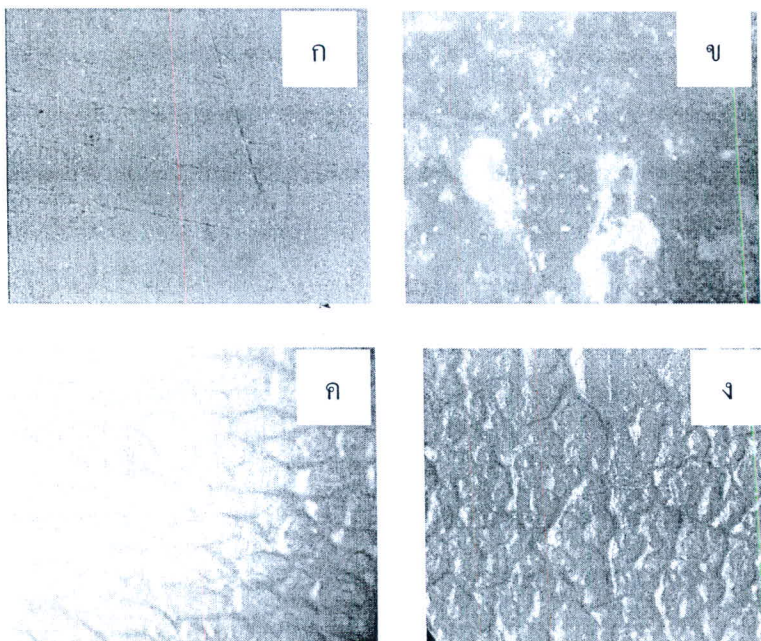


ผลการทดลอง และการอภิปราย

การเตรียมถ่านกะลามะพร้าวเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-rays (EDX) ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของถ่านกะลามะพร้าว มีปริมาณองค์ประกอบต่างๆดังนี้ C 77.62%, O₂21.28% K 0.74% และ Si 0.36%

4.1 ผลการสังเคราะห์โครงสร้าง CuO nanostructures

แผ่นทองแดงที่ถูกเตรียมโดยกระบวนการไอระเหยทางความร้อน เมื่อปล่อยให้เย็นลงตามธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ เมื่อสังเกตรด้วยตาเปล่าจะมีลักษณะเป็นชั้นสีดำ เกาะบนแผ่นทองแดง และหลุดลอกออกได้ง่าย เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง stereo microscope จะเห็นเป็นวัสดุสีดำ มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.1

