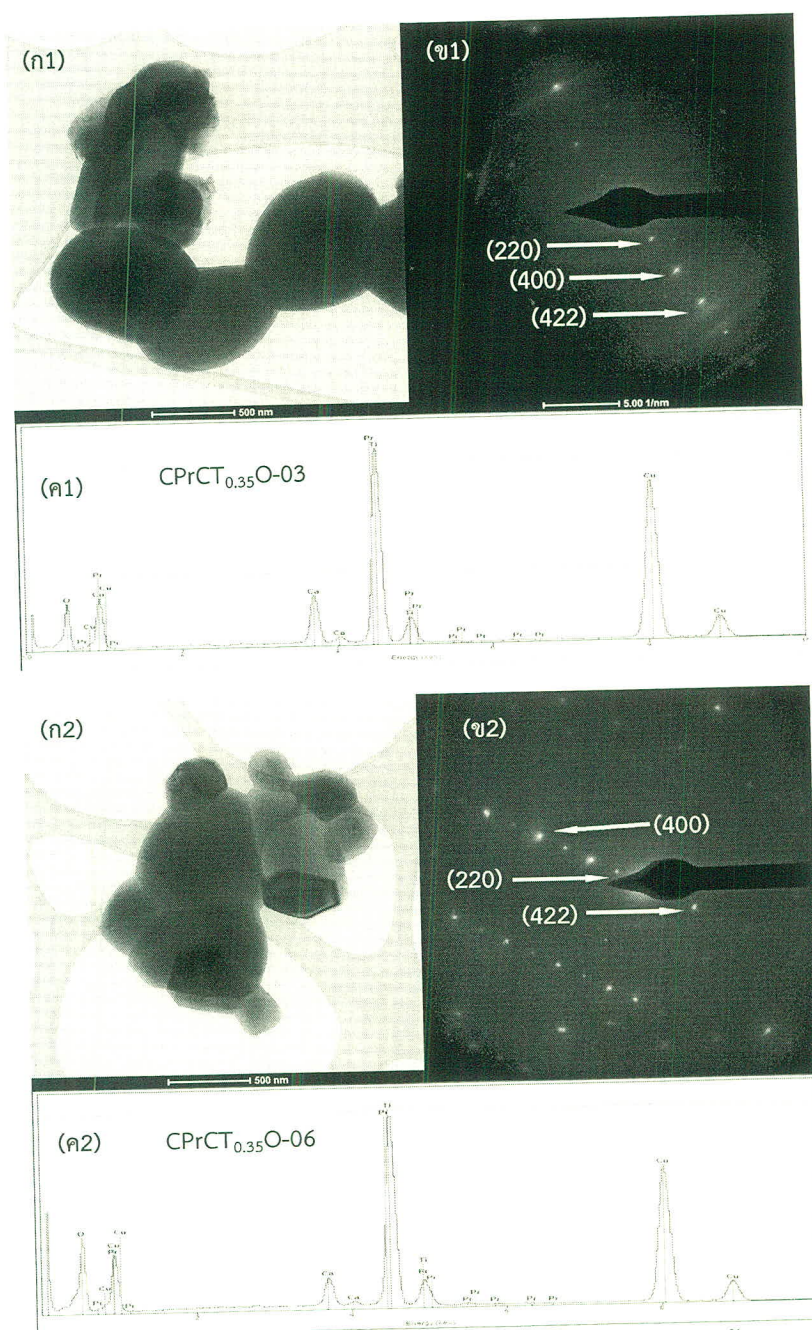
บ่งชี้ดัชนี (index) ของระนาบใน SAED (Selected - Area Electron Diffraction pattern) ของ แต่ละรูป ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl} ของผงวัสดุที่ถูกเตรียมได้ ซึ่งมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของระนาบที่สอดคล้องกันกับรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ก) ส่วนภาพที่ 4.2 (ค) เป็นภาพขององค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในวัสดุผง ที่เตรียมได้โดยศึกษาจากเทคนิค EDS โดยจะเห็นว่าวัสดุผง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ที่เตรียมได้จะประกอบด้วยธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ Ca, Cu, Ti และ O ส่วนองค์ประกอบของ Cu เป็นองค์ประกอบที่รวมเข้าแล้วซึ่ง Cu ที่ถูกเคลือบเพื่อใช้ในการถ่ายภาพด้วย TEM

ภาพที่ 4-3 (ก1, ข1, ค1) และ (ก1, ข1, ค1) เป็นภาพการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาเชิงลึกด้วยภาพถ่าย TEM รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ที่บ่งชี้ดัชนี (index) ของระนาบใน SAED (Selected - Area Electron Diffraction pattern) และ องค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในวัสดุผง ศึกษาจากเทคนิค EDS ของวัสดุ $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O-03}$ และ $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O-06}$ ตามลำดับ จากภาพจะเห็นว่าเมื่อดูขนาดของอนุภาคจะเห็นว่าอนุภาคมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก โดยขนาดอนุภาคของผงวัสดุที่เตรียมได้มีขนาดอยู่ในช่วง 200-400 nm และเมื่อศึกษาการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ที่บ่งชี้ดัชนี (index) ของระนาบใน SAED พบว่ามีการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกันกับระนาบของวัสดุผงที่ศึกษาด้วยเทคนิค XRD และปริมาณของ Sr ที่เจือด้วยปริมาณ 0.06 จะมีปริมาณมากกว่าในผงวัสดุ $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O-06}$ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O-03}$ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารเจือที่เจือเข้าไปในวัสดุผง

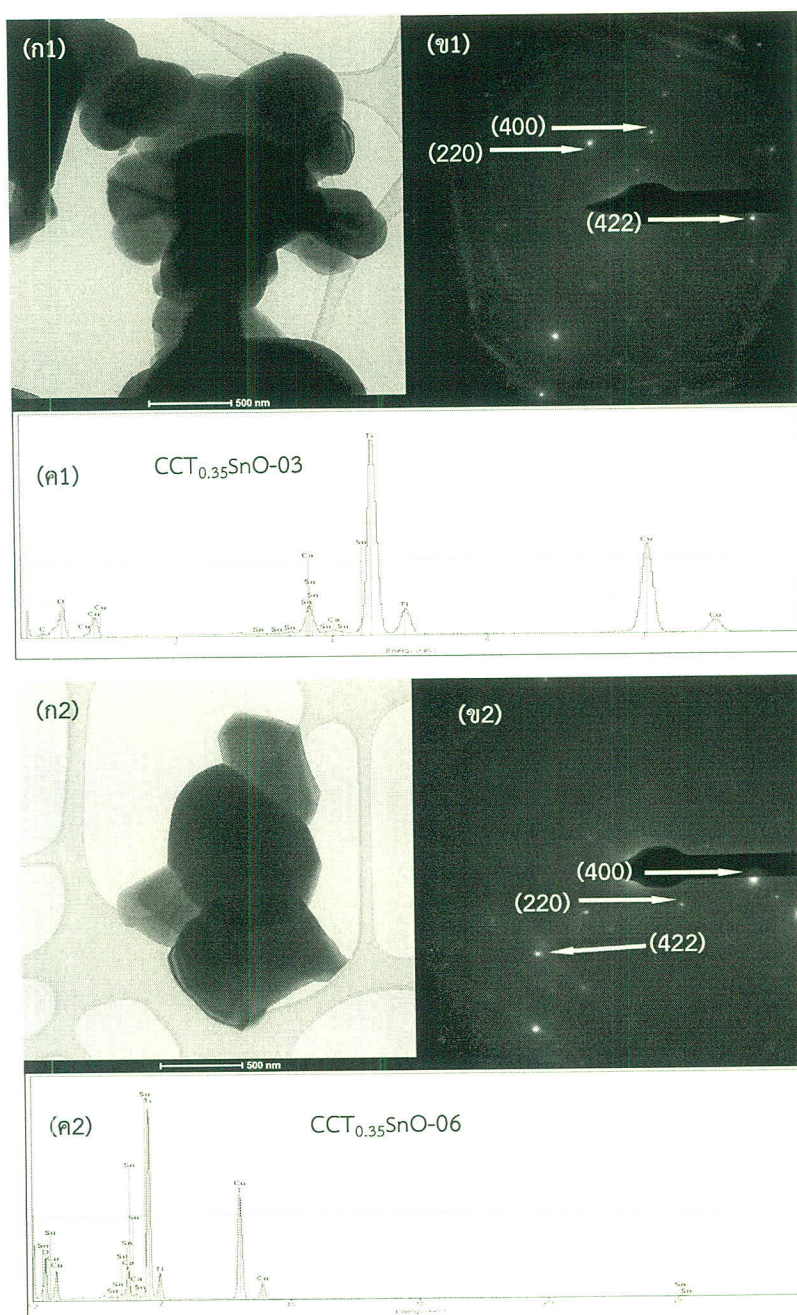
ภาพที่ 4-4 (ก1, ข1, ค1) และ (ก1, ข1, ค1) เป็นภาพการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาเชิงลึกด้วยภาพถ่าย TEM รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ที่บ่งชี้ดัชนี (index) ของระนาบใน SAED (Selected - Area Electron Diffraction pattern) และ องค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในวัสดุผง ศึกษาจากเทคนิค EDS ของวัสดุ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03}$ และ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-06}$ ตามลำดับ จากภาพจะเห็นว่าเมื่อดูขนาดของอนุภาคจะเห็นว่าอนุภาคมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก โดยขนาดอนุภาคของผงวัสดุที่เตรียมได้มีขนาดอยู่ในช่วง 200-400 nm และเมื่อศึกษาการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ที่บ่งชี้ดัชนี (index) ของระนาบใน SAED พบว่ามีการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกันกับระนาบของวัสดุผงที่ศึกษาด้วยเทคนิค XRD และปริมาณของ Pr ที่เจือด้วยปริมาณ 0.06 จะมีปริมาณมากกว่าในผงวัสดุ $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O-06}$ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O-03}$ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารเจือที่เจือเข้าไปในวัสดุผงที่ถูกเตรียมด้วยวิธีสารละลายโพลิเมอร์ไพโรไลซิส



ภาพที่ 4-3 แสดงภาพถ่ายผงวัสดุ ด้วยเทคนิค TEM (ก1, ก2) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (ข1, ข2) และองค์ประกอบของธาตุเมื่อศึกษาด้วย EDS (ค1, ค2) สำหรับผงวัสดุ $\text{CsSrCT}_{0.35}\text{O-03}$ และ $\text{CsSrCT}_{0.35}\text{O-06}$ ตามลำดับ



ภาพที่ 4-4 แสดงภาพถ่ายวัสดุด้วยเทคนิค TEM (ก1, ก2) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (ข1, ข2) และองค์ประกอบของธาตุเมื่อศึกษาด้วย EDS (ค1, ค2) สำหรับวัสดุ CPrCT_{0.35}O-03 และ CPrCT_{0.35}O-06 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-5 แสดงภาพถ่ายผงวัสดุด้วยเทคนิค TEM (ก1, ก2) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (ข1, ข2) และองค์ประกอบของธาตุเมื่อศึกษาด้วย EDS (ค1, ค2) สำหรับผงวัสดุ CCT_{0.35}SnO-03 และ CCT_{0.35}SnO-06 ตามลำดับ

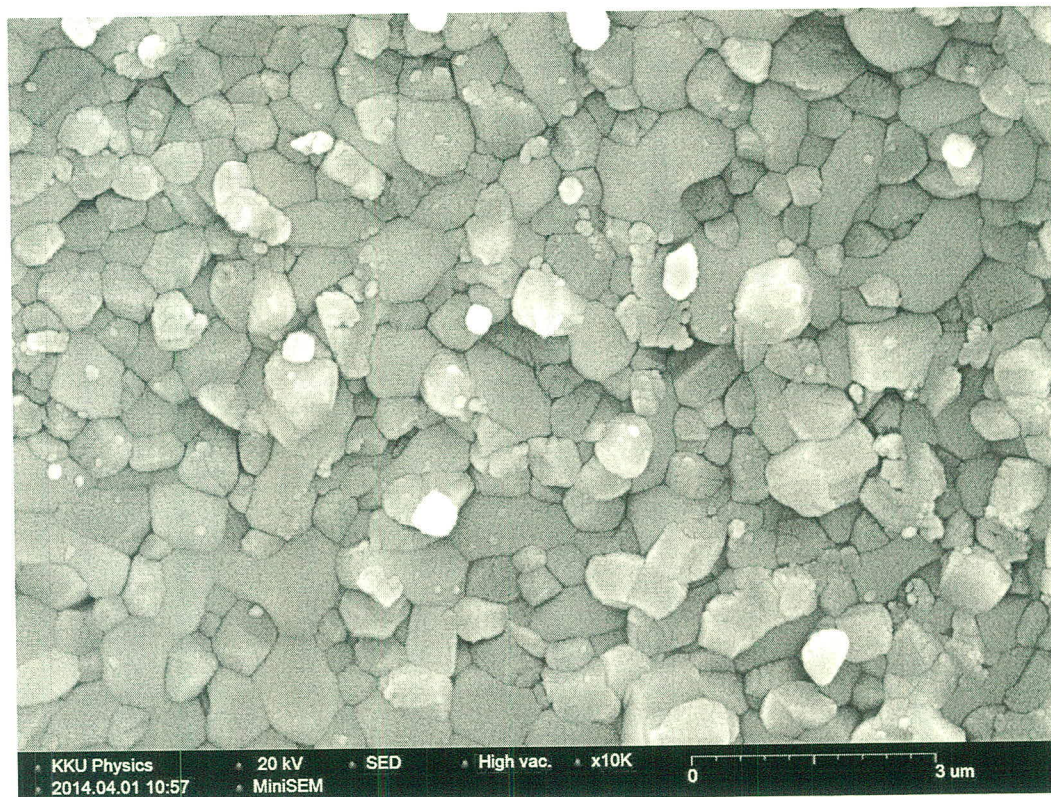
ภาพที่ 4-5 (ก1, ข1, ค1) และ (ก2, ข2, ค2) เป็นภาพการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาเชิงลึกด้วยภาพถ่าย TEM รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ที่บ่งชี้ดัชนี (index) ของระนาบใน SAED (Selected - Area Electron Diffraction pattern) และ องค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในวัสดุผง

ศึกษาจากเทคนิค EDS ของวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-03$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-06$ ตามลำดับ จากภาพจะเห็นว่าเมื่อดูขนาดของอนุภาคจะเห็นว่าอนุภาคมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก โดยขนาดอนุภาคของผงวัสดุที่เตรียมได้มีขนาดอยู่ในช่วง 200-400 nm และเมื่อศึกษาการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ที่บ่งชี้ดัชนี (index) ของระนาบใน SAED พบว่ามีการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกันกับระนาบของวัสดุผงที่ศึกษาด้วยเทคนิค XRD และปริมาณของ Sn ที่เจือด้วยปริมาณ 0.06 จะมีปริมาณมากกว่าในผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-06$ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-03$ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารเจือที่เจือเข้าไปในวัสดุผงที่ถูกเตรียมด้วยวิธีสารละลายโพลีเมอร์ไพโรไลซิส จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของภาพถ่ายด้วยเทคนิค TEM ในวัสดุที่มีการเตรียมด้วยเทคนิค TEM จะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่เตรียมได้มีการจับกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดใหญ่ ทั้งในวัสดุที่เจือด้วย Sr, Pr และ Sn และในวัสดุผงที่ยังไม่ได้มีการเจือ ผลที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากความไม่บริสุทธิ์ (impurity) ในการเตรียมวัสดุ เนื่องจากปริมาณ Ti ที่เพิ่มเข้าไปนั้นมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของผงวัสดุที่เตรียมได้ ส่วนปริมาณสารที่ถูกเจือเข้าไปอาจมีผลทำให้อนุภาคนั้นในวัสดุผงที่ถูกเตรียมมีค่าที่แตกต่างกันซึ่งการศึกษขนาดอนุภาคของวัสดุผงด้วยเทคนิค TEM นี้จะยืนยันขนาดของอนุภาคอีกทางหนึ่งด้วยเทคนิค SEM ในหัวข้อที่ 1.3

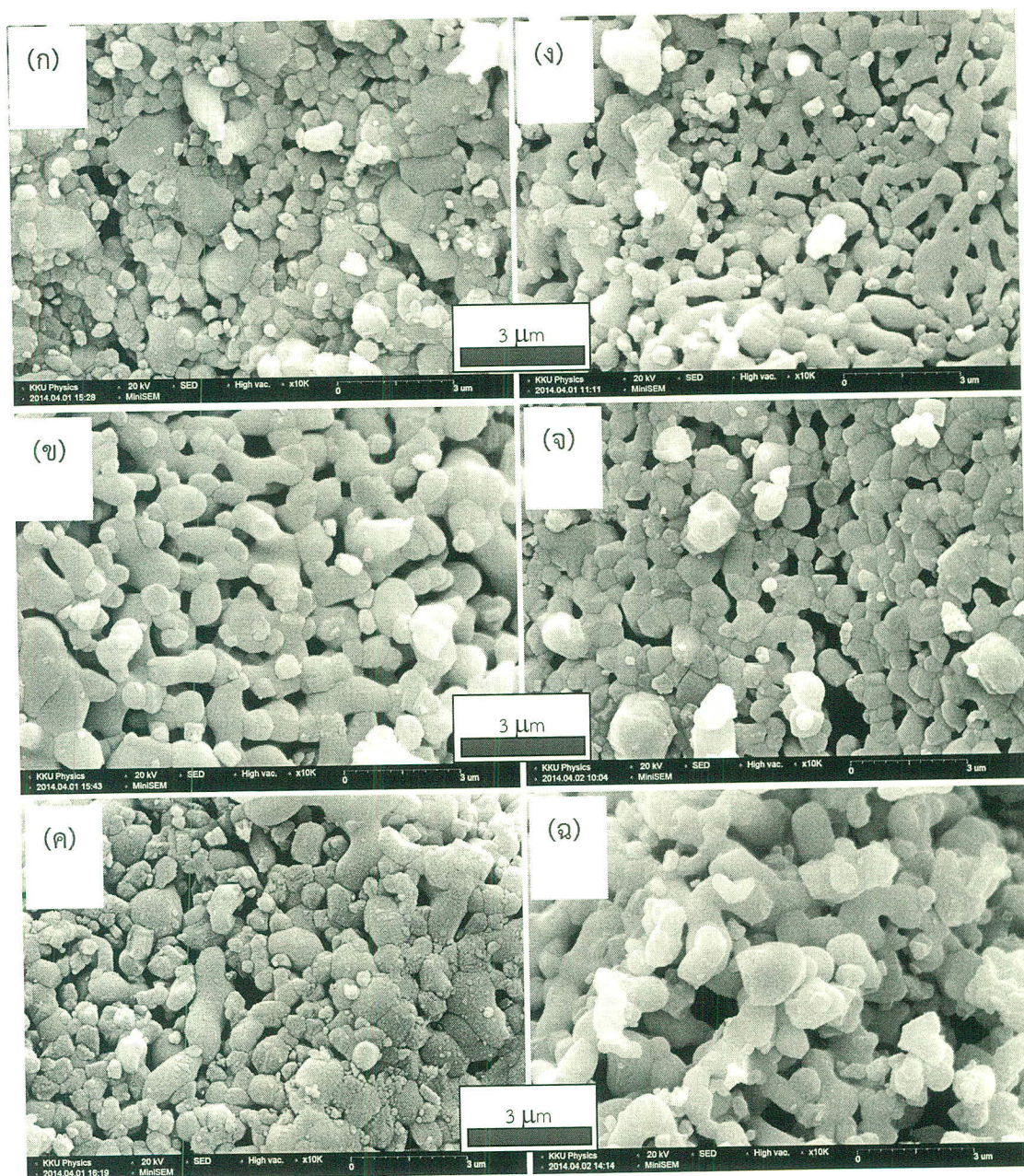
1.3 ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$ ด้วยเทคนิค SEM

เนื่องจากการหาขนาดอนุภาคของวัสดุผงที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค TEM ในหัวข้อที่ผ่านมาอนุภาคผงที่เตรียมได้นั้นมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นการหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยในวัสดุผงที่เตรียมได้จึงได้ทำการศึกษขนาดด้วยเทคนิค SEM เพื่อดูผลของสารเจือที่มีต่อการโตของอนุภาควัสดุผงที่เตรียมได้ ภาพที่ 4-6 เป็นภาพถ่ายขนาดผงอนุภาคของวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ด้วยเทคนิค SEM จากภาพจะเห็นว่าผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ประกอบด้วยเกรนที่มีขนาดเล็กและเกรนที่มีขนาดใหญ่รวมกันอยู่และขนาดของผลึกนั้นขีดกันโดยที่ขนาดผลึกที่หาจากภาพถ่าย ด้วยเทคนิค SEM ด้วยวิธี การนับจากโปรแกรม line intercept ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $1.79 \mu\text{m}$ ส่วนวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ที่เจือด้วย Sr, Pr และ Sn ในตำแหน่ง Ca และในตำแหน่ง Ti แสดงได้ในภาพที่ 4-7 ก, ข, ค และ ง, จ, ฉ ตามลำดับ โดยที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยสำหรับวัสดุผง $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}-03$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}-03$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-03$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}-06$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}-06$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-06$ มีค่าเท่ากับ 1.35, 1.13, 1.12, 0.91, 1.07 และ 1.47 ตามลำดับ จากการหาขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค SEM วัสดุผงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดในวัสดุผงที่ถูกเตรียมจะเป็นวัสดุผงที่เจือด้วย Sn เนื่องจากเจือเข้าไปใน

ตำแหน่ง Ti และขนาดอนุภาคผงของวัสดุที่ถูกเตรียมด้วยวิธีสารละลายโพลิเมอร์โรโรโรซีสนี้มีผลต่อการเกิดเกรน และขอบเกรน และมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่า $\tan\delta$ จะได้ศึกษาในหัวข้อที่ 1.3



ภาพที่ 4-6 แสดงภาพถ่ายผงวัสดุด้วยเทคนิค SEM สำหรับผงวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$