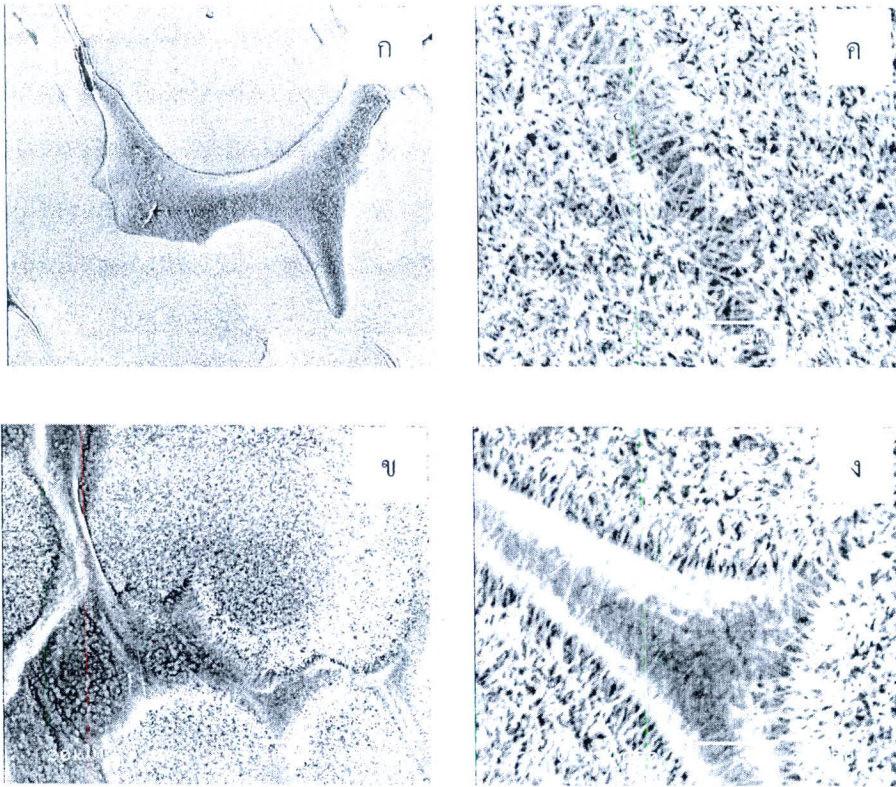


ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง stereo microscope บนแผ่นทองแดง (ก) แผ่นทองแดงก่อนการสังเคราะห์ (ข) ในอากาศปกติ (ค) ในบรรยากาศแก๊สออกซิเจน (ง) ในบรรยากาศของอากาศไหลผ่านน้ำกลั่น

นำผลิตภัณฑ์ที่ลอกจากชั้นสีดำ บนแผ่นทองแดงไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยายแตกต่างกัน เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของโครงสร้างนาโนที่สังเคราะห์ได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง XRD แสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังภาพที่ 4.2- 4.7

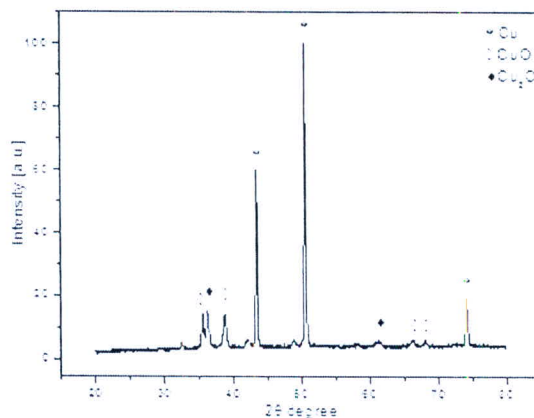
4.1.1 การสังเคราะห์โครงสร้าง CuO nanostructures โดยไม่ต้องใช้ตัวกระตุ้น

เมื่อนำแผ่นทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศของอากาศปกติ จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบลักษณะโครงสร้าง nanowires กระจายทั่วทั้งแผ่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่าสิบไมโครเมตร



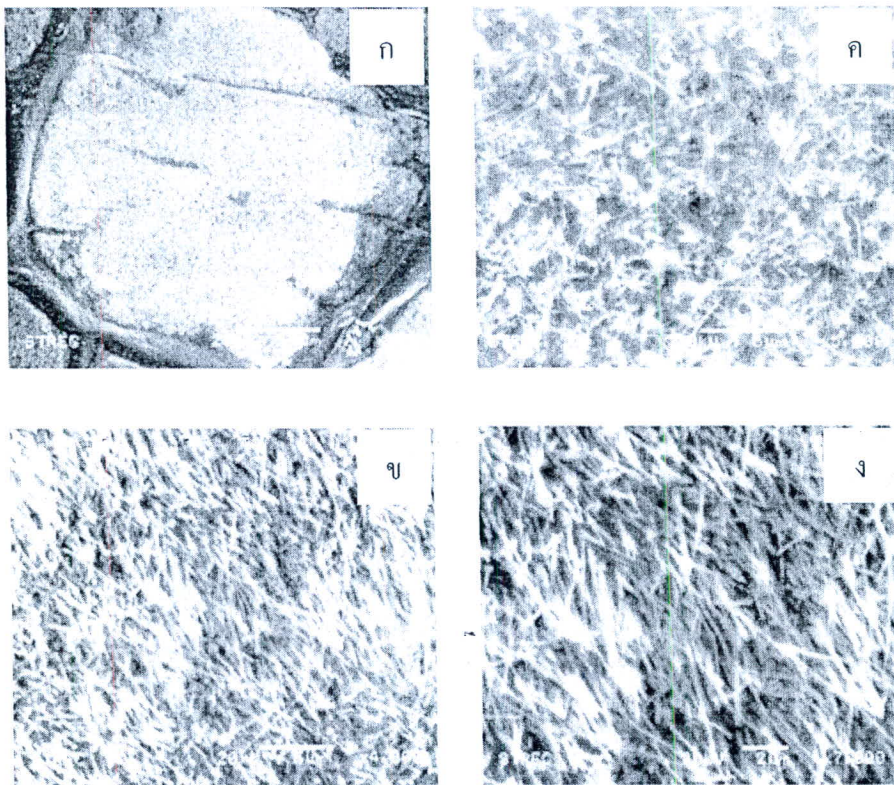
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์บนแผ่นทองแดง ที่กำลังขยายแตกต่างกัน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการด้วย XRD พบโครงสร้างแสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O ดังภาพที่ 4.3