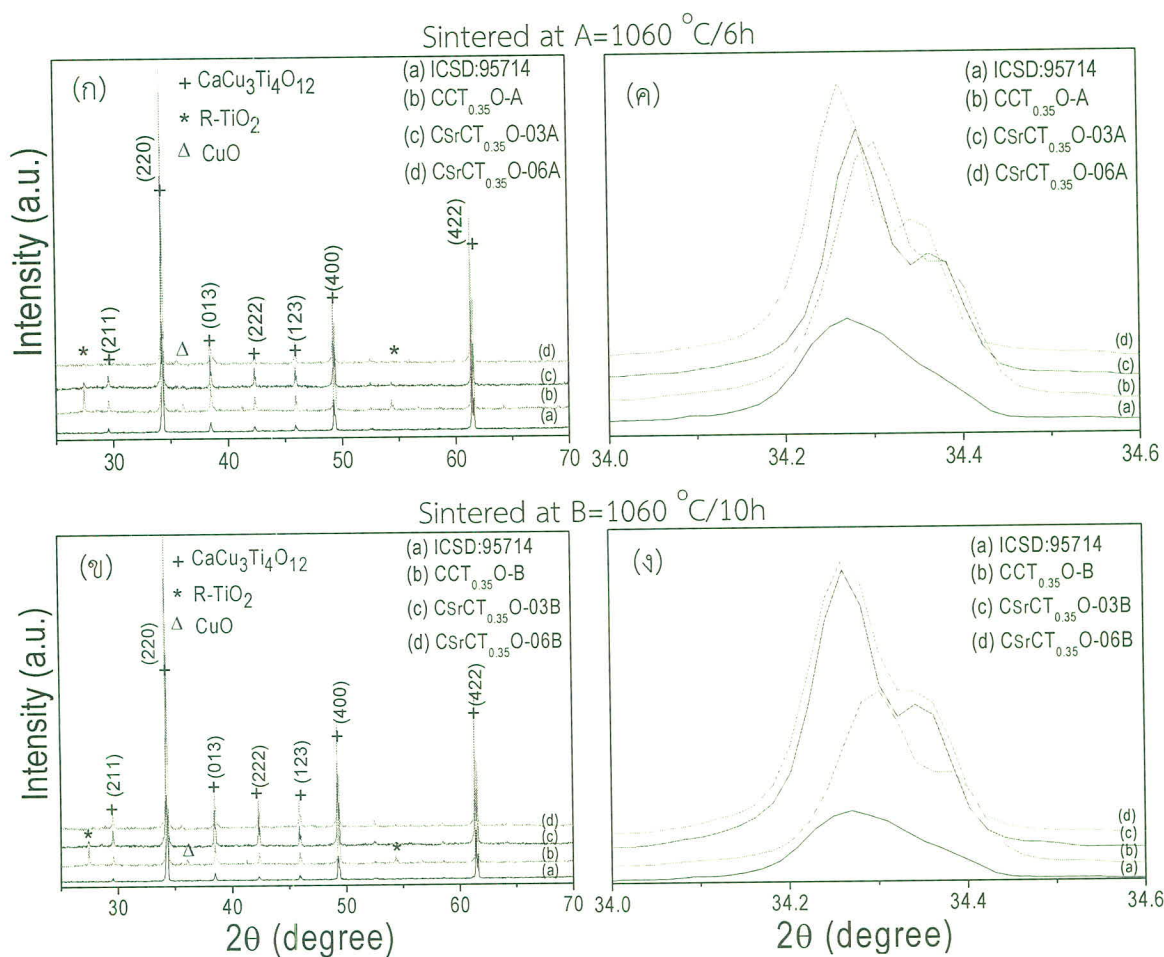
ภาพที่ 4-7 แสดงภาพถ่ายวัสดุด้วยเทคนิค SEM สำหรับผงวัสดุ (ก) $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O}-03$ (ข) $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}-03$ (ค) $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-03$ (ง) $\text{CsrCT}_{0.35}\text{O}-06$ (จ) $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}-06$ (ฉ) $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}-06$ ตามลำดับ

2. การศึกษาสัณฐานวิทยาและโครงสร้างวัสดุเซรามิก $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO}$

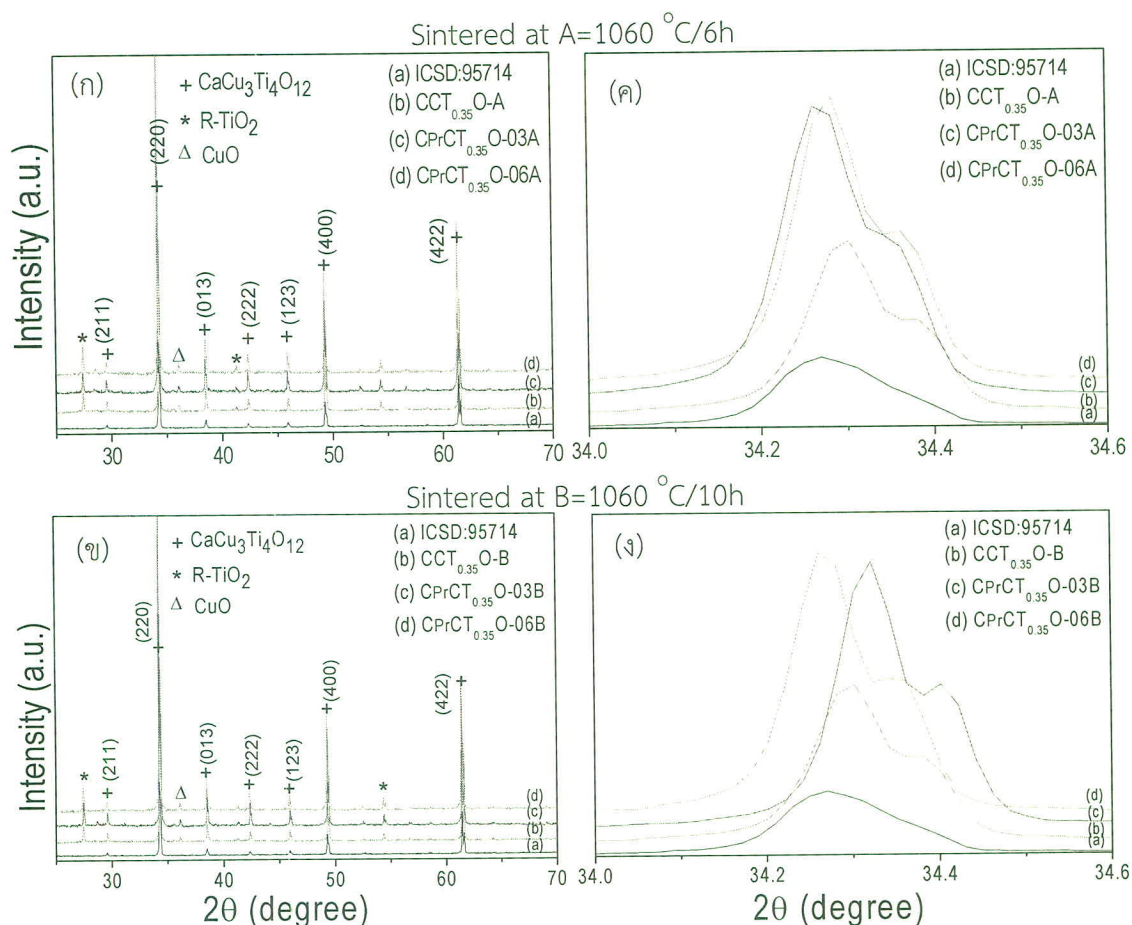
2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างเม็ดวัสดุด้วยเทคนิค XRD

การศึกษาโครงสร้างและการเกิดเฟสของวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์กับวัสดุมาตรฐาน (ICSD 95714) แสดงได้ในภาพที่ 4-8 ถึง 4-10

ภาพที่ 4-8 (ก) และ (ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สำหรับวัสดุเซรามิกที่เจือด้วย Sr ที่ตำแหน่ง Ca ด้วยปริมาณ 0.03 และ 0.06 และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060°C ด้วยเวลาในการเผาผนึก 6 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ จากภาพที่ 4-8 (ก) จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ที่เจือ Sr จะแสดงเฟสหลักของ CCTO ทุกฟีก โดยจะเกิดเฟสปลอมปน (impurity) TiO_2 และ CuO สำหรับ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$ ส่วนวัสดุเซรามิก $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-3A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-6A}$ จะมีปริมาณเฟสปลอมปน CuO เพียงเล็กน้อยและไม่เกิดเฟสปลอมปนของ TiO_2 ซึ่งเมื่อขยายตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2θ จาก 34 และสิ้นสุดที่ 34.6 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4-8 (ค) จะเห็นว่าระนาบ (220) จะเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มุม 2θ ลดลง อาจเนื่องมาจาก ปริมาณสารเจือ Sr ($r_A=2.04 \text{ \AA}$) เข้าไปแทนที่ใน Ca ($r_A=1.84 \text{ \AA}$) ได้ ส่วนภาพที่ 4-8 (ข) จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาผนึก 10 ชั่วโมง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ที่เจือ Sr จะแสดงเฟสหลักของ CCTO ทุกฟีก โดยจะเกิดเฟสปลอมปน (impurity) TiO_2 และ CuO สำหรับ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$ ส่วนวัสดุเซรามิก $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-3A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-6A}$ จะมีปริมาณเฟสปลอมปน CuO เพียงเล็กน้อยและไม่เกิดเฟสปลอมปนของ TiO_2 ซึ่งเมื่อขยายตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2θ จาก 34 และสิ้นสุดที่ 34.6 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4-8 (ค) จะเห็นว่าระนาบ (220) จะเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มุม 2θ ลดลง อาจเนื่องมาจาก ปริมาณสารเจือ Sr ($r_A=2.04 \text{ \AA}$) เข้าไปแทนที่ใน Ca ($r_A=1.84 \text{ \AA}$) ได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้เผาผนึกในวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$ จะเห็นว่า วัสดุเซรามิก $\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$ จะเกิดเฟสปลอมปน ของ TiO_2 และ CuO ปริมาณน้อยกว่า $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$ อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก เวลาที่ทำการเผาผนึกมากกว่าจะทำให้ปริมาณ TiO_2 ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดการฟอร์มเฟสแล้วเกิดการฟอร์มตัวกันได้ดีขึ้นในวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ส่วนการไม่มีอยู่ของ TiO_2 นั้น อาจเกิดจากการรวมตัวกันระหว่าง Ti ที่เหลืออยู่และสารเจือ Sr รวมตัวกันเป็น SrTiO_3 ซึ่งอาจมีปริมาณน้อยจนไม่สามารถหาเจอได้ด้วยเทคนิค XRD

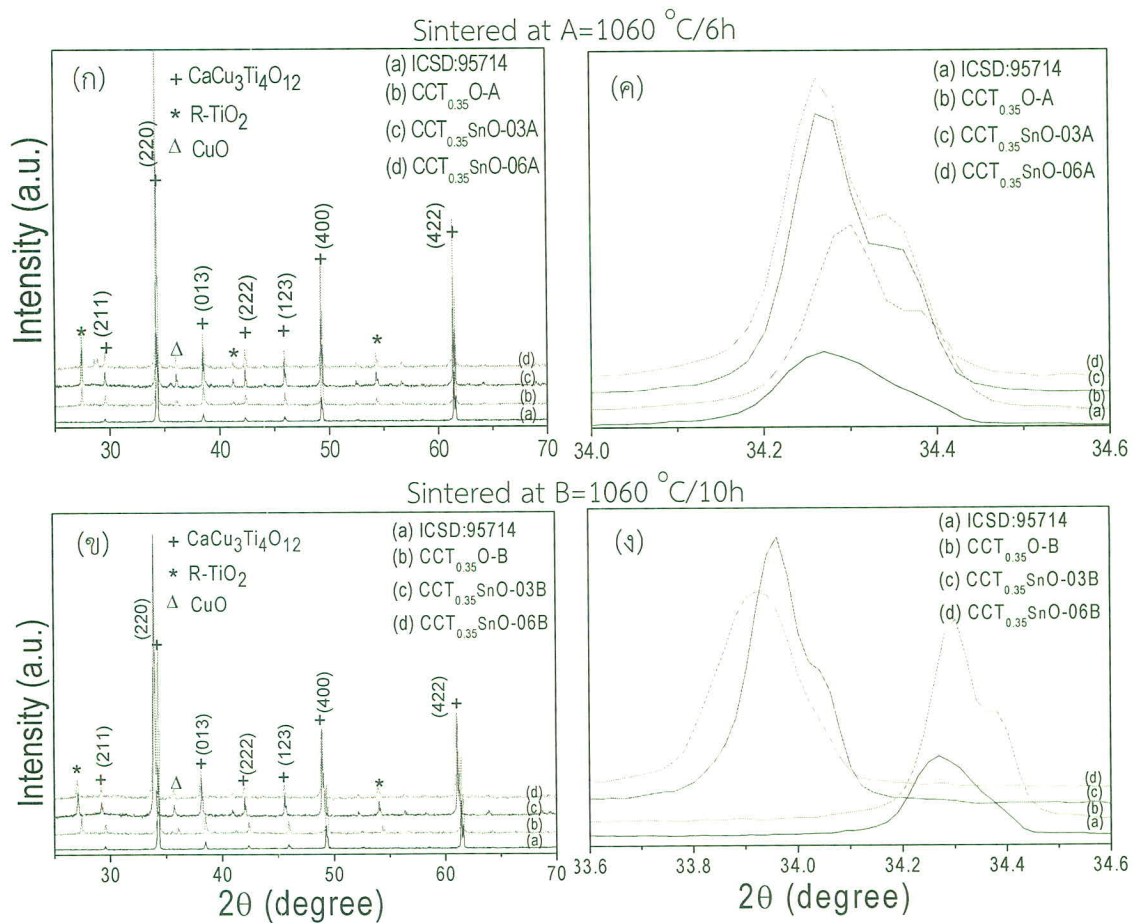


ภาพที่ 4-8 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์สำหรับวัสดุเซรามิก $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ เจือด้วย Sr (0.03, 0.06) เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลา 6 ชั่วโมง (ก, ค) และเวลา 10 ชั่วโมง (ข, ง) เปรียบเทียบกับพีคมาตรฐาน CCTO (ICSD 95714)



ภาพที่ 4-9 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์สำหรับวัสดุเซรามิก $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ เจือด้วย Pr (0.03, 0.06) เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลา 6 ชั่วโมง (ก, ค) และเวลา 10 ชั่วโมง (ข, ง) เปรียบเทียบกับพีคมาตรฐาน CCTO (ICSD 95714)

ภาพที่ 4-9 (ก) และ (ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สำหรับวัสดุเซรามิกที่เจือด้วย Pr ที่ตำแหน่ง Ca ด้วยปริมาณ 0.03 และ 0.06 และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลาในการเผาผนึก 6 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ จากภาพที่ 4-8 (ก) จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ที่เจือ Sr จะแสดงเฟสหลักของ CCTO ทุกพีค โดยจะเกิดเฟสปลอมปน (impurity) TiO_2 และ CuO สำหรับ ซึ่งเมื่อขยายตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2θ จาก 34 และสิ้นสุดที่ 34.6 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4-9 (ค) และ (ง) จะเห็นว่าระนาบ (220) จะเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มุม 2θ สูงขึ้นเมื่อเจือด้วยปริมาณ Pr เท่ากับ 0.03 และ 0.06 อาจเนื่องมาจากผลของความไม่บริสุทธิ์ของสารเจืออาจทำให้เกิดความไม่แน่นอนของสารเจือที่เจือเข้าไปในวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้



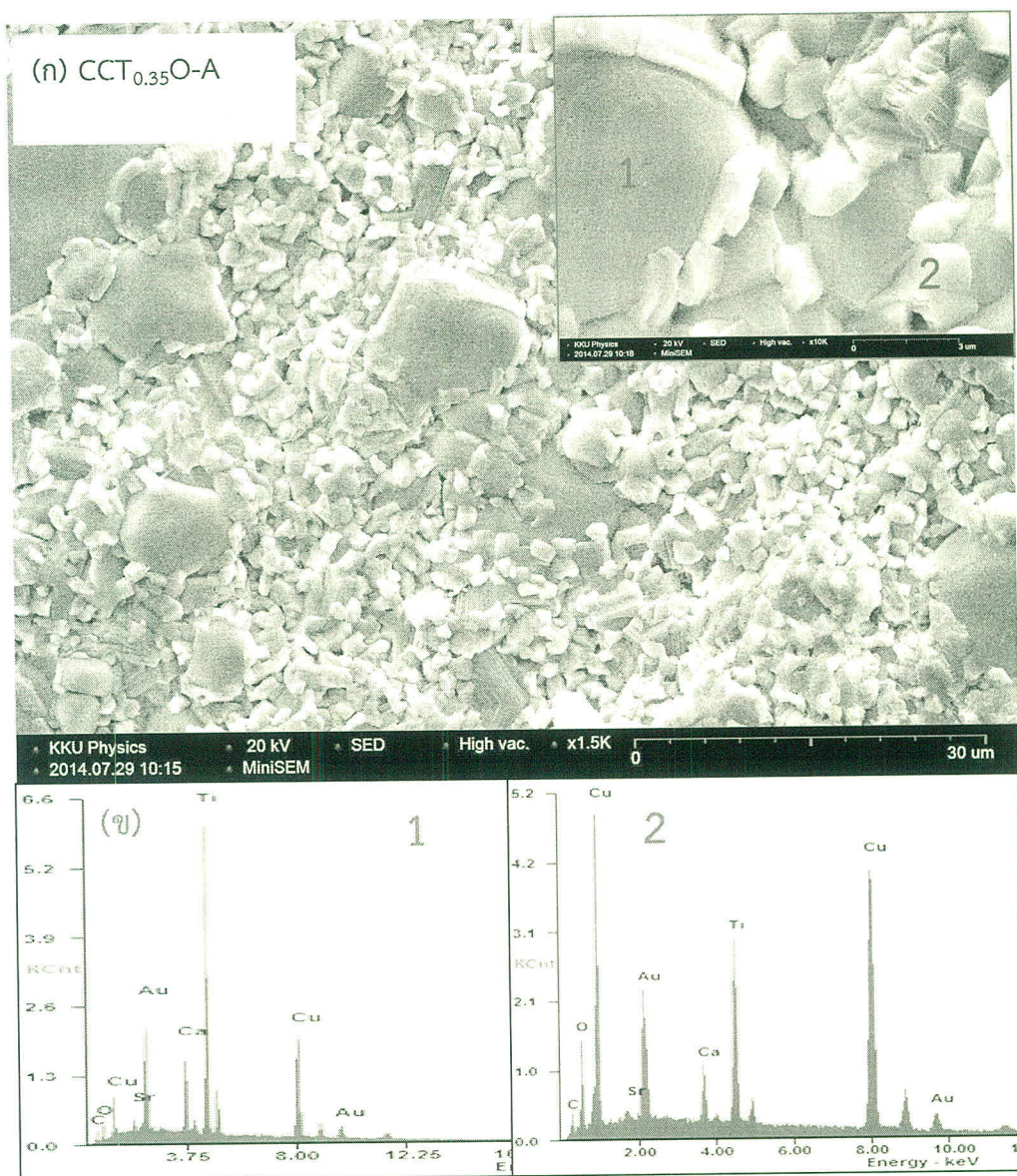
ภาพที่ 4-10 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์สำหรับวัสดุเซรามิก $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ เจือด้วย Sn (0.03, 0.06) เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลา 6 ชั่วโมง (ก, ค) และเวลา 10 ชั่วโมง (ข, ง) เปรียบเทียบกับพีคมาตรฐาน CCTO (ICSD 95714)

และการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของ วัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ เจือด้วย Sn ปริมาณ 0.03 และ 0.06 และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลาในการเผาผนึก 6 และ 10 ชั่วโมงแสดงได้ในภาพที่ 4-10 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากภาพ จากภาพที่ 4-10 (ก) จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมง $\text{CCT}_{0.35}\text{O}$ ที่เจือ Sn จะแสดงเฟสหลักของ CCTO ทุกพีค โดยจะเกิดเฟสปลอมปน (impurity) TiO_2 และ CuO สำหรับ ในวัสดุที่เจือด้วย Sn ทุกตัวอย่าง และเมื่อขยายตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2θ จาก 34 และสิ้นสุดที่ 34.6 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4-10 (ค) และ (ง) จะเห็นว่าระนาบ (220) จะเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มุม 2θ ลดลง อาจเนื่องมาจาก ปริมาณสารเจือ Sr ($r_A=2.04 \text{ \AA}$) เข้าไปแทนที่ ใน Ca ($r_A=1.84 \text{ \AA}$) ได้

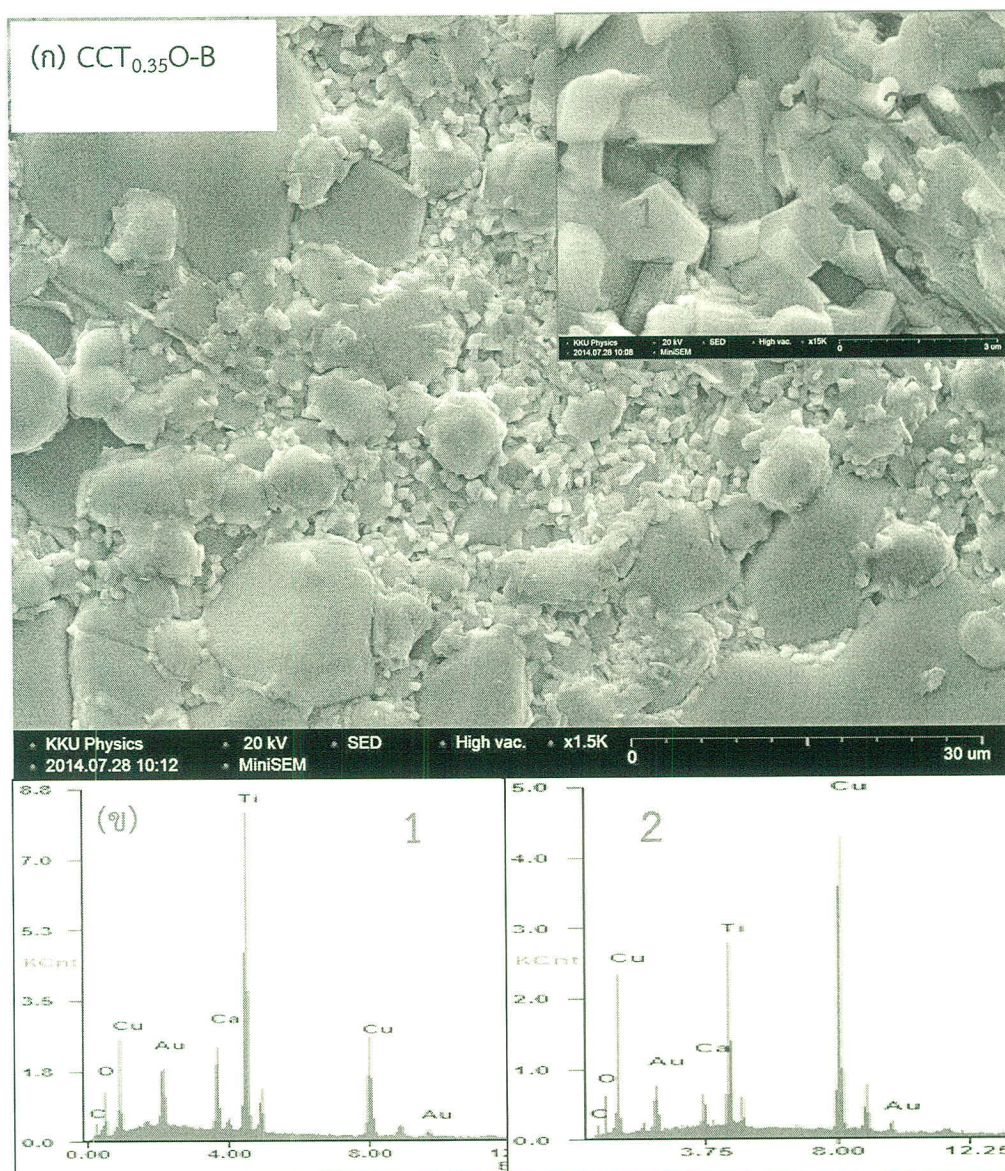
2.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดวัสดุโดยเทคนิค SEM-EDS

จากการโครงสร้างเฟสของวัสดุเซรามิก ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคโพลีเมอร์ไพโรไลซิส จะพบว่าเมื่อ ปริมาณ Ti เพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุเซรามิกที่ถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลาในการเผาผนึกที่ต่างกัน 6 และ 10 ชั่วโมง จะมีเฟสปลอมปน CuO และเฟสปลอมปน TiO₂ เกิดขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณ Ca:Cu:Ti ที่เปลี่ยนไป โดยภาพที่ 4-11 (ก) เป็นภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าวัสดุ CCT_{0.35}O-A จากภาพพบว่าลักษณะการอัดตัวของเกรนมีการอัดตัวแน่น ซึ่งแบ่งออกเป็นเกรนที่มีขนาดใหญ่และเกรนที่มีขนาดเล็กที่มีขนาด 2.15 μm แทรกกันอยู่ระหว่างเกรนใหญ่ที่มีขนาด 9.86 μm และเมื่อยิง EDS ดูที่ตำแหน่งเกรนใหญ่ (ตำแหน่งที่ 1) และบริเวณเกรนเล็ก (ตำแหน่งที่ 2) ดังแสดงในภาพแทรกพบว่าที่ตำแหน่งที่ 1 ปริมาณ Ti มากกว่า Cu ส่วนที่ตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณ Cu เพิ่มขึ้นส่วนปริมาณ Ti นั้นลดลงอนุภาคที่มีขนาดเล็กคือปริมาณ Ti ที่เหลือจากการฟอร์มเฟสเป็น CCTO และปริมาณ CuO ที่เกิดขึ้นอาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกต่ำซึ่งอาจทำให้ Cu เกิดการฟอร์มเฟส CuO ก่อนที่จะเกิด CCTO

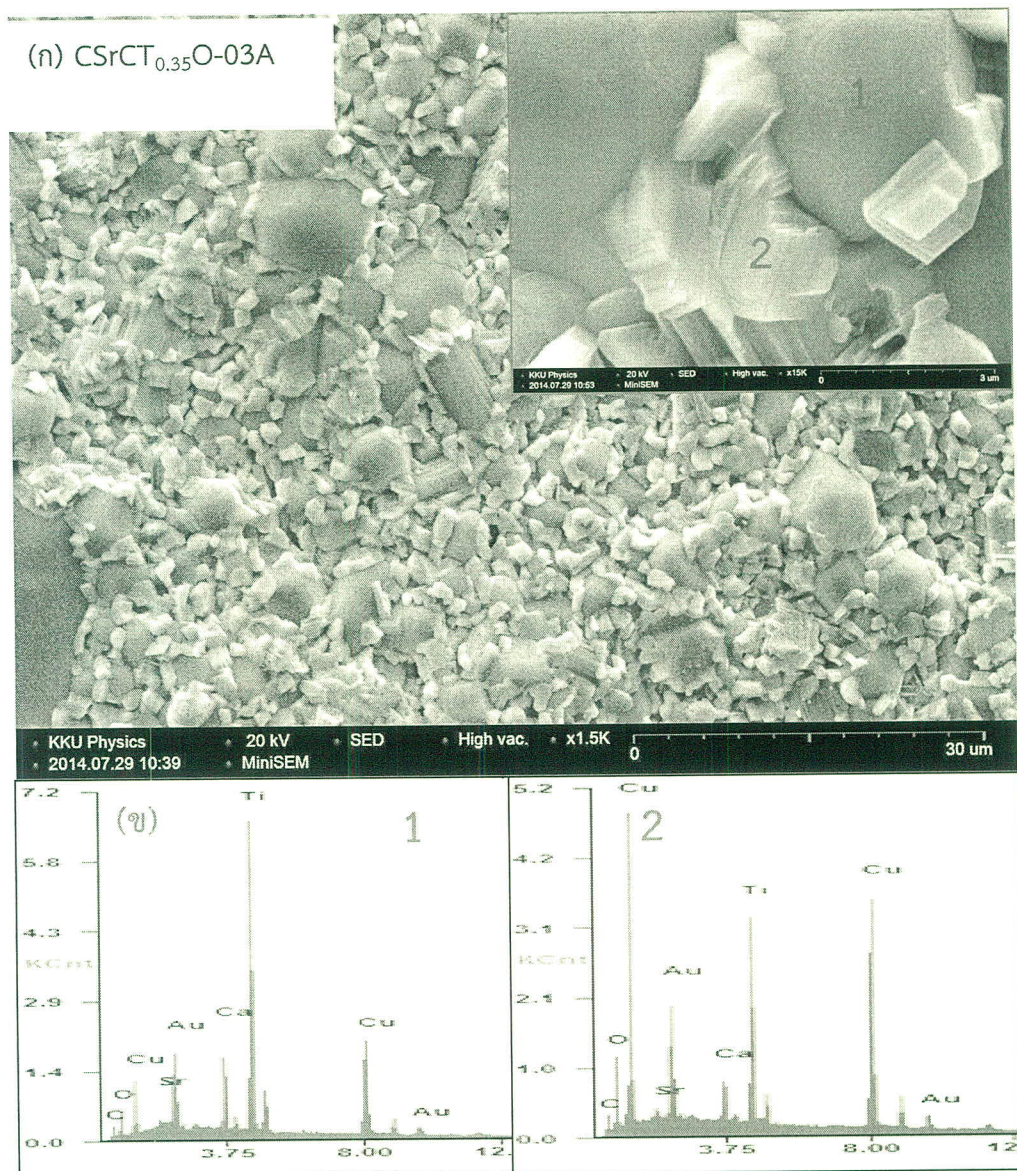
ภาพที่ 4-12 (ก) เป็นภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าวัสดุ CCT_{0.35}O-B เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลาในการเผาผนึก 10 ชั่วโมงจากภาพพบว่าลักษณะการอัดตัวของเกรนมีการอัดตัวแน่นกว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-A ซึ่งแบ่งออกเป็นเกรนที่มีขนาดใหญ่ 4.78 μm และเกรนที่มีขนาดเล็ก 1.32 μm แทรกกันอยู่ระหว่างเกรนใหญ่ โดยที่เกรนขนาดเล็กมีขนาดเล็กกว่าวัสดุ CCT_{0.35}O-A ที่ใช้เวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมงและเมื่อยิง EDS ดูที่ตำแหน่งเกรนใหญ่ (ตำแหน่งที่ 1) และบริเวณเกรนเล็ก (ตำแหน่งที่ 2) ดังแสดงในภาพแทรกพบว่าที่ตำแหน่งที่ 1 ปริมาณ Ti มากกว่า Cu ส่วนที่ตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณ Cu เพิ่มขึ้นส่วนปริมาณ Ti นั้นลดลงอนุภาคที่มีขนาดเล็กคือปริมาณ Ti ที่เหลือจากการฟอร์มเฟสเป็น CCTO และปริมาณ CuO ที่เกิดขึ้นอาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกต่ำซึ่งอาจทำให้ Cu เกิดการฟอร์มเฟส CuO ก่อนที่จะเกิด CCTO และเห็นปริมาณ Cu ที่เกรนขนาดเล็กในวัสดุ CCT_{0.35}O-B มีค่ามากกว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-A และปริมาณ Ti ในวัสดุดังกล่าวนี้ก็ลดลงด้วย



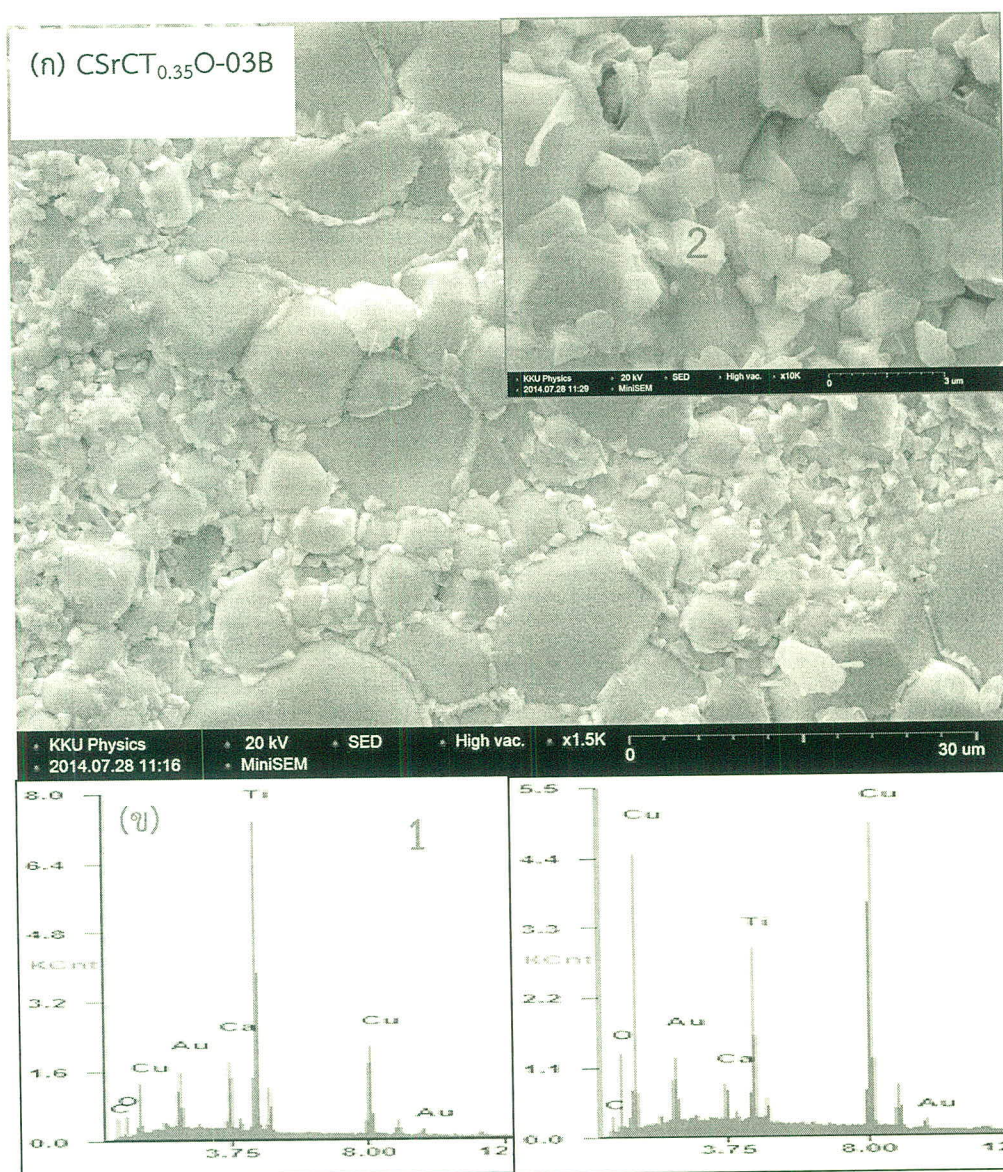
ภาพที่ 4-11 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ CCT_{0.35}O-A (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-12 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$ (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-13 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$ (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



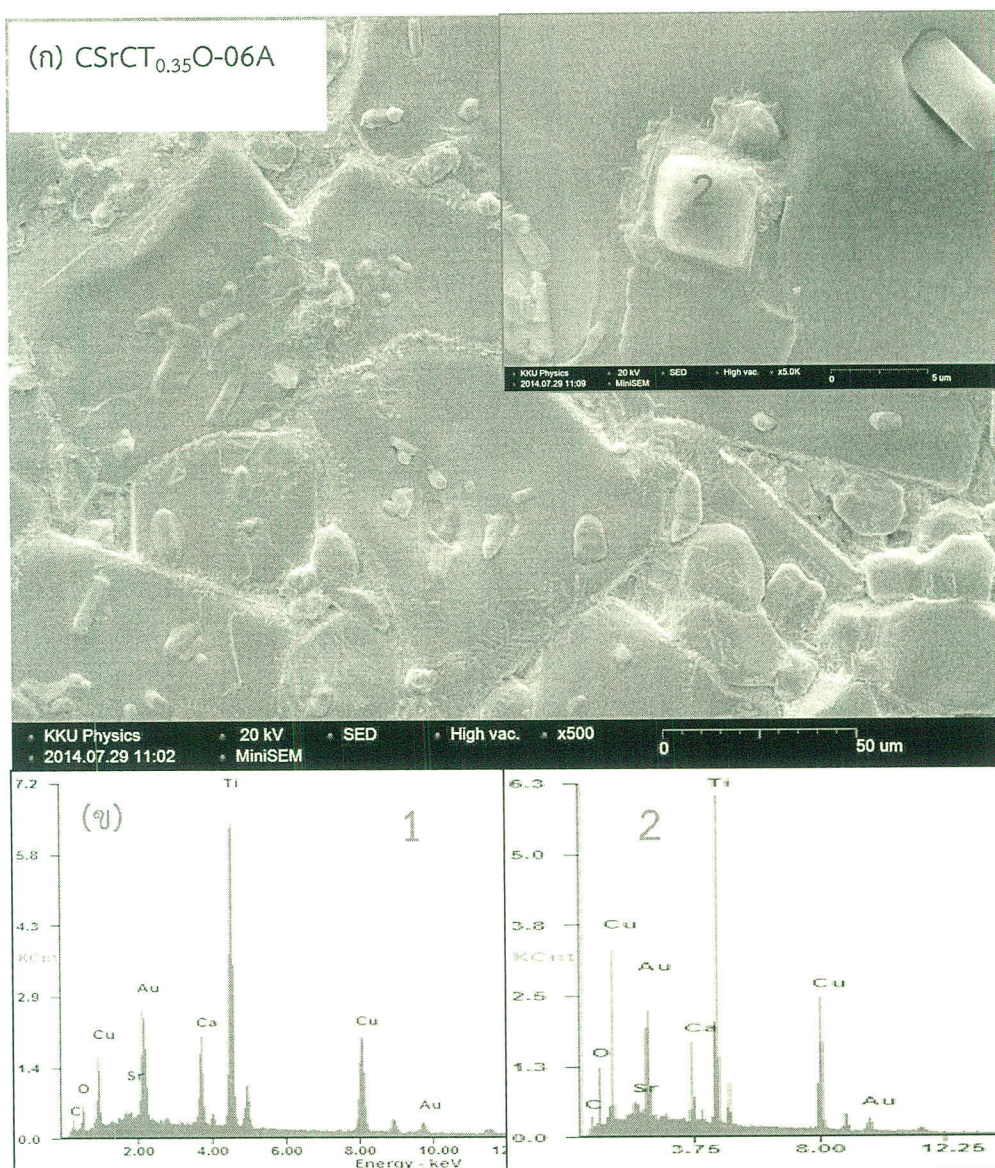
ภาพที่ 4-14 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเมื่อดัสดูที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเมื่อดัสดู CSrCT_{0.35}O-03B (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)

ภาพที่ 4-13 และภาพที่ 4-14 (ก) เป็นภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าวัสดุ CSrCT_{0.35}O-03A และ CSrCT_{0.35}O-03B ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการเจือปริมาณ Sr ที่เท่ากัน 0.03 โดยมีการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลาที่ต่างกัน 6 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ จากลักษณะทางกายภาพที่ศึกษาด้วยภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าวัสดุเซรามิกทั้งสองจะประกอบด้วยเกรนที่มีขนาดใหญ่ 3.93, 5.61 μm และมีเกรนเล็ก 1.41, 1.52 μm สำหรับวัสดุ CSrCT_{0.35}O-03A และ CSrCT_{0.35}O-03B ตามลำดับ แทรกอยู่ระหว่างเกรนใหญ่ โดยเกรนเล็ก (บริเวณที่ 2) จะมีปริมาณสารเจือ Sr มากกว่าเกรนใหญ่ (บริเวณที่

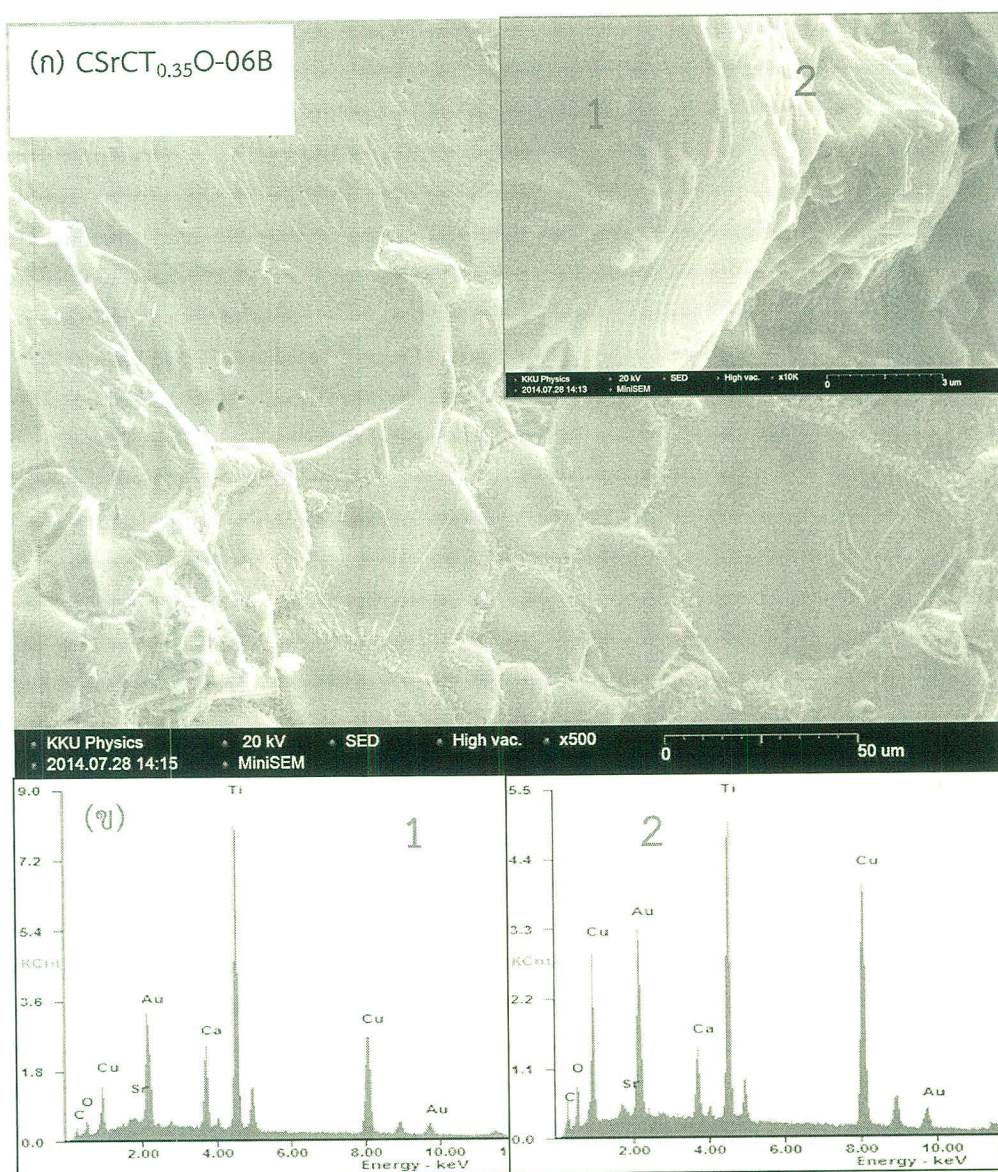
1) แสดงว่าสารเจือ Sr ที่เจือเข้าไปอาจเข้าไปฟอร์มตัวเกิดเป็นองค์ประกอบใหม่ขึ้นมา และเมื่อมีการเพิ่มเวลาในการเผาผนึกให้สูงขึ้นจะเห็นว่าลักษณะการอัดตัวของเกรนมีการอัดตัวแน่นกว่าและขนาดเกรนเล็กๆ ที่เกิดขึ้นมากๆ ก็มีปริมาณลดลงในวัสดุเซรามิก $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03B}$ และเมื่อยิง EDS บริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 ดังแสดงในภาพแทรกที่ 4-14 จะเห็นว่าบริเวณที่ 2 มีปริมาณ CuO ที่เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณที่ 1 และปริมาณ Ti ก็ลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$

สำหรับการศึกษาผลของปริมาณสารเจือ Sr เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 โดยใช้เวลาในการเผาผนึกที่ต่างกันเป็น 6 และ 10 ชั่วโมง ($\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06B}$) ต่อลักษณะทางกายภาพแสดงได้ในภาพที่ 4-15 และ 4-16 (ก) จากภาพจะเห็นว่าเมื่อเจือ Sr ปริมาณ 0.06 ขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับปริมาณสารเจือ 0.03 แสดงว่าเมื่อปริมาณสารเจือ Sr เพิ่มจาก 0.03 เป็น 0.06 ปริมาณ Sr อาจทำให้วัสดุที่เตรียมได้สามารถเกิดการฟอร์มเฟสได้ดีขึ้น และเมื่อยิง EDS ดูภายในเกรนที่มีขนาดใหญ่ (บริเวณที่ 1) จะเห็นได้ว่าปริมาณ Cu จะมีปริมาณมากกว่าบริเวณขอบเกรนที่มีขนาดเล็ก (บริเวณที่ 2) โดยจากการหาขนาดของเกรนขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 71.12, 37.46 μm และมีเกรนเล็ก 9.86, $_\mu\text{m}$ สำหรับวัสดุ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06B}$ ตามลำดับ