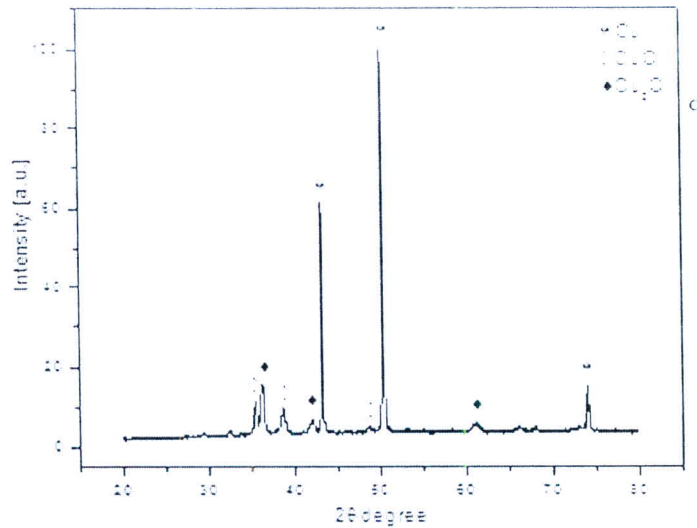


ภาพที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลิตภัณฑ์ แสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

เมื่อนำแผ่นทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน ในอัตราการไหลของแก๊ส 2 L/min วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบโครงสร้าง nanowires มีการกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นอัดตัวกันอย่างหนาแน่นไปในทิศทางเดียวกัน เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 50 ถึง 100 นาโนเมตร และความยาวประมาณ 5 ถึง 20 ไมโครเมตรดังภาพที่ 4.4 เมื่อนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย XRD พบโครงสร้างแสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O ดังภาพที่ 4.5

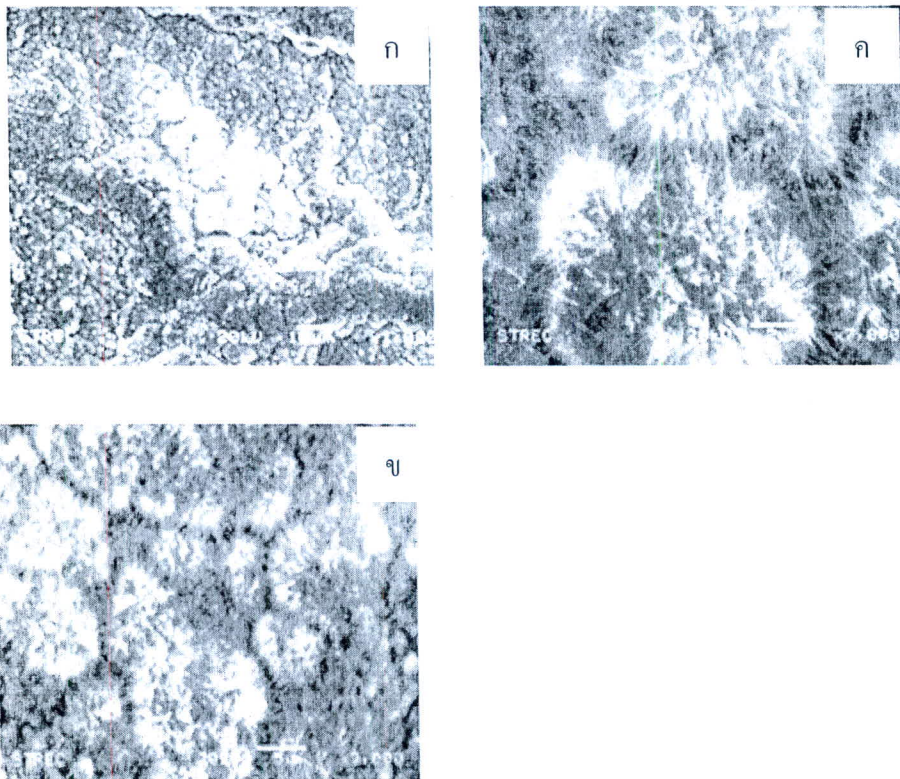


ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์บนแผ่นทองแดงที่กำลังขยายแตกต่างกัน