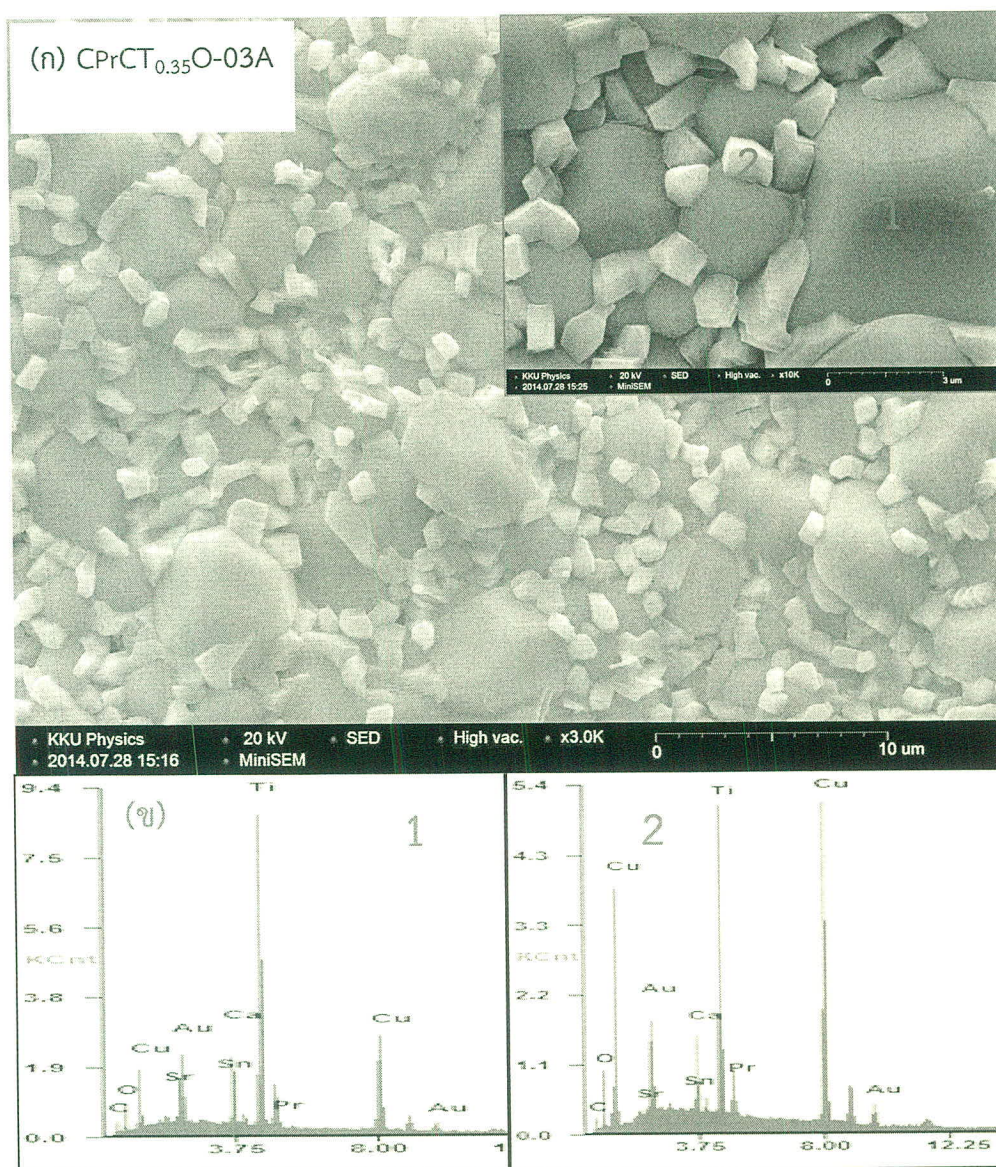
ภาพที่ 4-17 และภาพที่ 4-18 (ก) เป็นภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าวัสดุ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03A}$ และ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03B}$ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการเจือปริมาณ Pr ที่เท่ากัน 0.03 โดยมีการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลา 6 และ 10 ชั่วโมง จากลักษณะทางกายภาพที่ศึกษาด้วยภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าวัสดุเซรามิกทั้งสองจะประกอบด้วยเกรนที่มีขนาดใหญ่ เท่ากับ 1.24, 4.48 μm และมีเกรนเล็ก 1.29, 1.27 μm ที่มีแทรกอยู่ระหว่างเกรนใหญ่ โดยเกรนเล็ก (บริเวณที่ 2) จะมีปริมาณสารเจือ Pr มากกว่าเกรนใหญ่ (บริเวณที่ 1) แสดงว่าสารเจือ Sr ที่เจือเข้าไปอาจเข้าไปฟอร์มตัวเกิดเป็นองค์ประกอบใหม่ขึ้นมา และเมื่อมีการเพิ่มเวลาในการเผาผนึกให้สูงขึ้นจะเห็นว่าลักษณะการอัดตัวของเกรนมีการอัดตัวแน่นกว่าและขนาดเกรนเล็กๆ ที่เกิดขึ้นมากๆ ก็มีปริมาณลดลงในวัสดุเซรามิก $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03B}$ และเมื่อยิง EDS บริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 ดังแสดงในภาพแทรกที่ 4-17 จะเห็นว่าบริเวณที่ 2 มีปริมาณ CuO ที่เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณที่ 1 และปริมาณ Ti ก็ลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03A}$



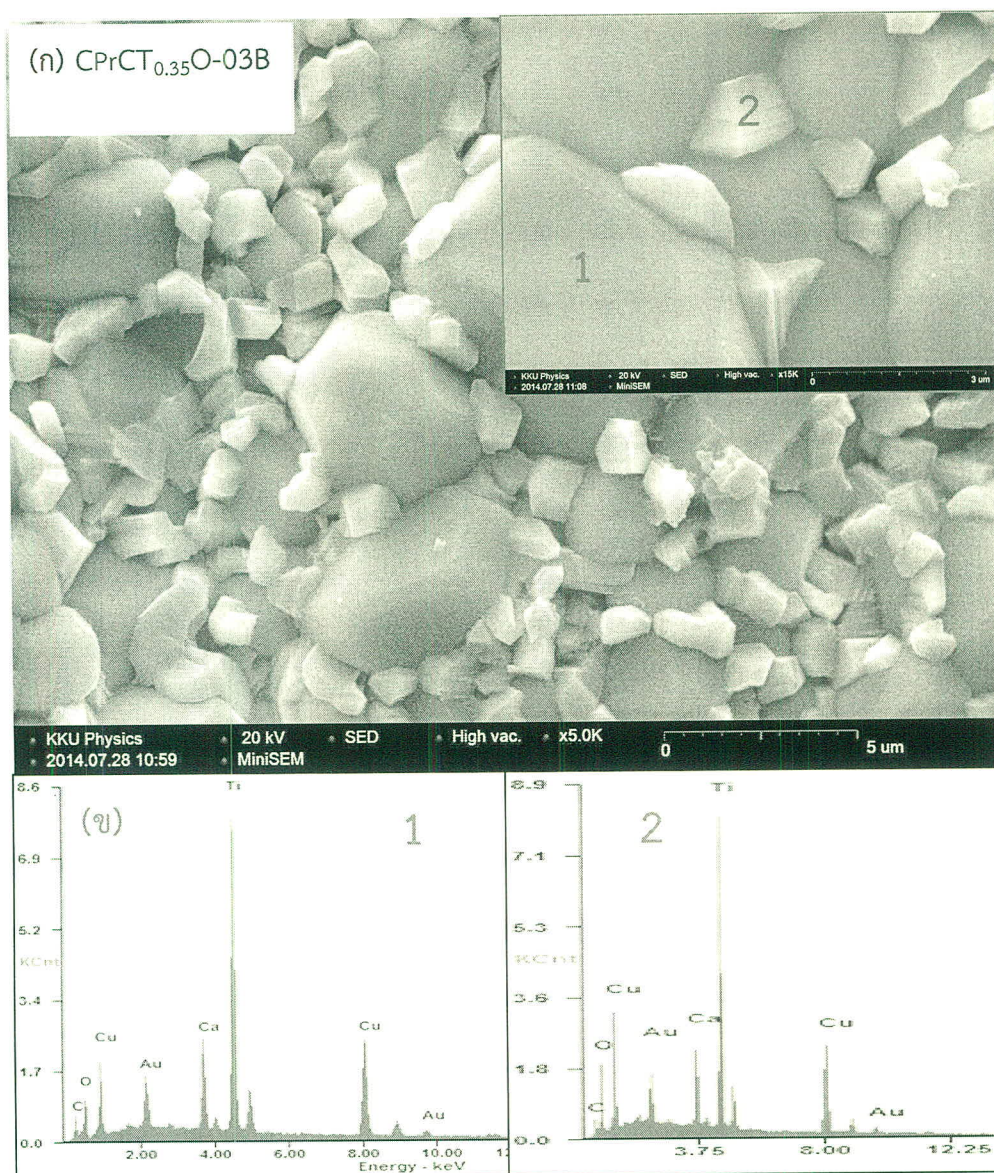
ภาพที่ 4-15 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06A}$ (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



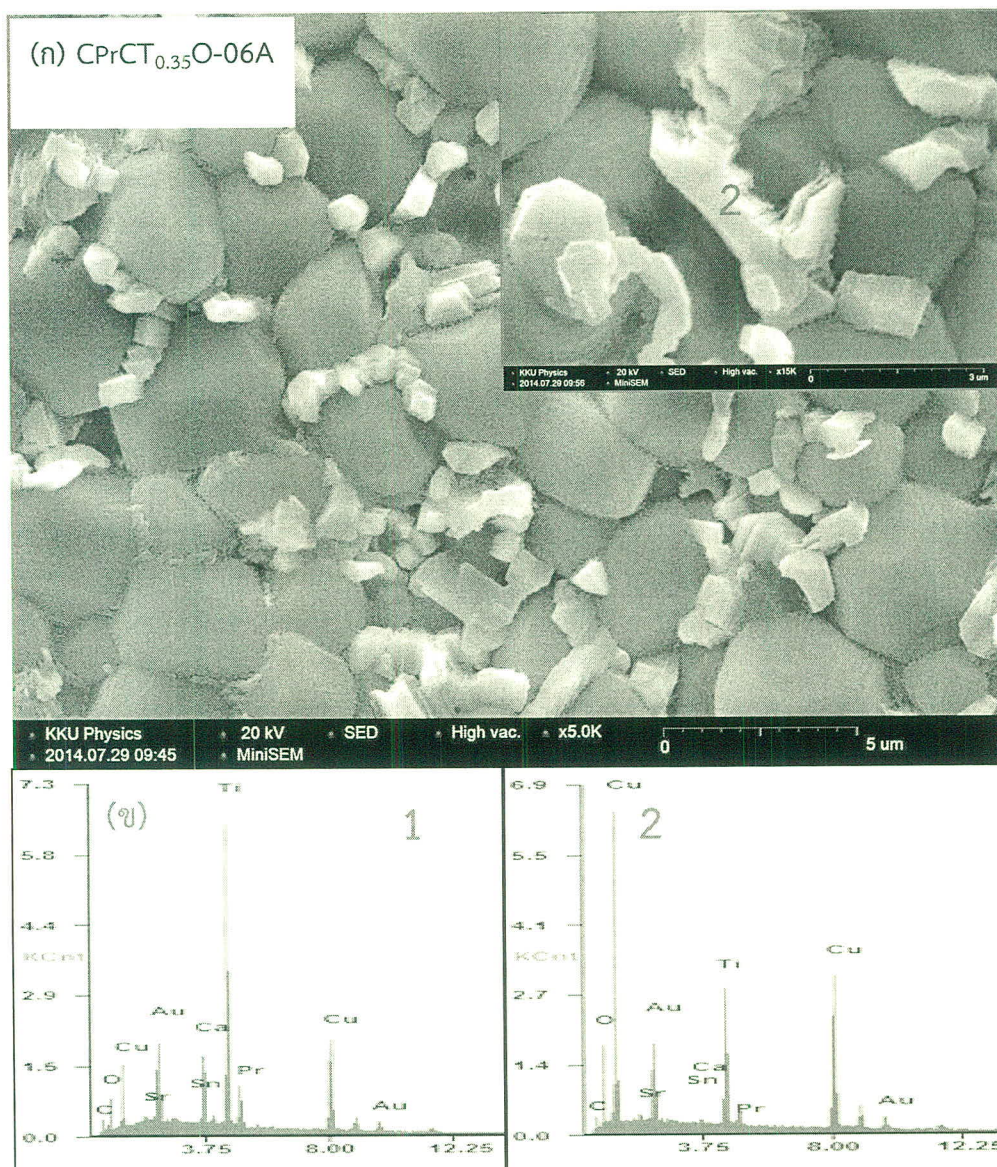
ภาพที่ 4-16 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ CSrCT_{0.35}O-06B (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



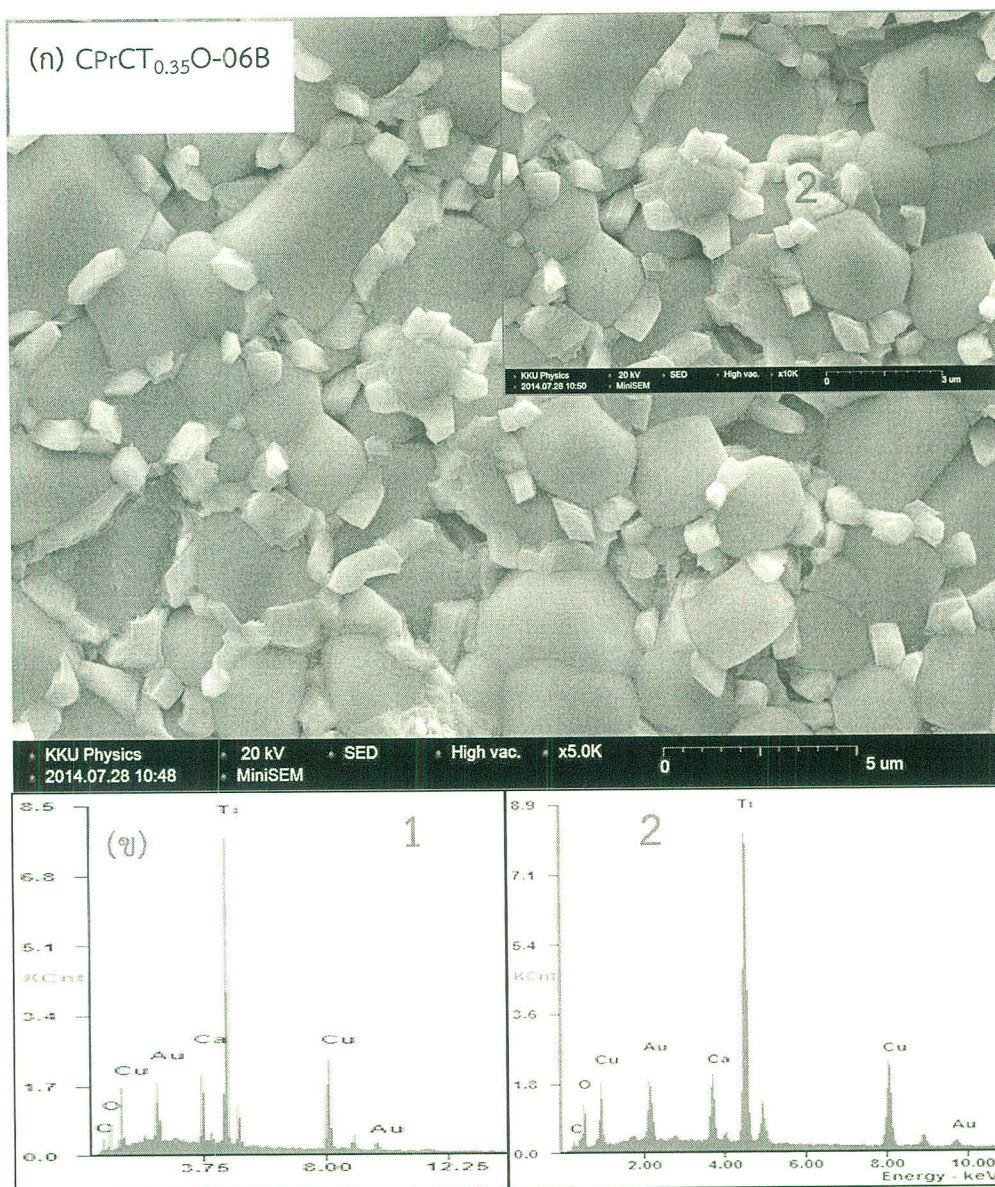
ภาพที่ 4-17 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ควัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ควัสดุ CPrCT_{0.35}O-03A (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-18 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ CPrCT_{0.35}O-03B (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-19 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ CPrCT_{0.35}O-06A (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-20 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ CPPrCT_{0.35}O-06B (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)

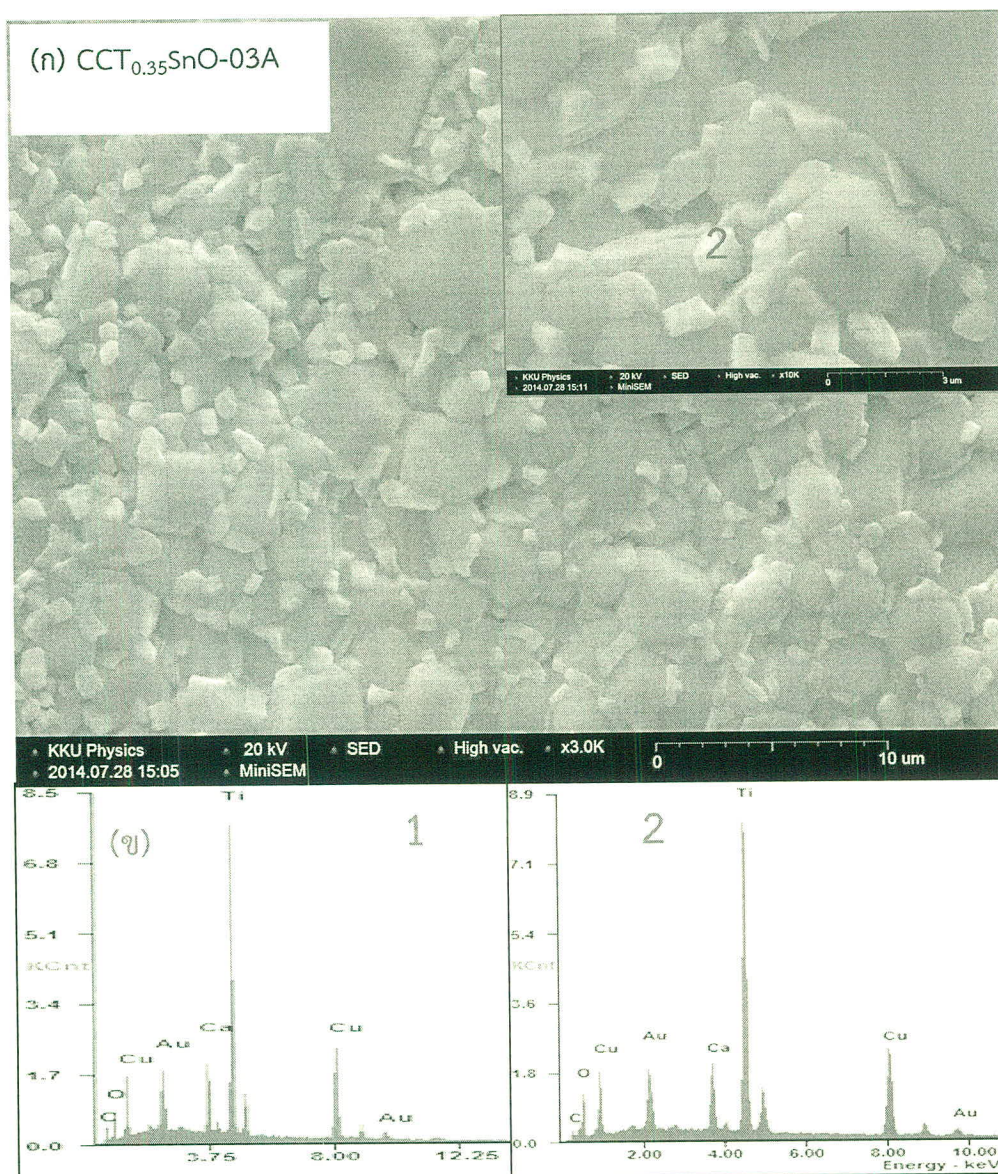
สำหรับการศึกษาผลของปริมาณสารเจือ Pr เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 โดยใช้เวลาในการเผาขึ้นที่ต่างกันเป็น 6 และ 10 ชั่วโมง (CSrCT_{0.35}O-06A และ CSrCT_{0.35}O-06B) ต่อลักษณะทางกายภาพแสดงได้ในภาพที่ 4-19 และ 4-20 (ก) จากภาพจะเห็นว่าเมื่อเจือ Pr ปริมาณ 0.06 ขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่กว่าประมาณ 3.42, 3.1 μm และ เกรนขนาดเล็ก 1.03, 1.08 μm เมื่อเทียบกับปริมาณสารเจือ 0.03 แสดงว่าเมื่อปริมาณสารเจือ Pr เพิ่มขึ้นจาก 0.03 เป็น 0.06 ปริมาณ Pr อาจ

ทำให้วัสดุที่เตรียมได้สามารถเกิดการฟอร์มเฟสได้ดีขึ้น และเมื่อยิง EDS ดูภายในเกรนที่มีขนาดใหญ่ (บริเวณที่ 1) จะเห็นได้ว่าปริมาณ Cu จะมีปริมาณมากกว่าบริเวณขอบเกรนที่มีขนาดเล็ก (บริเวณที่ 2) จากผลของปริมาณสารเจือที่เจือเข้าไปอาจมีผลต่อความต้านทานที่ขอบเกรนซึ่งดูได้จากปริมาณสนามไฟฟ้าที่ทำให้วัสดุที่เตรียมได้สูญเสียความต้านทานดังจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

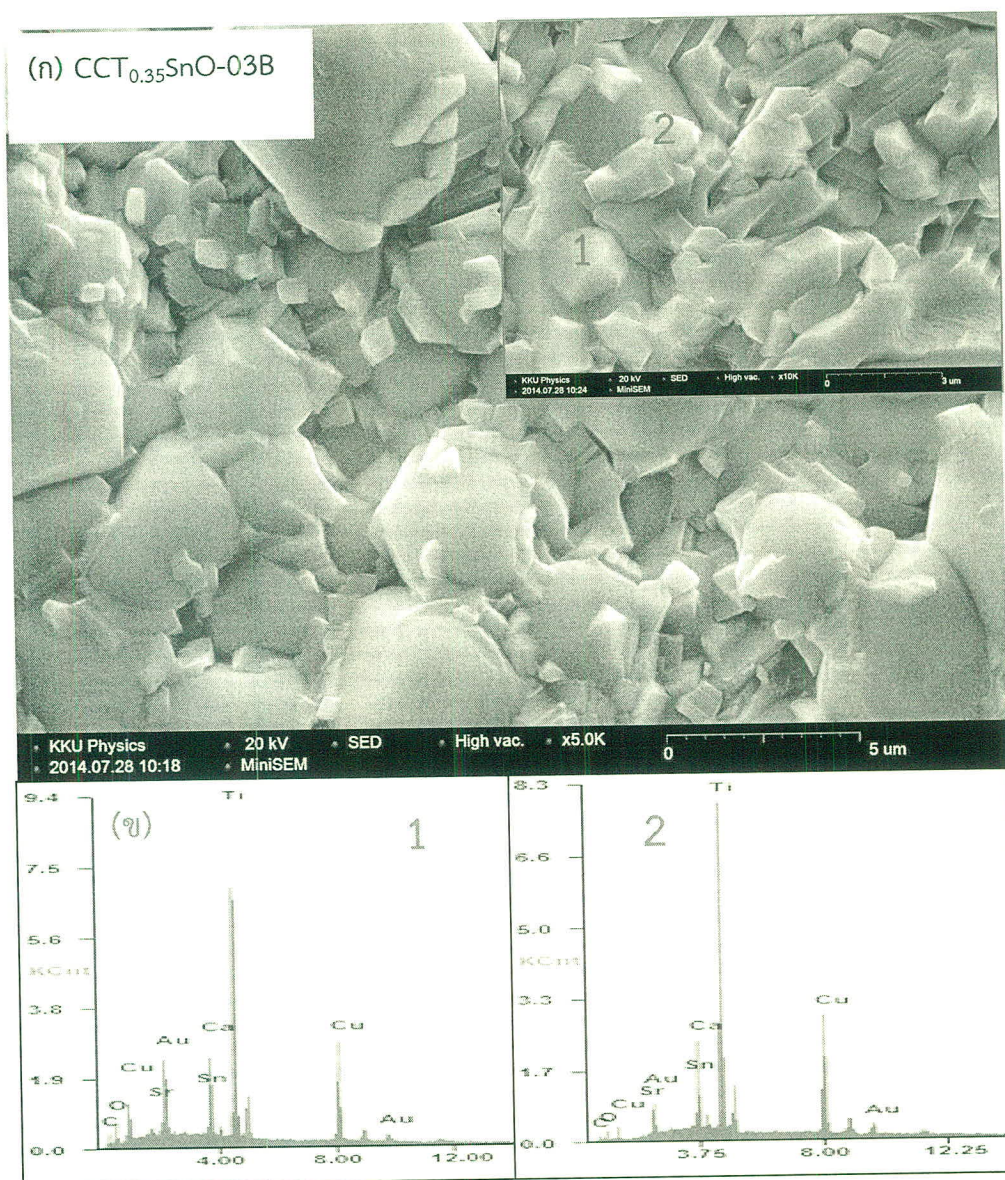
การศึกษาภาพถ่ายผิวหน้าด้วยเทคนิค SEM ในวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O เจือด้วย Sn ปริมาณ 0.03 ที่ตำแหน่ง Ti โดยใช้เวลาในการเผาขึ้นที่ต่างกันเป็น 6 และ 10 ชั่วโมง (CCT_{0.35}SnO-03A และ CCT_{0.35}SnO-03B) ต่อลักษณะทางกายภาพแสดงได้ในภาพที่ 4-21 และ 4-22 (ก) จากภาพจะเห็นว่าเมื่อเจือ Sn ปริมาณ 0.03 ขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ประมาณ 2.31, 4.2 μm และ เกรนขนาดเล็ก 1.16, 1.04 μm เมื่อยิง EDS ดูภายในเกรนที่มีขนาดใหญ่ (บริเวณที่ 1) จะเห็นได้ว่าปริมาณ Cu จะมีปริมาณมากกว่าบริเวณขอบเกรนที่มีขนาดเล็ก (บริเวณที่ 2) ดังแสดงในภาพแทรก จะเห็นว่าประกอบด้วยสารเจือ Ca, Cu, Ti และ Sn ที่เจือเข้าไปดังแสดงได้ใน ภาพที่ 4-21 และ 4-22 (ข) ซึ่งเมื่อเจือ Sn ด้วยปริมาณ 0.06 ขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ประมาณ 3.95, 4.32 μm และ เกรนขนาดเล็ก 1.11, 0.69 μm สำหรับวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}SnO-06A และ CCT_{0.35}SnO-06B ดังแสดงในภาพที่ 4-23 และ 4-24 (ก) และเมื่อศึกษาปริมาณสารเจือ Sn ที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุเซรามิกทั้งจะประกอบด้วยองค์ประกอบของธาตุหลัก Ca, Cu, Ti และ Sn โดยปริมาณของ Sn ที่เจือเข้าไปนั้นมีมากกว่าบริเวณขอบเกรน (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ 1 จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้ จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มปริมาณ T ขึ้นจากเดิม เท่ากับ 0.35 จะทำให้เกิดเฟส TiO₂ และ CuO เนื่องจากว่าอัตราส่วนของ Ca:Cu:Ti นั้นเปลี่ยนไปเป็น 1:3:4.35 ทำให้มี Ti ที่เหลือจากการไปฟอร์มเฟส เป็น CCTO และวัสดุเซรามิกตัวอย่างที่ถูกเตรียมขึ้นทุกตัวจะมีเกรนขนาดใหญ่ และเกรนขนาดเล็กที่แทรกอยู่ระหว่างเกรนใหญ่ ซึ่งเมื่อศึกษาองค์ประกอบของเกรนขนาดเล็กจะเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ สารเจือ Sr, Pr และ Sn เนื่องจากสารเจือเหล่านี้ไม่สามารถเจือเข้าไปได้หมดจึงเกิดเป็นเฟสไม่บริสุทธิ์เกิดขึ้น โดยขนาดของเกรนที่มีขนาดใหญ่ (Large grain) และเกรนที่มีขนาดเล็ก (small grain) ทุกวัสดุเซรามิกที่ทำการศึกษาได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงขนาดของเกรนเฉลี่ย ขนาดใหญ่ (Large grain) และเกรนเล็ก (Small grain) ในวัสดุเซรามิกตัวอย่าง ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีสารละลายโพลิเมอร์ไพโรไลซิส

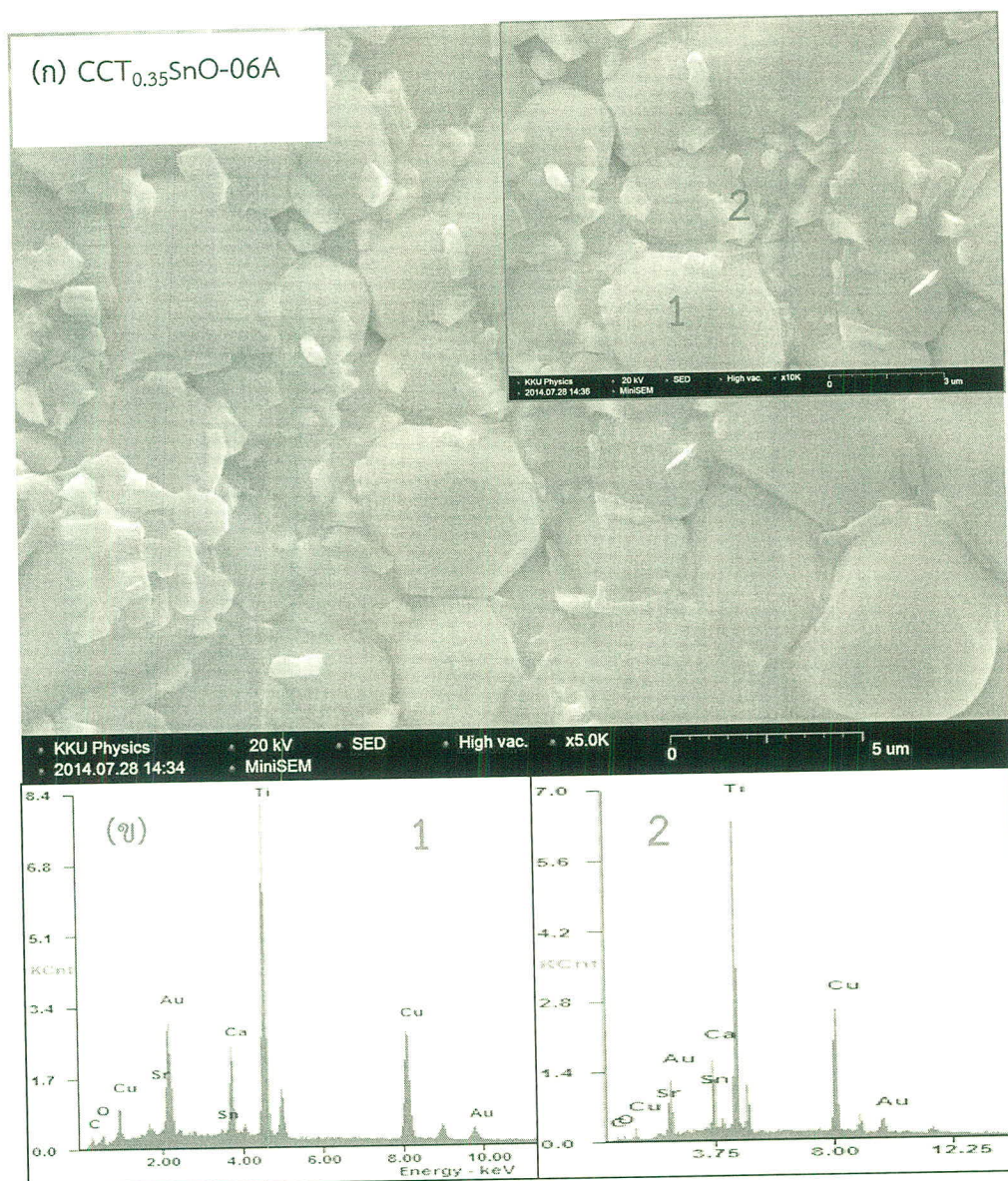
ตัวอย่าง	ขนาดเกรนเฉลี่ย	
	เกรนใหญ่ (μm)	เกรนเล็ก (μm)
$\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$	9.86	2.15
$\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$	4.26	1.41
$\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06A}$	71.12	9.86
$\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03A}$	3.84	1.24
$\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-06A}$	3.42	1.03
$\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-03A}$	2.31	1.16
$\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-06A}$	3.95	1.11
$\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$	4.78	1.32
$\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03B}$	5.61	1.52
$\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06B}$	37.46	-
$\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03B}$	4.48	1.39
$\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-06B}$	3.10	1.08
$\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-03B}$	4.20	1.04
$\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-06B}$	3.68	0.59



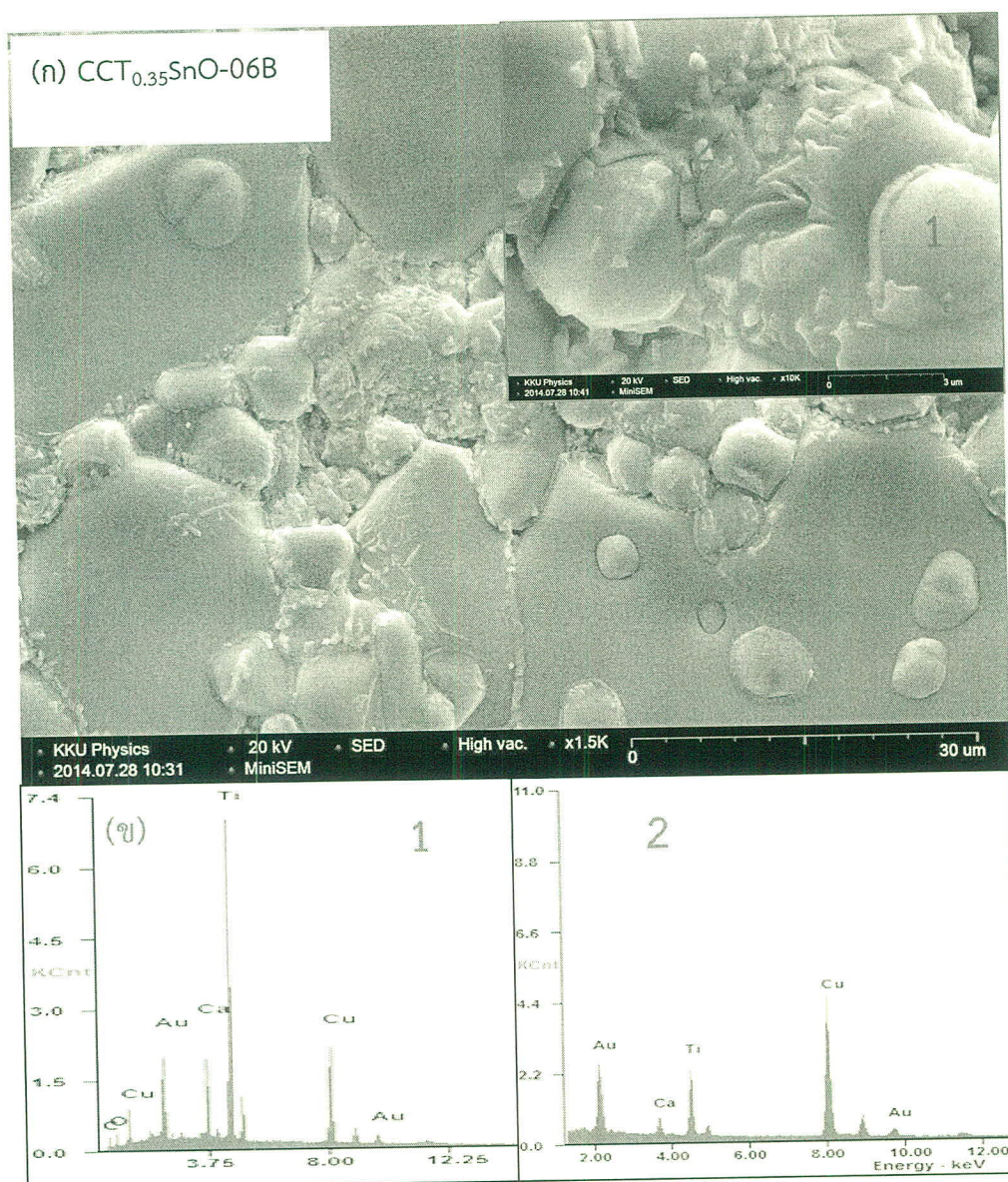
ภาพที่ 4-21 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ดวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ดวัสดุ CCT_{0.35}SnO-03A (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-22 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเมื่อดัสดูที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเมื่อดัสดู CCT_{0.35}SnO-03B (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-23 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ควัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ควัสดุ CCT_{0.35}SnO-06A (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)



ภาพที่ 4-24 แสดงภาพถ่ายพื้นที่ผิวหน้า โดยเทคนิค SEM ของเม็ควัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ของเม็ควัสดุ CCT_{0.35}SnO-06B (ก) (ภาพแทรก) แสดงตำแหน่งที่ยิง EDS โดยสเปกตรัมของตำแหน่งที่ยิง EDS แสดงในภาพ (ข)

3. การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริก

3.1 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าแทนเจนต์การสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)

เนื่องจากความเป็นจริงในการนำวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไปใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ ต้องใช้งานที่อุณหภูมิและความถี่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ในวัสดุที่เตรียมได้ในช่วงความถี่จาก 100 Hz-1MHz

และวัดที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 °C) โดยเครื่องมือที่ใช้ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในการทดลองนี้ วัดค่าออกมาเป็นค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan\delta$) และค่าความจุไฟฟ้า (C) จากค่าทั้งสองที่วัดได้จาก เครื่องมือนำมาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุ CCTO ที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้สมการที่ (4-1)

$$\varepsilon' = \frac{C_p d}{\varepsilon_0 A} \quad (4-1)$$

โดยที่ ε' คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

C_p คือค่าความจุที่วัดได้โดยใช้เครื่องมือ

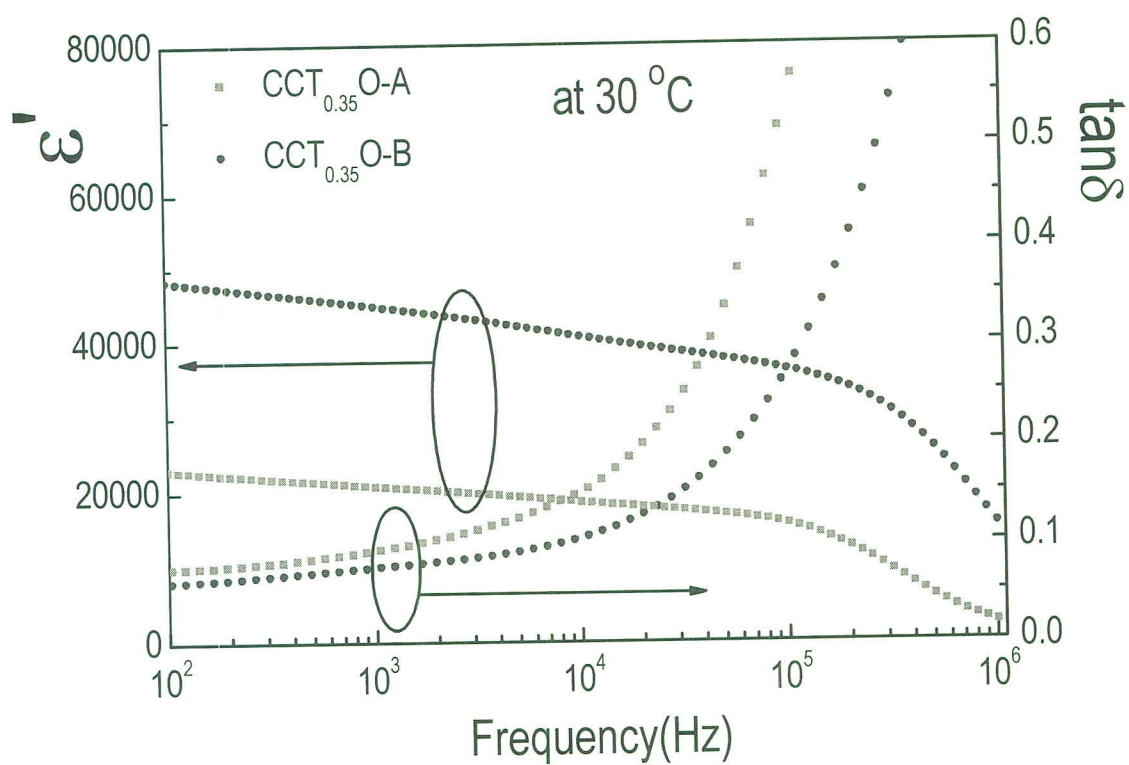
A คือพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

D คือความหนาของวัสดุ

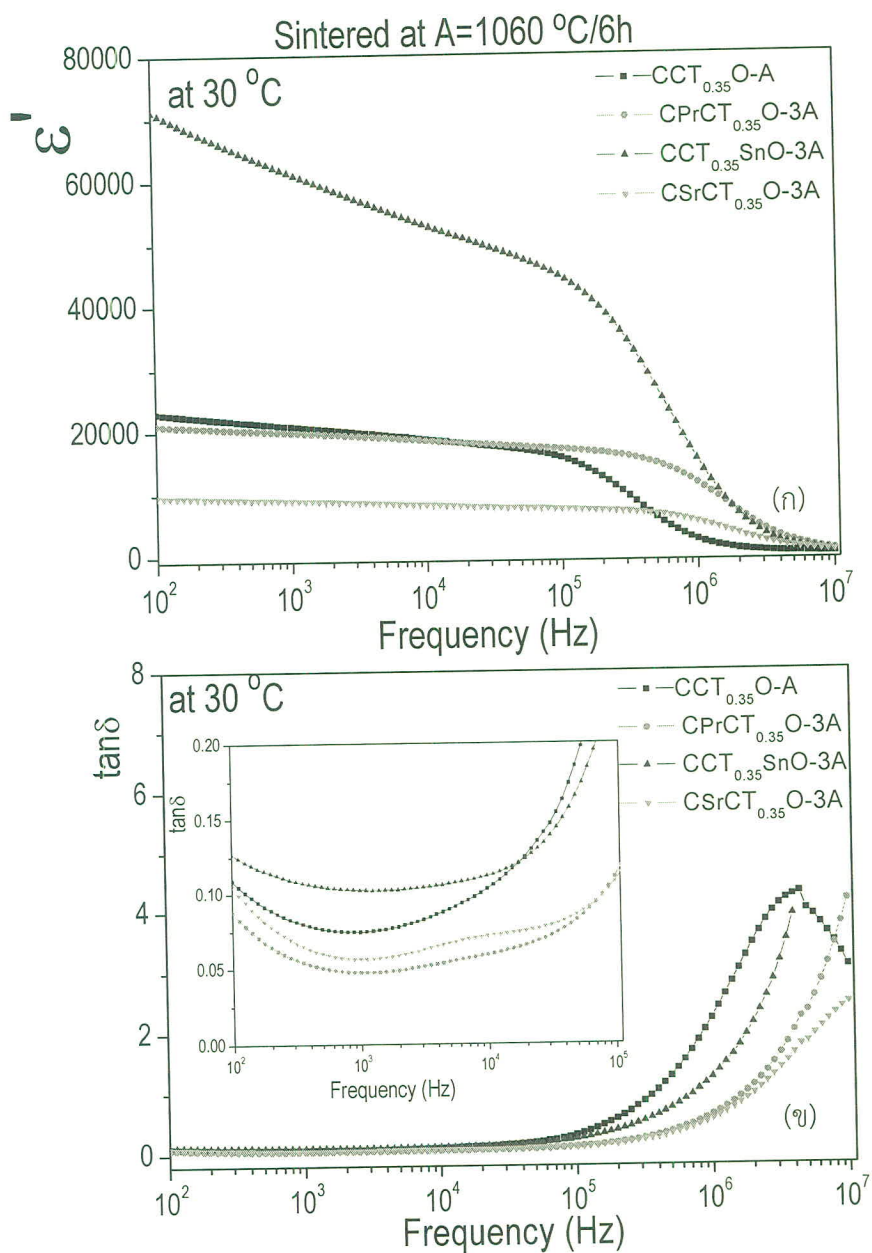
ε_0 คือค่าไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε') ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4-1) เพื่อเป็นการพิจารณาผลของค่าไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ นำข้อมูลค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่คำนวณได้ เขียนกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่ที่เปลี่ยนแปลง จาก 100 Hz-1MHz ดังแสดงในภาพที่ 4-25