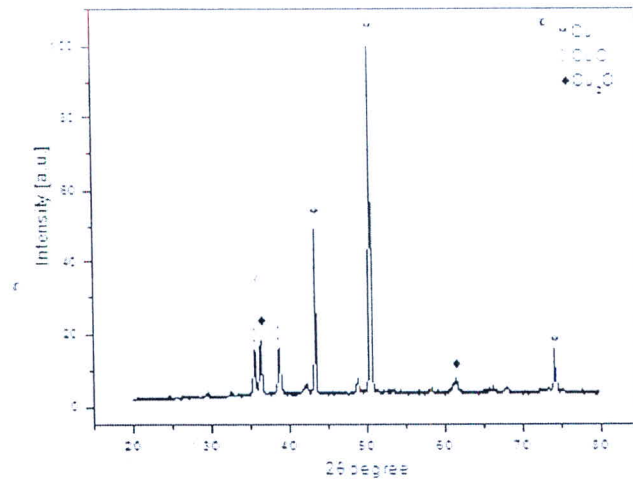


ภาพที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลิตภัณฑ์ แสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

แผ่นทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศของอากาศไหลผ่านไอน้ำ ในอัตราการไหลของอากาศ 5 L/min วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบกระจุกของ nanowires รวมกันเป็นกลุ่ม ๆ คล้ายลักษณะทรงกลมแล้วจึงมีการขยายตัวขึ้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณระหว่าง 50 ถึง 100 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 2 ถึง 5 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 4.6 เมื่อนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย XRD พบโครงสร้างแสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O ดังภาพที่ 4.7

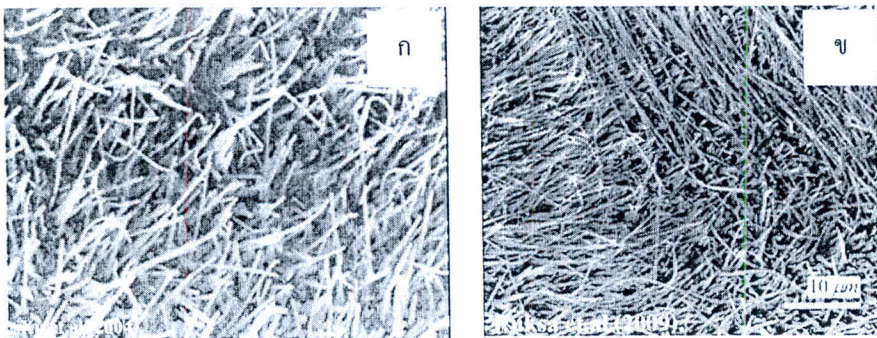


ภาพที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์บนแผ่นทองแดง (ก - ค) ที่กำลังขยายแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากภาพที่ 4.6 แสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

จากผลการวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างเป็นแบบ nanowires และเกิดกระจายทั่วทั้งแผ่นซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Xu et al. (2002) โดยอาศัยวิธีการระเหยทางความร้อนโดยใช้ copper foil เป็นตัวตั้งต้น โครงสร้างนาโนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ถึง 400 นาโนเมตร ความยาว 1 ถึง 15 ไมโครเมตร และจากรายงาน Ruksa et al. (2009) มีลักษณะโครงสร้าง nanowires คล้าย ๆ กันโดยอาศัยกระบวนการออกซิเดชัน และใช้แผ่นทองแดงเป็นสารตั้งต้นโครงสร้างนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 100 ถึง 400 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ภาพ SEM (ก) copper foil สังเคราะห์ที่ 300 ถึง 800 °C (ข) แผ่นทองแดงสังเคราะห์ที่ 600 °C

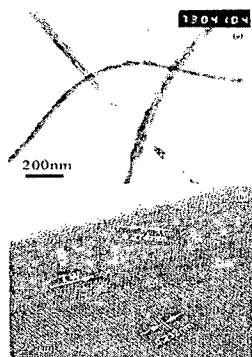
นำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ nanowires ด้วยเครื่อง XRD ที่มุม 20 ถึง 80° ผลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วย