ภาพที่ 4-25 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε') และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan\delta$) กับความถี่ในช่วง 100 Hz-1MHz ของวัสดุ CCT_{0.35}O ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลา 6 และ 10 ชั่วโมง (CCT_{0.35}O-A และ CCT_{0.35}O-B) จากกราฟจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε') มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความถี่จาก 100Hz-0.1MHz และที่ความถี่ 1kHz ค่า ε' จะมีค่าเท่ากับ 44,999.83 และ 20,874.38 และ ε' จะลดลงทันทีทันใดในช่วง 0.1-1MHz และเกิดเวลาในการผ่อนคลาย (Relaxation time) ที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่งและจะสัมพันธ์กับค่า $\tan\delta$ ที่เพิ่มขึ้นในกราฟด้านขวามือ โดยที่ค่า $\tan\delta$ มีค่าเท่ากับ 0.060 และ 0.074 สำหรับวัสดุ CCT_{0.35}O-B มากกว่าวัสดุ CCT_{0.35}O-A ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุ CCT_{0.35}O-B มากกว่าวัสดุ CCT_{0.35}O-A ประมาณ 2 เท่า ส่วนค่า $\tan\delta$ ในวัสดุ CCT_{0.35}O-B มีค่าน้อยกว่าวัสดุ CCT_{0.35}O-A ที่ความถี่ 1kHz ค่านี้อาจมีผลลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันในวัสดุ CCT_{0.35}O-B และ CCT_{0.35}O-A อาจเป็นผลเนื่องจากขนาดของเกรนขนาดใหญ่ และขนาดของเกรนขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 4-11 และ 4-12 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาผนึกมากขึ้น (จาก 6 เป็น 10 ชั่วโมง) ปริมาณของเกรนเล็กนั้นสามารถแทรกเข้าไประหว่างเกรนใหญ่ได้มากกว่า และมีความหนาแน่นของเกรนที่มีขนาดใหญ่มากกว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-A ดังนั้นเมื่อค่าความต้านทานของเกรนที่เพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของเกรนที่มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจึงทำให้วัสดุ CCT_{0.35}O-B มีค่าไดอิเล็กตริกที่มากกว่าและค่า $\tan\delta$ ที่น้อยกว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-A



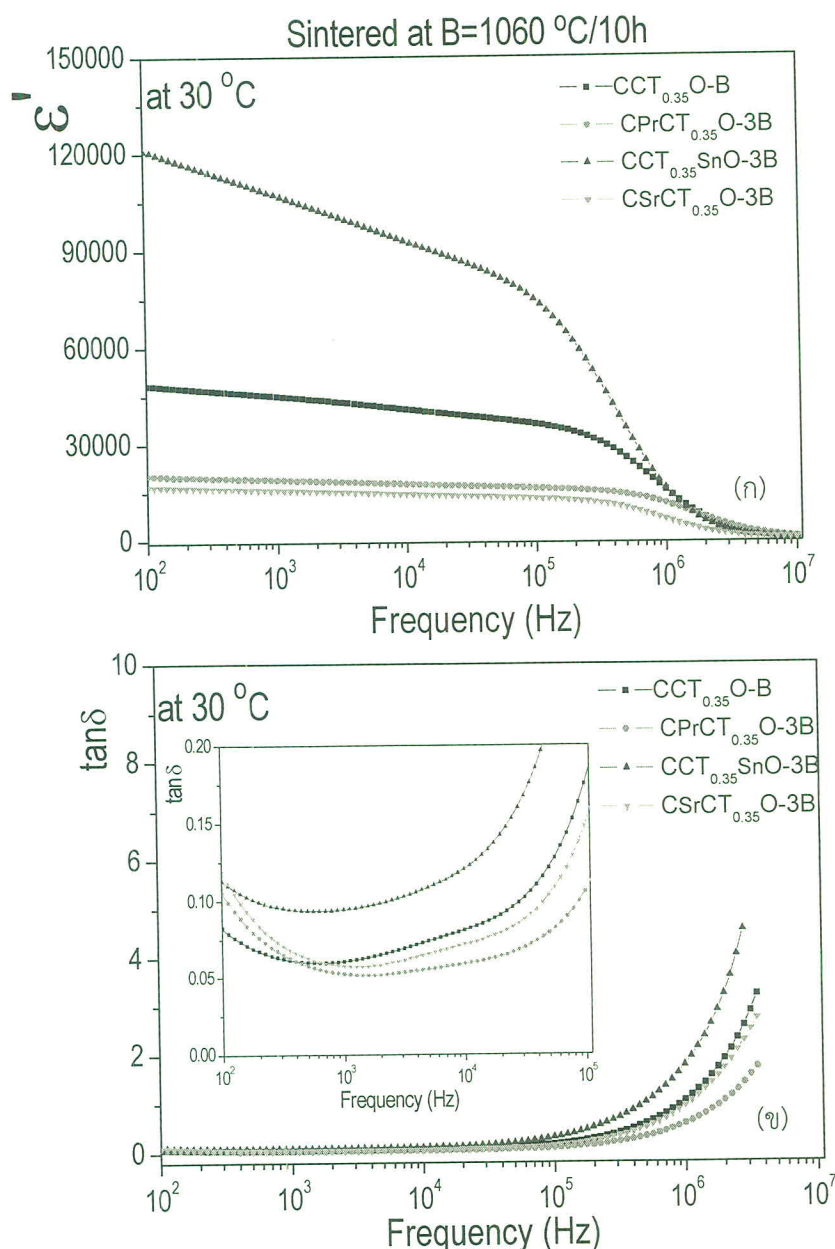
ภาพที่ 4-25 การเปลี่ยนแปลงความถี่ของค่า ϵ' และ $\tan \delta$ สำหรับวัสดุ CCT_{0.35}O-A และ CCT_{0.35}O-B ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)



ภาพที่ 4-26 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่า (ก) ϵ' และ (ข) $\tan\delta$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-3A}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-3A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-3A}$ ที่อุณหภูมิห้อง ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

ภาพที่ 4-26 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan\delta$) กับความถี่ในช่วง 100 Hz - 10 MHz ของวัสดุเซรามิกที่ถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยเวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมง สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-3A}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-3A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-3A}$ จากภาพจะเห็นว่า เมื่อสารเจือเท่ากับ 0.03 เท่ากัน จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 kHz มีค่าเท่ากับ 18675.24, 18480.56, 52976.7 และ 8247.272 และค่า $\tan\delta$ มี

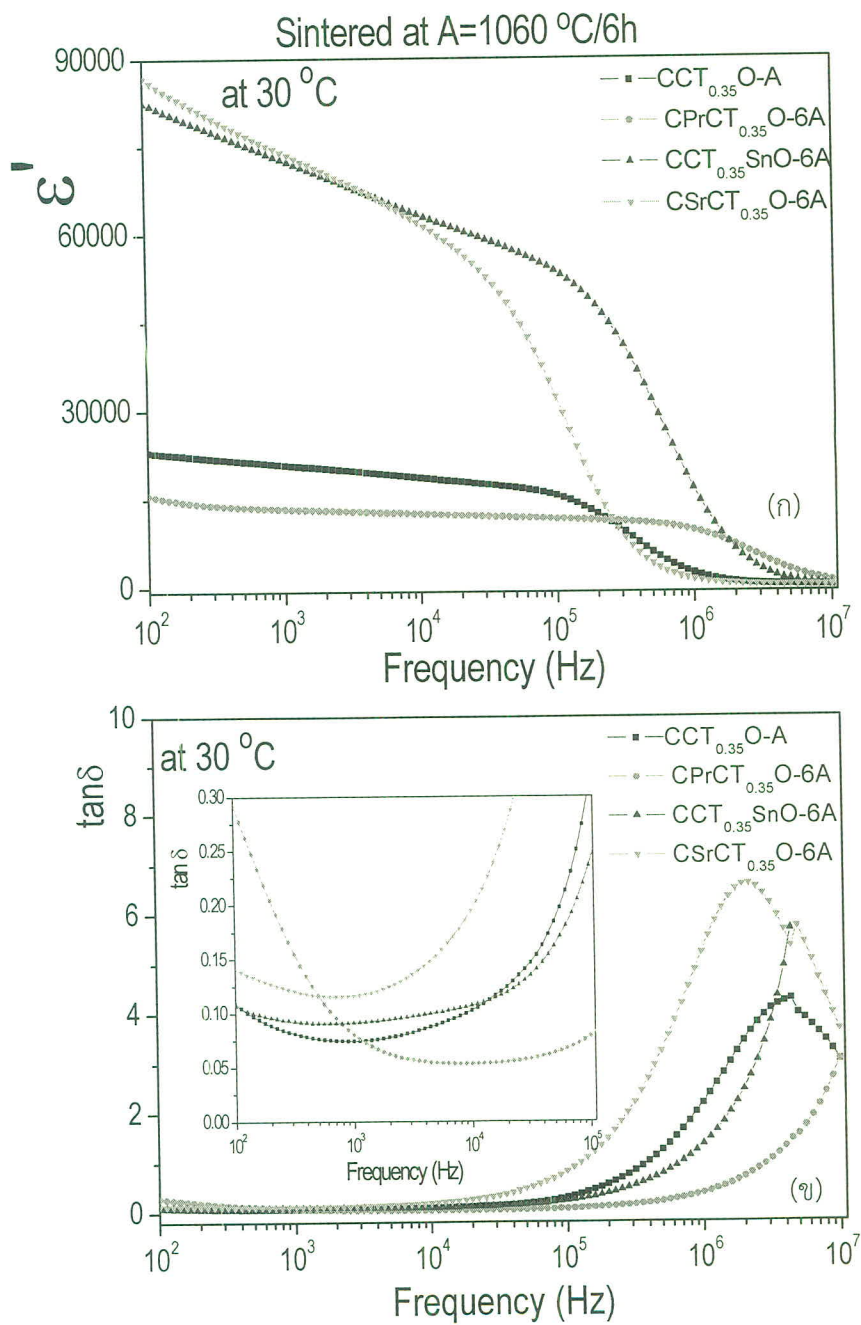
ค่าเท่ากับ 0.102901, 0.059153, 0.111637 และ 0.071484 สำหรับวัสดุเซรามิก $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03A}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-03A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$ ตามลำดับ จากภาพจะเห็นว่าวัสดุเซรามิก $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$ ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก มากที่สุดและมีค่า $\tan\delta$ เท่ากับ 0.071484 จะเห็นได้ว่าสาเหตุการมีค่าไดอิเล็กตริกสูงในวัสดุนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการมีเกรนที่มีขนาดใหญ่ในวัสดุ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$



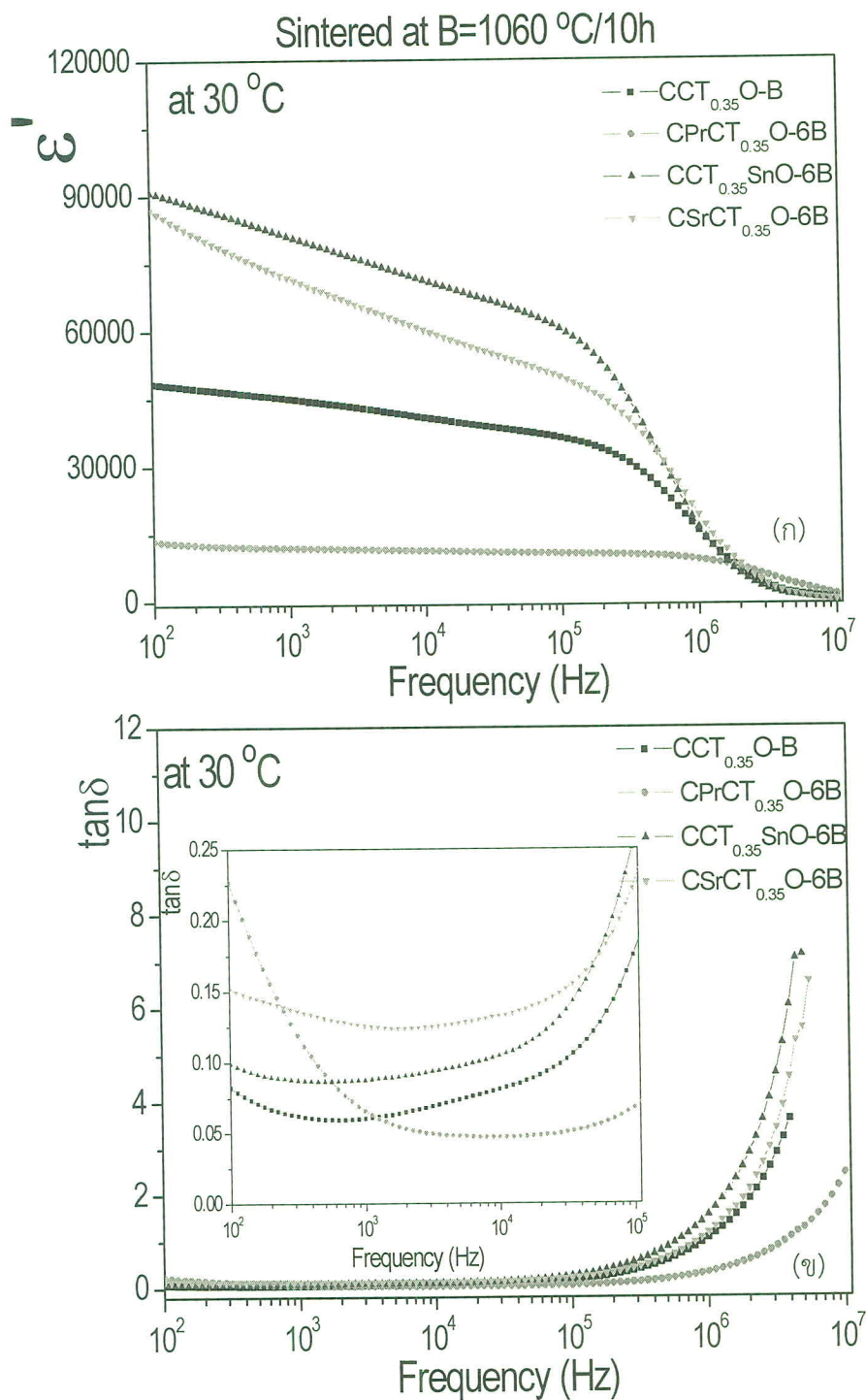
ภาพที่ 4-27 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่า (ก) ϵ' และ (ข) $\tan\delta$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03B}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-03B}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03B}$ ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)

เมื่อเวลาในการเผาผนึกวัสดุที่เจือด้วยสารเจือ ปริมาณ 0.03 ดังแสดงในภาพที่ 4-27 จากกราฟจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เจือด้วย Sn มีค่าสูงขึ้นเป็น 92902.02 โดยที่ค่า $\tan\delta$ มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีค่าเท่ากับ 0.12044 ที่ความถี่ 1kHz ในภาพที่ 4-27 จะเห็นว่าค่า $\tan\delta$ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเจือด้วย Pr ($\tan\delta = 0.058973$) โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่า $\tan\delta$ ได้รวบรวมไว้แล้วในตารางที่ 4-3 ภาพที่ 4-28 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan\delta$) กับความถี่ในช่วง 100 Hz-10MHz ของวัสดุเซรามิกที่ถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมง สำหรับวัสดุ CCT_{0.35}O-A, CPrCT_{0.35}O-06A, CCT_{0.35}SnO-06A และ CSrCT_{0.35}O-06A จากภาพจะเห็นว่า เมื่อสารเจือเท่ากับ 0.06 เท่ากัน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 kHz มีค่าเท่ากับ 18675.24, 13342.74, 72713.7 และ 74020.12 และค่า $\tan\delta$ มีค่าเท่ากับ 0.102901, 0.080378, 0.091556 และ 0.116389 สำหรับวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-A, CPrCT_{0.35}O-03A, CCT_{0.35}SnO-03A และ CSrCT_{0.35}O-03A ตามลำดับ จากภาพค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่ามากที่สุดเมื่อเจือด้วย Sr ซึ่งเท่ากับ 74020.12 และค่า $\tan\delta$ ต่ำที่สุดเมื่อเจือด้วย Pr เท่ากับ 0.080378

ภาพที่ 4-29 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ($\tan\delta$) กับความถี่ในช่วง 100 Hz-10MHz ของวัสดุเซรามิกที่ถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลาในการเผาผนึก 10 ชั่วโมง สำหรับวัสดุ CCT_{0.35}O-B, CPrCT_{0.35}O-06B, CCT_{0.35}SnO-06B และ CSrCT_{0.35}O-06B จากภาพจะเห็นว่า เมื่อสารเจือเท่ากับ 0.06 เท่ากัน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 kHz มีค่าเท่ากับ 40799.98, 11929.83, 81049.75 และ 71844.42 และค่า $\tan\delta$ มีค่าเท่ากับ 0.081168, 0.065857, 0.087715 และ 0.125762 สำหรับวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-B, CPrCT_{0.35}O-06B, CCT_{0.35}SnO-06B และ CSrCT_{0.35}O-06B ตามลำดับ จากภาพค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่ามากที่สุดเมื่อเจือด้วย Sn ซึ่งเท่ากับ 81049.75 และค่า $\tan\delta$ ต่ำที่สุดเมื่อเจือด้วย Pr เท่ากับ 0.065857



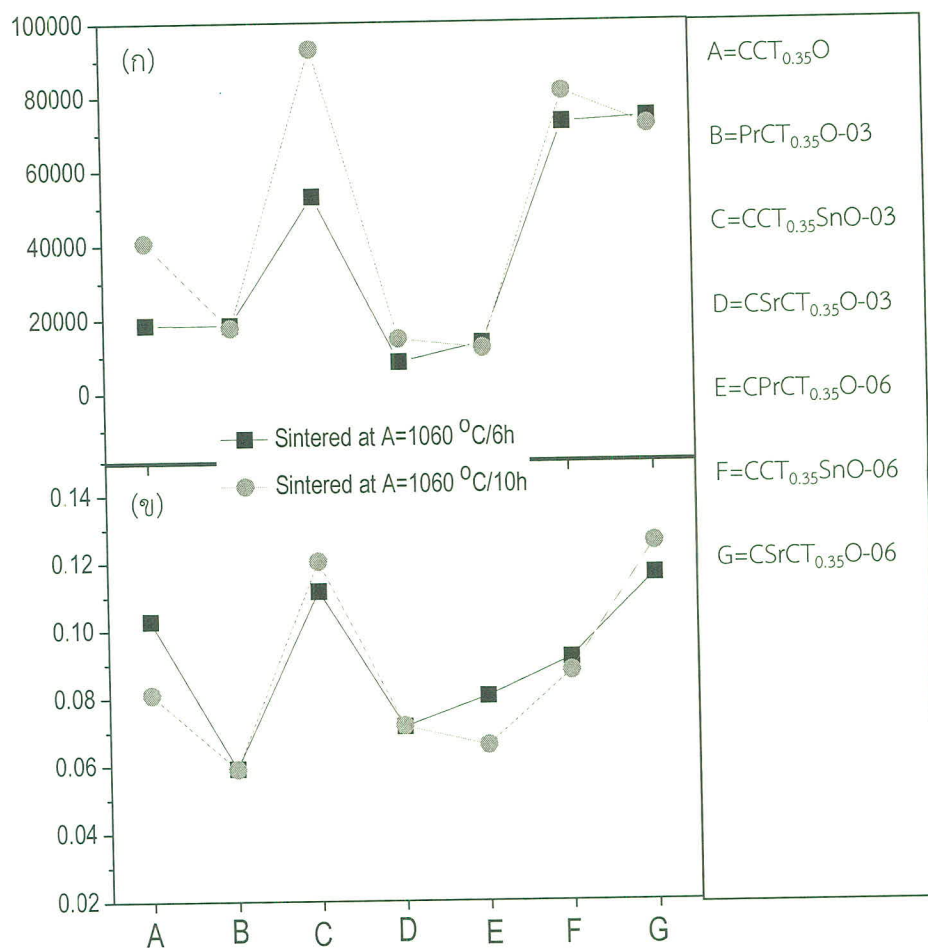
ภาพที่ 4-28 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่า (ก) ϵ' และ (ข) $\tan \delta$ สำหรับวัสดุ CCT_{0.35}O-A, CPrCT_{0.35}O-06A, CCT_{0.35}SnO-06A และ CSrCT_{0.35}O-06A ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)



ภาพที่ 4-29 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่า (ก) ϵ' และ (ข) $\tan \delta$ สำหรับวัสดุ CCT_{0.35}O-B, CPrCT_{0.35}O-6B, CCT_{0.35}SnO-6B และ CSrCT_{0.35}O-6B ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และ (ข) $\tan\delta$ ที่ความถี่ 1 kHz และอุณหภูมิห้อง สำหรับวัสดุที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลา 6 และ 10 ชั่วโมง

วัสดุตัวอย่าง	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ')	$\tan\delta$
CCT _{0.35} O-A	18675.24	0.102901
CPrCT _{0.35} O-03A	18480.56	0.059153
CCT _{0.35} SnO-03A	52976.7	0.111637
CSrCT _{0.35} O-03A	8247.272	0.071484
CPrCT _{0.35} O-06A	13342.74	0.080378
CCT _{0.35} SnO-06A	72713.7	0.091556
CSrCT _{0.35} O-06A	74020.12	0.116389
CCT _{0.35} O-B	40799.98	0.081168
CPrCT _{0.35} O-03B	17694.4	0.058973
CCT _{0.35} SnO-03B	92902.02	0.12044
CSrCT _{0.35} O-03B	14545.67	0.071711
CPrCT _{0.35} O-06B	11929.83	0.065857
CCT _{0.35} SnO-06B	81049.75	0.087715
CSrCT _{0.35} O-06B	71844.42	0.125762



ภาพที่ 4-30 แสดงการเปรียบเทียบค่า (ก) ϵ' และ (ข) $\tan\delta$ ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารเจือ และการเจือด้วย Pr, Sn และ Sr โดยใช้เวลาในการเผาผนึกที่ต่างกัน 6 และ 10 ชั่วโมง

ภาพที่ 4-30 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่า $\tan\delta$ เมื่อเผาผนึกที่เวลา ต่างกัน 6 และ 10 ชั่วโมง สำหรับวัสดุเซรามิกที่เพิ่มปริมาณ TI เท่ากับ 0.35 เมื่อใช้เวลาในการเผาผนึกมากขึ้นค่าไดอิเล็กตริกจะสูงขึ้น ส่วนค่า $\tan\delta$ จะลดลงดังจะเห็นในภาพที่ 4-30 ตำแหน่ง (A) และเมื่อเจือด้วยปริมาณสารเจือ Pr 0.03 ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกและค่า $\tan\delta$ จะลดลงทั้งคู่ โดยที่เมื่อเจือด้วย ปริมาณ Pr, Sn และ Sr ที่ปริมาณ 0.03 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เจือด้วย Sn จะมีค่าสูงที่สุด แต่ค่า $\tan\delta$ ก็ยังคงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเวลาในการเผาผนึกเพิ่มขึ้นทั้งค่า ϵ' และ $\tan\delta$ ก็ยังมีค่าเพิ่มตามด้วย อาจเนื่องมาจากการมีเกรนที่ใหญ่ เมื่อเวลาในการเผาผนึกเพิ่มขึ้นซึ่งก็จะส่งผลทำให้ความต้านทานที่ขอบเกรนนั้นมีค่าน้อยลงด้วย ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า E_b ที่ไม่มากดังแสดงในตารางที่ 4-3 แต่เมื่อเจือ Pr, Sn และ Sr ที่ปริมาณ 0.06 จะเห็นว่าค่า ϵ' และ $\tan\delta$ ลดลงตามไปด้วย

4. การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear properties)

4.1 ผลของสารเจือ ต่อสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น

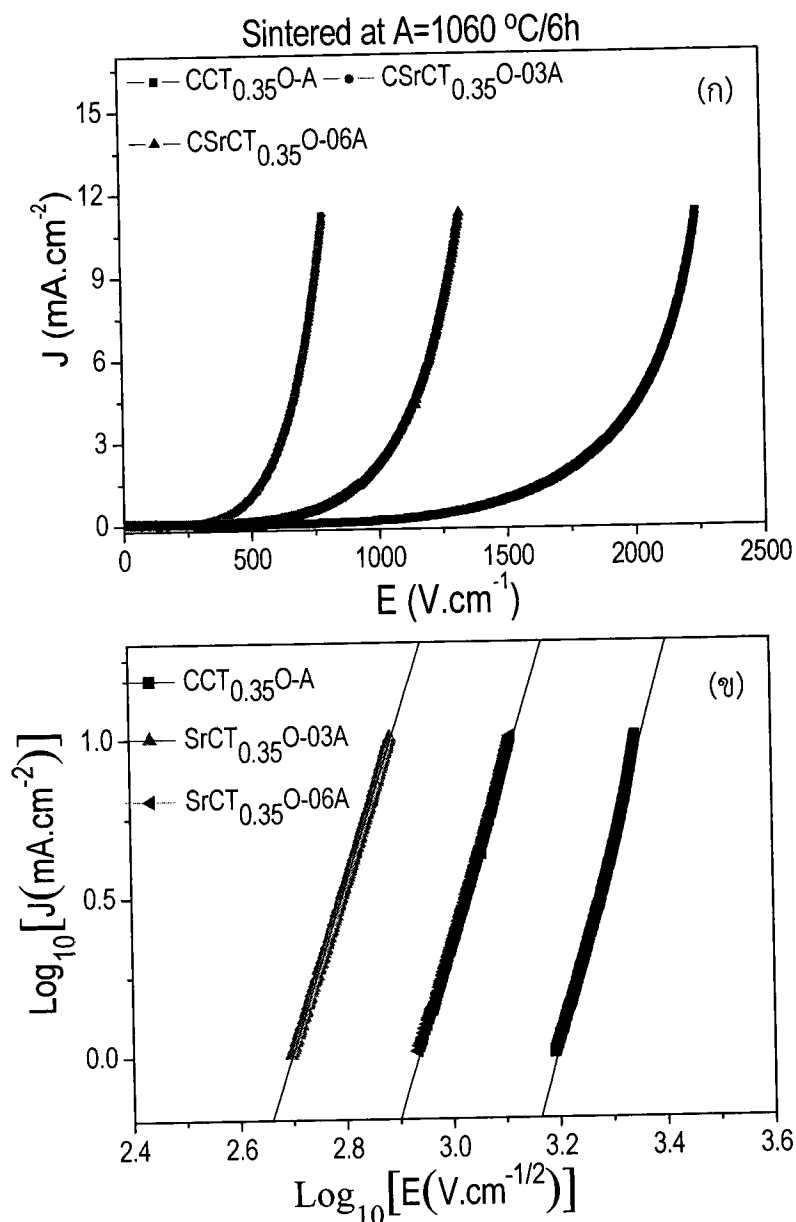
ในการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกและสมบัติทางไฟฟ้าในวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้นั้น สามารถศึกษาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J) กับสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งโดยทั่วไปผลของการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ขอบเกรนในวัสดุที่ถูกเตรียมด้วยเวลาในการเผาผนึก และที่สารเจือที่แตกต่างกันในการทดลองนี้ ดังเห็นได้จากภาพที่ 4.29-4.33 (ก) จากภาพจะเห็นว่าวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้แสดงความพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้น นั่นคือวัสดุเซรามิกที่ถูกเตรียมขึ้นมีสมบัติทางไฟฟ้าไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Non ohmic) เช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับวัสดุ CCTO (Chung et al., 2004; Li W et al., 2007; Lin et al., 2008; Cheng et al., 2009; Sen et al., 2010; Thongbai et al., 2012; Ekaphan et al., 2013) โดยจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J) กับสนามไฟฟ้า (E) เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear coefficient, α) ได้จากสมการที่ 4-2

$$\alpha = \frac{\log(J_2 / J_1)}{\log(E_2 / E_1)} \quad (4-2)$$

E_1 คือค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกระแสเท่ากับ J_1 (1 mA/cm²)

E_2 คือค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกระแสเท่ากับ J_2 (10 mA/cm²)

โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1 mA/cm² เป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้วัสดุไดอิเล็กตริกที่นำมาทดสอบสูญเสียสภาพความเป็นฉนวน (Breakdown Electric Field, E_b) ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J) กับสนามไฟฟ้า (E) ในวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้พบว่ามีค่า α และค่า E_b เราสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแส (J) กับสนามไฟฟ้า (E) ได้ดังแสดงในภาพที่ 4-30 ถึงภาพที่ 4-35

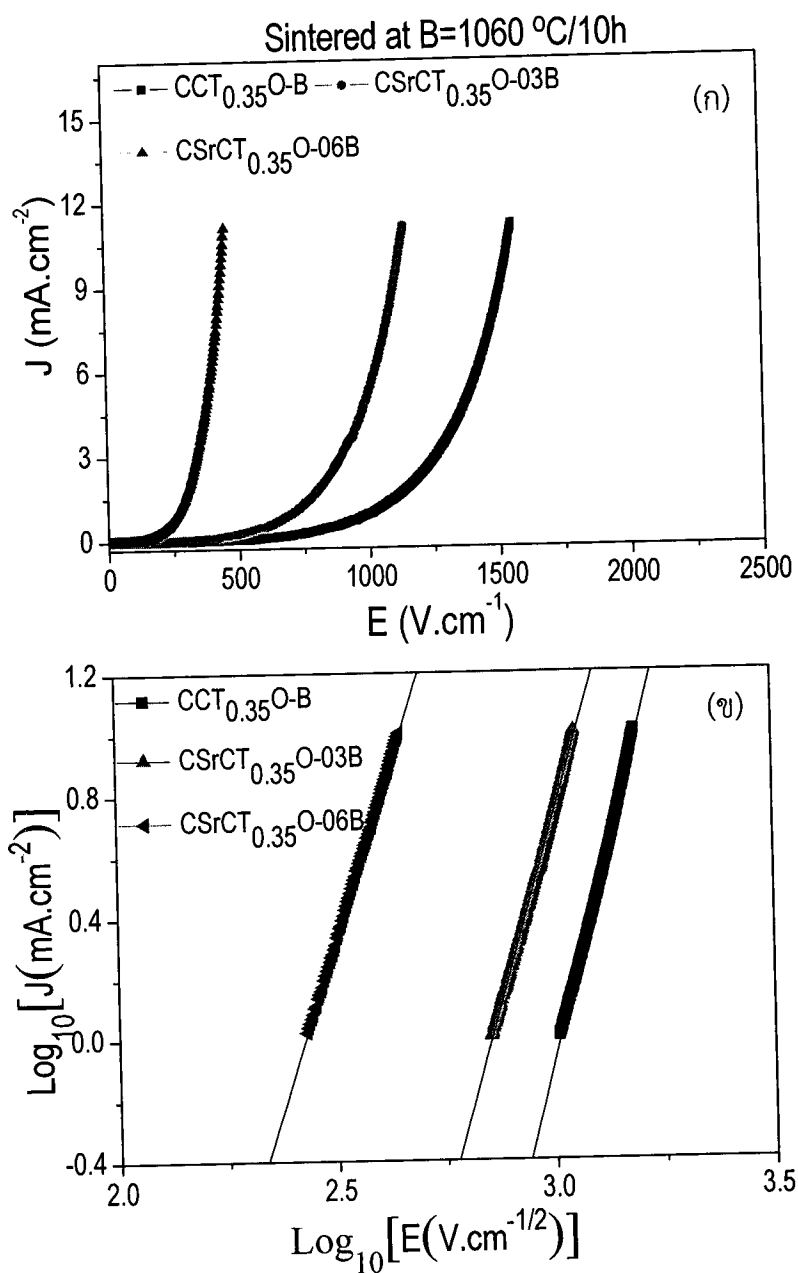


ภาพที่ 4-31 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}(E)$ กับ $\text{Log}(J)$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06A}$ ที่อุณหภูมิห้อง ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

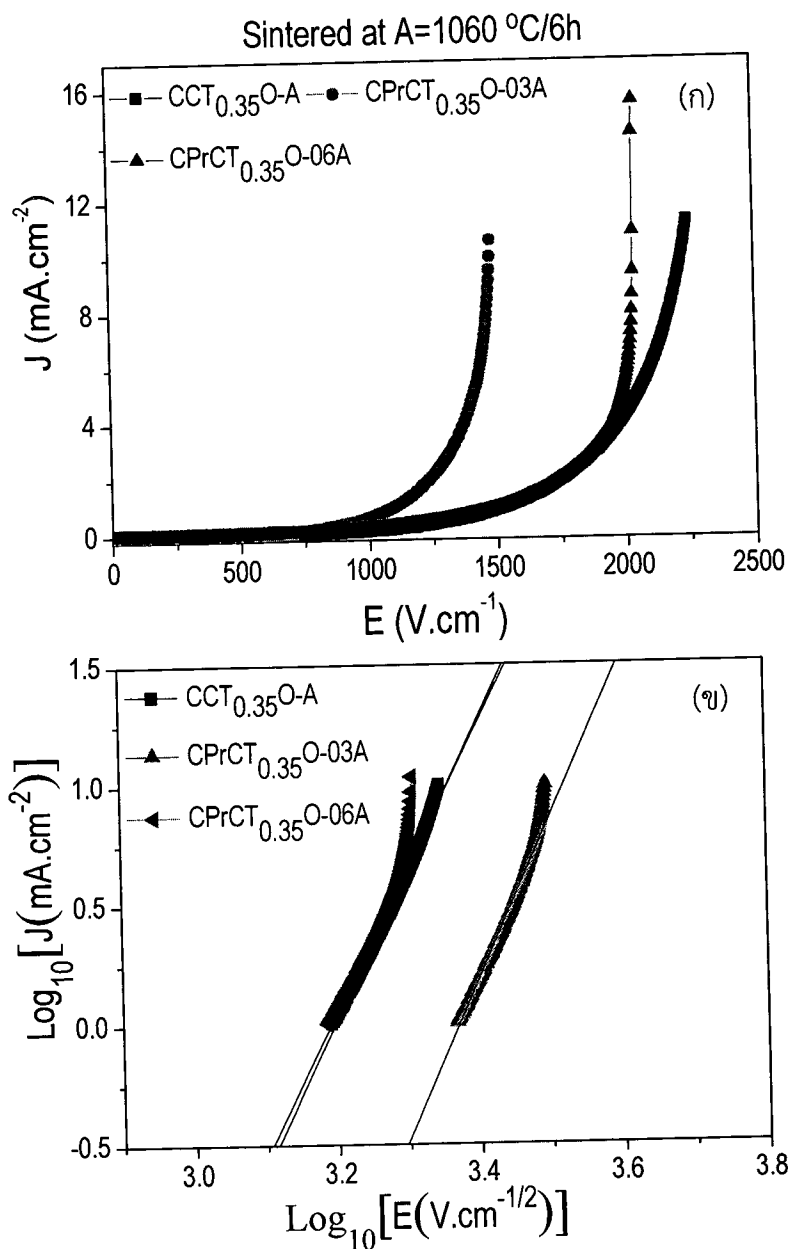
ภาพที่ 4-31 (ก) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับ สนามไฟฟ้า (E) ของวัสดุเซรามิก ที่เจือสาร Sr ที่ปริมาณ 0.03 ($\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03A}$) และ 0.06 ($\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06A}$) เปรียบเทียบกับ วัสดุเซรามิกที่ไม่มีการเจือ Sr ($\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$) ที่ทำการเผาผนึกที่ อุณหภูมิเดียวกันที่ $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยเวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมง จากกราฟเมื่อคำนวณจากสมการที่ 4-

2 ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่าพลังงานที่ทำให้สูญเสียความเป็นฉนวนไฟฟ้า (E_b) ของวัสดุ CCT_{0.35}O-A, Cs₂CT_{0.35}O-03A และ Cs₂CT_{0.35}O-06A มีค่าเท่ากับ 6.39, 5.17, 5.44 และ 1554, 498.15, 860 V/cm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ CCT_{0.35}O-A จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเซรามิกที่เจือด้วย Sr (Cs₂CT_{0.35}O-03A และ Cs₂CT_{0.35}O-06A) ซึ่งค่า α นี้จะสอดคล้องกับค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log (E) กับ Log(J) ดังแสดงในภาพที่ 4-31 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ของวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-A จะมีความชันมากที่สุด จากค่า α ที่คำนวณได้สามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-A สามารถเปลี่ยนจากฉนวนไปเป็นตัวนำได้เร็วกว่าวัสดุ Cs₂CT_{0.35}O-06A และ Cs₂CT_{0.35}O-03A ตามลำดับ ส่วนค่า E_b ก็จะมีค่ามากที่สุดสำหรับวัสดุ CCT_{0.35}O-A และลดลงต่ำสุดสำหรับวัสดุเซรามิก Cs₂CT_{0.35}O-03A ซึ่งค่า E_b ที่คำนวณได้นี้จะสอดคล้องกับค่า α ซึ่งค่า α และค่า E_b ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4

จากสมการที่ 4-2 เราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่า E_b ในวัสดุเซรามิก Cs₂CT_{0.35}O-03B และ Cs₂CT_{0.35}O-06B โดยเปรียบเทียบกับวัสดุที่ยังไม่ได้เจือ Sr โดยพิจารณารูปกราฟระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) ดังแสดงในภาพที่ 4-32 และโดยใช้สมการที่ 4-2 สามารถคำนวณหาค่า α และค่า E_b ในวัสดุ CCT_{0.35}O-B, Cs₂CT_{0.35}O-03B และ Cs₂CT_{0.35}O-06B มีค่าเท่ากับ 5.62, 5.01, 4.42 และ 1020.15, 712.35, 269.55 V/cm ตามลำดับ จากค่า α และค่า E_b ที่คำนวณได้จะเห็นได้ว่าวัสดุ CCT_{0.35}O-B จะมีค่า α และค่า E_b มากที่สุดซึ่งจะมีค่าลดลงสำหรับวัสดุ Cs₂CT_{0.35}O-03B และ Cs₂CT_{0.35}O-06B ตามลำดับ ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟระหว่าง Log (E) กับ Log(J) ที่แสดงในภาพที่ 4-32 (ข) และความสามารถในการเปลี่ยนจากฉนวนไปเป็นตัวนำในวัสดุ CCT_{0.35}O-B จะมีค่ามากกว่าวัสดุ Cs₂CT_{0.35}O-03B และ Cs₂CT_{0.35}O-06B ตามลำดับ และ ค่าความต้านทานที่ขอบเกรนก็มีค่ามากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ α และค่า E_b ในวัสดุที่เตรียมได้จะเห็นได้ว่าค่า α และค่า E_b จะมีค่าลดลงในวัสดุที่ใช้เวลาในการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า α และค่า E_b ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4



ภาพที่ 4-32 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}(E)$ กับ $\text{Log}(J)$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$, $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-03B}$ และ $\text{CSrCT}_{0.35}\text{O-06B}$ ที่อุณหภูมิห้อง (30°C)



ภาพที่ 4-33 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}(E)$ กับ $\text{Log}(J)$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03A}$ และ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-06A}$ ที่อุณหภูมิห้อง ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

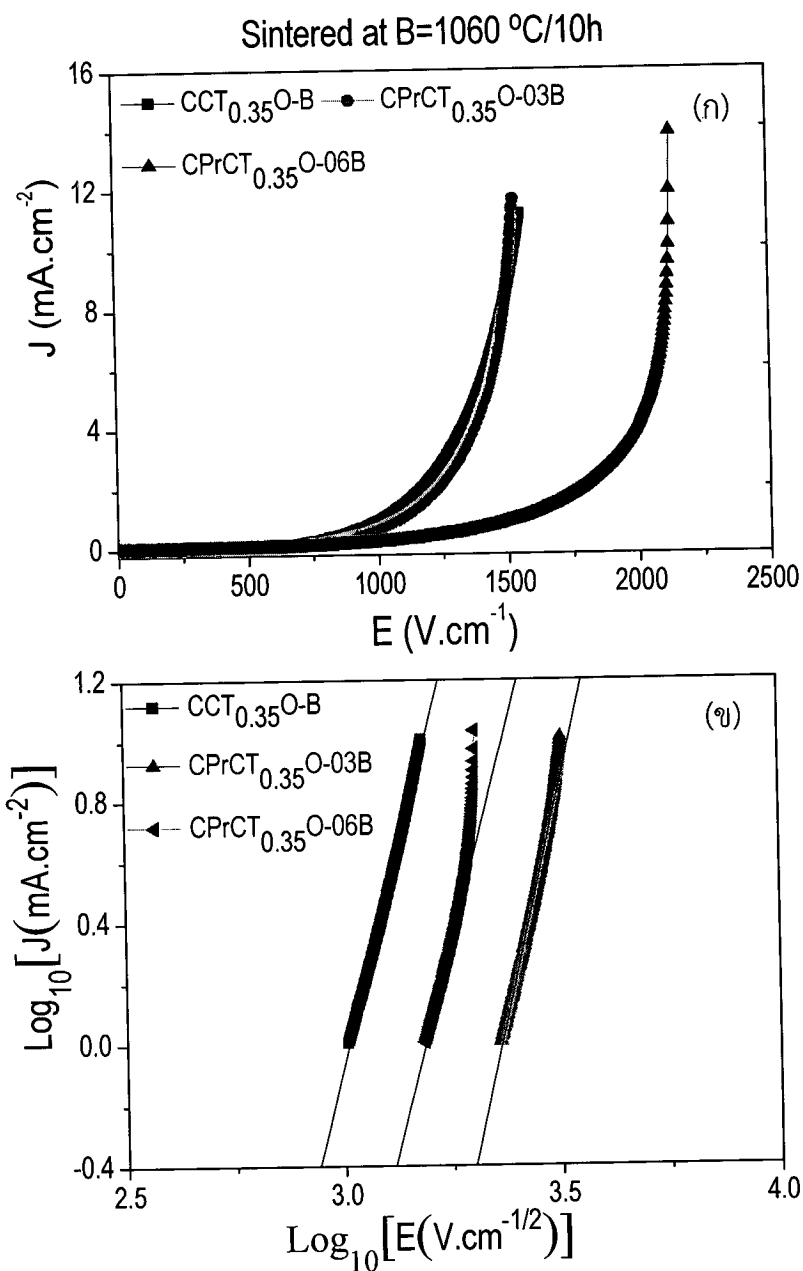
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) ของ วัสดุเซรามิก ที่เจือสาร Pr ที่ปริมาณ 0.03 ($\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03A}$) และ 0.06 ($\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-06A}$) เปรียบเทียบกับ วัสดุเซรามิกที่ไม่มีการเจือ Pr ($\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$) ที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเดียวกันที่ $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยเวลาในการเผาผนึก 6 ชั่วโมง แสดงไว้ในภาพที่ 4-33 (ก) จากกราฟเมื่อคำนวณจาก

สมการที่ 4-2 ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่าพลังงานที่ทำให้สูญเสียความเป็นฉนวนไฟฟ้า (E_b) ของวัสดุ CCT_{0.35}O-A, CPrCT_{0.35}O-03A และ CPrCT_{0.35}O-06A มีค่าเท่ากับ 6.39, 6.93, 7.05 และ 1554, 2329.40, 1534. V/cm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุเซรามิกที่เจือด้วย Pr มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือ จาก 0.03 เป็น 0.06 ซึ่งค่า α นี้จะสอดคล้องกับค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log (E) กับ Log(J) ดังแสดงในภาพที่ 4-33 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ของวัสดุเซรามิก CPrCT_{0.35}O-03A จะมีความชันมากที่สุด จากค่า α ที่คำนวณได้สามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุเซรามิก CPrCT_{0.35}O-03A สามารถเปลี่ยนจากฉนวนไปเป็นตัวนำได้เร็วกว่าวัสดุ CCT_{0.35}O-A และ CPrCT_{0.35}O-06A ตามลำดับ ส่วนค่า E_b ก็จะมีค่ามากที่สุดสำหรับวัสดุ CPrCT_{0.35}O-03A และลดลงต่ำสุดสำหรับวัสดุเซรามิก CPrCT_{0.35}O-06A ซึ่งค่า E_b ที่คำนวณได้นี้จะสอดคล้องกับค่า α และจะเป็นค่าที่สอดคล้องกันกับค่าความต้านทานของขอบเกรน หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเจือด้วย Pr ในวัสดุ CCT_{0.35}O-A ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานที่ขอบเกรนมีค่าสูงขึ้น และความสามารถในการเปลี่ยนจากความต้านทานไปเป็นตัวนำไฟฟ้าก็มีค่าสูงขึ้นด้วย โดยค่า α และค่า E_b โดยวัสดุที่เจือด้วย Pr ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 °C ด้วยเวลา 6 ชั่วโมง แสดงไว้ในตารางที่ 4-4

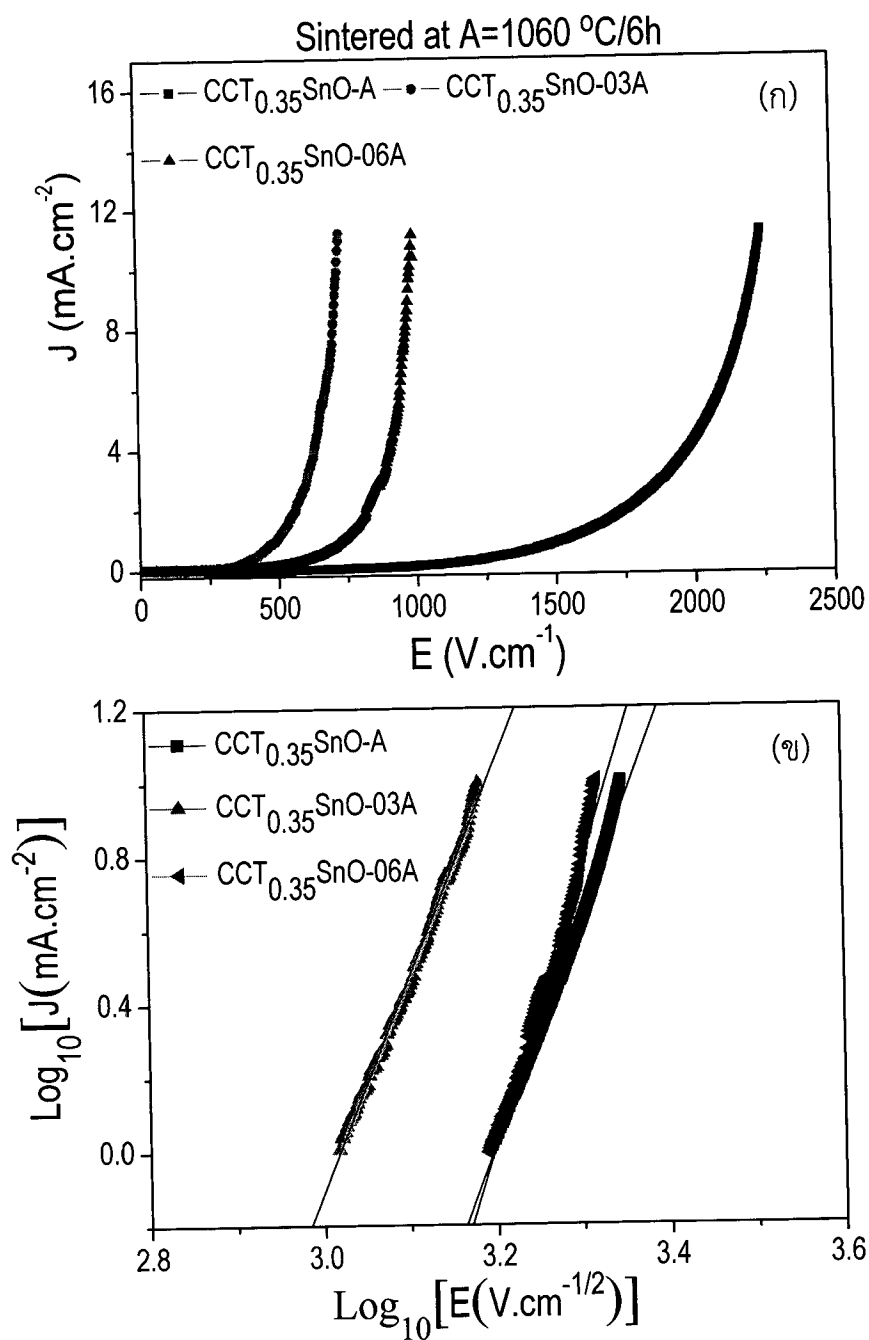
ภาพที่ 4-34 (ก) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับ สนามไฟฟ้า (E) ของวัสดุเซรามิก ที่เจือสาร Pr ที่ปริมาณ 0.03 (CPrCT_{0.35}O-03B) และ 0.06 (CPrCT_{0.35}O-06B) เปรียบเทียบกับ วัสดุเซรามิกที่ไม่มีการเจือ Pr (CCT_{0.35}O-B) โดยเผาผนึกวัสดุเซรามิกที่อุณหภูมิเดียวกันที่ 1060 °C ด้วยเวลาในการเผาผนึก 10 ชั่วโมง จากกราฟเมื่อคำนวณจากสมการที่ 4-2 ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่าพลังงานที่ทำให้สูญเสียความเป็นฉนวนไฟฟ้า (E_b) ของวัสดุ CCT_{0.35}O-B, CPrCT_{0.35}O-03B และ CPrCT_{0.35}O-06B มีค่าเท่ากับ 5.62, 6.40, 5.51 และ 1020.15, 2288.55, 1534.50 V/cm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ CPrCT_{0.35}O-03B จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-B และ CPrCT_{0.35}O-06B ซึ่งค่า α นี้จะสอดคล้องกับค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log (E) กับ Log(J) ดังแสดงในภาพที่ 4-34 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ของวัสดุเซรามิก CPrCT_{0.35}O-03B จะมีความชันมากที่สุด ซึ่งค่า α ที่คำนวณได้สามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุเซรามิก CPrCT_{0.35}O-03B สามารถเปลี่ยนจากฉนวนไปเป็นตัวนำได้เร็วกว่าวัสดุ CPrCT_{0.35}O-06B และ CCT_{0.35}O-B ตามลำดับ ส่วนค่า E_b ก็จะมีค่ามากที่สุดสำหรับวัสดุ CPrCT_{0.35}O-03B และลดลงต่ำสุดสำหรับวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}O-B ซึ่งค่า E_b ที่คำนวณได้นี้จะสอดคล้องกับค่า α และบ่งบอกได้ว่าความต้านทานที่ขอบเกรนในวัสดุ CPrCT_{0.35}O-03B จะมีค่ามากที่สุดซึ่งจากภาพถ่าย SEM-EDS (ภาพที่ 4-18) ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าจะประกอบด้วยเกรนที่มีขนาดใหญ่ และเกรนที่มีขนาดเล็กแทรกอยู่

ระหว่างเกรนใหญ่ ซึ่งเมื่อยิง EDS ดูแล้วปรากฏว่าประกอบด้วยสารที่เป็นองค์ประกอบของ Pr มากกว่า แสดงว่า Pr ที่เจือเข้าไปไม่ได้เข้าไปในโครงสร้างเพียงแต่เข้าไปเกิดเป็นองค์ประกอบใหม่ที่แทรกอยู่ภายในและส่งผลต่อค่าความต้านของเกรน ซึ่งค่า α และค่า E_b ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4

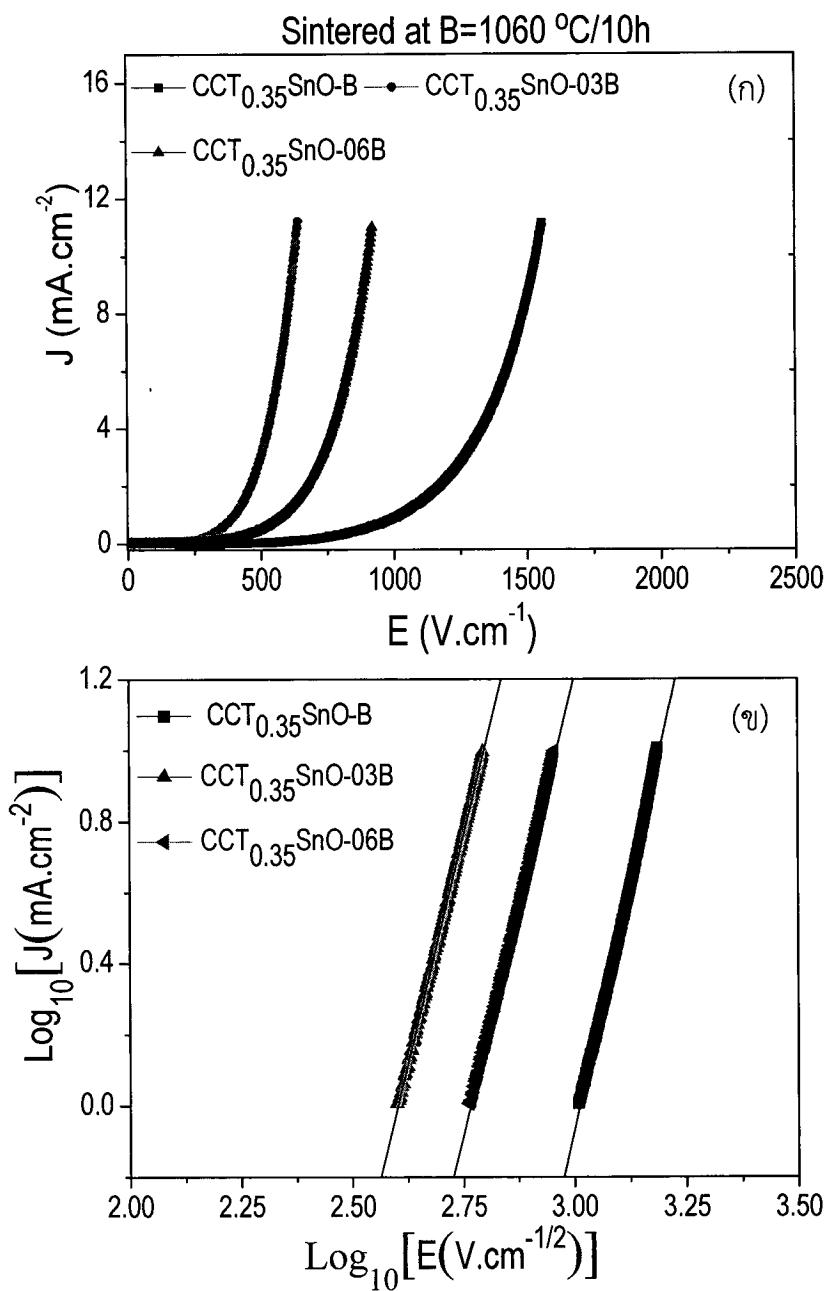
สำหรับการศึกษาผลของสารเจือ Sn ที่เจือ ในวัสดุ CCT_{0.35}O ด้วยปริมาณ 0.03 โดยใช้เวลาในการเผาผนึก 6 นั้นจะเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับ สนามไฟฟ้า (E) ดังแสดงในภาพที่ 4-35 (ก) และจากสมการที่ (4-2) เราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่า E_b ในวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}SnO-03A และ CCT_{0.35}SnO-06A โดยเปรียบเทียบกับวัสดุที่ยังไม่ได้เจือ Sn (CCT_{0.35}O-A) มีค่าเท่ากับ 6.39, 5.97, 7.81 และ 1554, 1041.2, 1550.4 V/cm ตามลำดับ จากค่า α และค่า E_b ที่คำนวณได้จะเห็นได้ว่าค่า α และค่า E_b จะมีค่าลดลงเมื่อเจือ Sn ด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นโดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ เจือ Sn เข้าไปด้วยปริมาณ 0.06 ซึ่งค่า α ที่คำนวณได้นี้จะสัมพันธ์กับค่าความชันของกราฟระหว่าง Log (E) กับ Log(J) ที่แสดงในภาพที่ 4-35 (ข) จากค่า α ที่คำนวณได้บ่งบอกได้ว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}SnO-06A มีความสามารถในการเปลี่ยนจากฉนวนไปเป็นตัวนำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการเจือ Sn และวัสดุที่เจือ Sn ปริมาณ 0.06 ตามลำดับ และสำหรับค่า E_b ในวัสดุเซรามิก ก็สอดคล้องกับค่าความต้านทานที่ขอบเกรน กล่าวคือวัสดุที่มีค่า E_b มากจะมีค่าความต้านทานที่ขอบเกรนมากกว่า ซึ่งค่า α และค่า E_b ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4



ภาพที่ 4-34 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}(E)$ กับ $\text{Log}(J)$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$, $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-03B}$ และ $\text{CPrCT}_{0.35}\text{O-06B}$ ที่อุณหภูมิห้อง (30°C)



ภาพที่ 4-35 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}(E)$ กับ $\text{Log}(J)$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-A}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-03A}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-06A}$ ที่อุณหภูมิห้อง ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

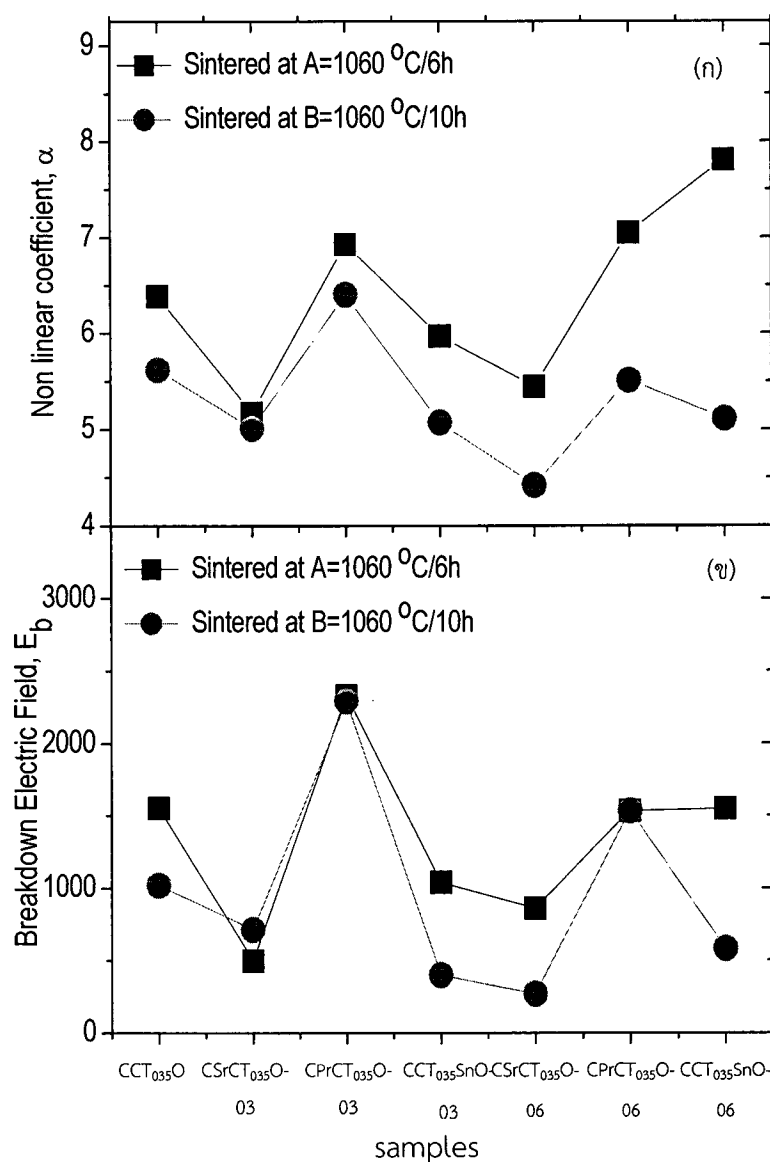


ภาพที่ 4-36 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}(E)$ กับ $\text{Log}(J)$ สำหรับวัสดุ $\text{CCT}_{0.35}\text{O-B}$, $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-03B}$ และ $\text{CCT}_{0.35}\text{SnO-06B}$ ที่อุณหภูมิห้อง (30°C)

ภาพที่ 4-36(ก) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับ สนามไฟฟ้า (E) และจากสมการที่ (4-2) เราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่า E_b ในวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}SnO-03B แล CCT_{0.35}SnO-06B โดยเปรียบเทียบกับวัสดุที่ยังไม่ได้เจือ Sn (CCT_{0.35}O-B) มีค่าเท่ากับ 5.62, 5.07, 5.11 และ 1020.15, 399.60, 579.6 V/cm ตามลำดับ จากค่า α และค่า E_b ที่คำนวณได้จะเห็นได้ว่าค่า α และค่า E_b จะมีค่าลดลงเมื่อเจือ Sn ด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นโดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ เจือ Sn เข้าไปด้วยปริมาณ 0.06 ซึ่งค่า α ที่คำนวณได้นี้จะสัมพันธ์กับค่าความชันของกราฟระหว่าง Log (E) กับ Log(J) ที่แสดงในภาพที่ 4-36 (ข) จากค่า α ที่คำนวณได้บ่งบอกได้ว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}SnO-06B มีความสามารถในการเปลี่ยนจากฉนวนไปเป็นตัวนำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการเจือ Sn และวัสดุที่เจือ Sn ปริมาณ 0.06 ตามลำดับ และสำหรับค่า E_b ในวัสดุเซรามิก ก็สอดคล้องกับค่าความต้านทานที่ขอบเกรน และกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการเผาผนึกวัสดุเซรามิกจะทำให้ค่าความต้านทานที่ขอบเกรนมีค่าลดลง ซึ่งค่า α และค่า E_b ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดง ค่าสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่า E_b ในช่วง 1-10 mA/cm²

วัสดุตัวอย่าง	สนามไฟฟ้าที่ทำให้สูญเสีย ความเป็นฉนวน (E_b) (V.cm ⁻¹)	สัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient, α)
CCT _{0.35} O-A	6.39	1554.00
CSrCT _{0.35} O-03A	5.17	498.00
CPrCT _{0.35} O-03A	6.93	2329.40
CCT _{0.35} SnO-03A	5.97	1041.20
CSrCT _{0.35} O-06A	5.44	860.00
CPrCT _{0.35} O-06A	7.05	1534.50
CCT _{0.35} SnO-06A	7.81	1550.40
CCT _{0.35} O-B	5.62	1020.50
CSrCT _{0.35} O-03B	5.01	712.35
CPrCT _{0.35} O-03B	6.40	2288.55
CCT _{0.35} SnO-03B	5.07	399.60
CSrCT _{0.35} O-06B	4.42	269.55
CPrCT _{0.35} O-06B	5.51	1534.50
CCT _{0.35} SnO-06B	5.11	579.60



ภาพที่ 4-37 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และ (ข) การเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้สูญเสียสภาพความต้านทาน (E_b) ของวัสดุเซรามิกที่เป็นฟังก์ชันกับสารเจือ และเวลาในการเผาผนึก

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) และค่าความต่างศักย์ที่ทำให้วัสดุสูญเสียสภาพความเป็นตัวต้านทาน (E_b) ในวัสดุที่เพิ่มปริมาณ Ti เท่ากับ 0.35 และเมื่อเจือ Sr, Pr และ Sn ที่ปริมาณ 0.03 และ 0.06 โดยใช้อุณหภูมิในการเผาผนึก 1060 °C และใช้เวลาที่ต่างกัน 6 และ 10 ชั่วโมง แสดงไว้ในภาพที่ 4-37 จากภาพที่ 4-36 จะเห็นว่า ค่า α และค่า E_b ในวัสดุ CCT_{0.35}O มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการเผาผนึกจาก 6 เป็น 10 ชั่วโมง และเมื่อเจือ Sr, Pr และ Sn ปริมาณ 0.03 จะเห็นได้ว่าค่า α และค่า E_b มีค่าลดลงเมื่อเจือด้วย Sr และเพิ่มขึ้นเมื่อเจือด้วย Pr และลดต่ำลงอีก

ครั้งเมื่อ เจือด้วย Sn โดยค่า α ในวัสดุเซรามิกที่เจือด้วยสารเหล่านี้จะลดลงเมื่อเวลาในการเผาผนึกสูงขึ้น ส่วนค่า α เมื่อเจือด้วย Sr, Pr และ Sn ปริมาณ 0.06 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามประเภทของสารเจือ Sr, Pr และ Sn เรียงตามลำดับ โดยจะมีค่า α มากที่สุดเท่ากับ 7.81 ที่ปริมาณสารเจือ Sn แทนในตำแหน่ง Ti ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา และบ่งบอกได้ว่าวัสดุเซรามิก CCT_{0.35}SnO-06A จะมีความสามารถในการเปลี่ยนจากความต้านทานไปเป็นตัวนำได้ดีที่สุดในบรรดาวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้ ในงานวิจัยครั้งนี้ ส่วนค่า E_b เมื่อเจือด้วย Sr, Pr และ Sn ปริมาณ 0.06 จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดต่ำลงตามประเภทของสารเจือ Sr, Pr และ Sn เรียงตามลำดับ โดยที่ค่า E_b จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2329.40 สำหรับวัสดุเซรามิก CPrCT_{0.35}O-03A ซึ่งบ่งบอกได้ว่าค่าความต้านทานของขอบเกรนในวัสดุนี้มีค่ามากที่สุดอาจจะมีสาเหตุเนื่องมาจากการเจือ Pr เข้าไปในตำแหน่ง Ca ทำให้เข้าไปแทนที่ได้ยากเนื่องจากขนาดรัศมีอะตอมของ Pr มีขนาดใหญ่กว่า Ca มากดังนั้นจึงมาฟอร์มเฟสเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่แทรกอยู่ระหว่างเกรนได้จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากภาพถ่าย SEM ดังแสดงในภาพที่ 4-19 และ 4-20