โครงสร้างของ CuO และ Cu₂O จากการพิจารณาผลของ XRD พิกของ CuO และมีโครงสร้างแบบ monoclinic (JCPDS หมายเลข 05-0661) ซึ่งน่าจะเป็นโครงสร้าง nanowires การเกิดบนพื้นผิวของ CuO Cu₂O และ Cu เป็นแบบโครงสร้างหลายชั้น CuO nanowires จากรายงานของ Xu et al. (2004) ได้อธิบายกลไกการเกิดโครงสร้าง nanowires ว่าการเกิดพื้นผิวของ CuO เป็นแบบโครงสร้างหลายชั้น ซึ่งก่อตัวบนพื้นผิวของสารตั้งต้น (โลหะทองแดง) พิกของ CuO น่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน การแพร่ของอะตอมหรือไอออนจะเป็นตัวควบคุมกระบวนการออกซิเดชัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการออกซิเดชัน การแพร่ของอะตอมหรือไอออนอาจจะจับกับตำแหน่งภายในแลตทิซ grain boundaries หรือ sub-boundary ในชั้นของออกไซด์ โลหะถูก oxidize ที่อุณหภูมิสูง การแพร่ของปฏิกิริยาอะตอม ไอออนหรือการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนตลอดถึงความหนาแน่น ซึ่งการเกิดพิกของโครงสร้าง CuO Cu₂O และ Cu สามารถอธิบายกลไกการเกิดด้วยกระบวนการออกซิเดชันโดยพิจารณา 2 ขั้นตอน คือ



สำหรับปฏิกิริยาที่ 1 อะตอมของ Cu รวมกับ O₂ ในอากาศกลายเป็น Cu₂O สำหรับปฏิกิริยาที่ 2 สารประกอบ Cu₂O รวมกับ O₂ ในอากาศกลายเป็นเฟสของ CuO

นอกจากนี้ Huang et al. [21] ได้รายงานผลจากการการศึกษาจากเครื่อง Transmission electron microscopy (TEM) และเครื่อง High Resolution Transmission electron microscopy (HRTEM) ดังต่อไปนี้ ของตัวอย่างเตรียมที่ 600 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ภาพจาก TEM แสดงในภาพที่ 4.9 ซึ่งตัวอย่างที่ได้มีลักษณะโครงสร้างคล้าย nanowires และมีผิวที่เรียบซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 นาโนเมตร

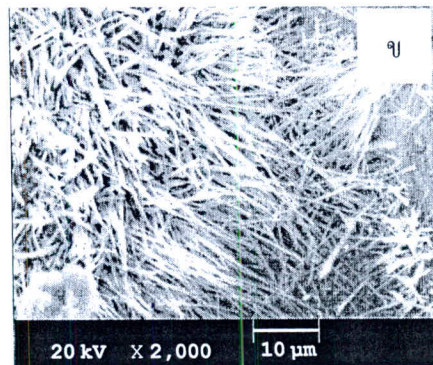
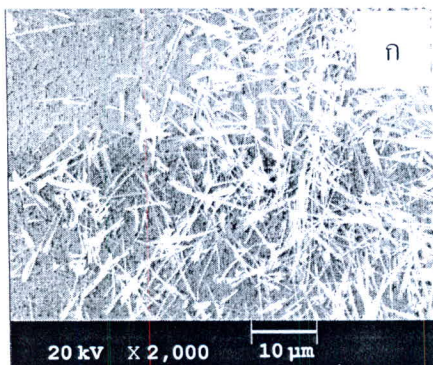


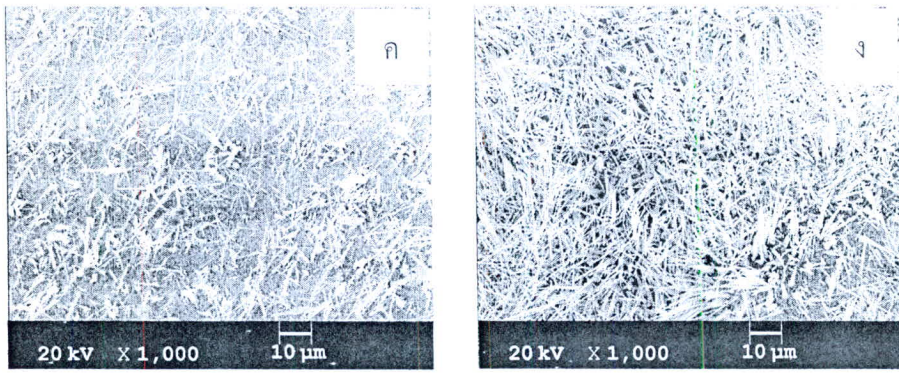
ภาพที่ 4.9 ภาพถ่ายโครงสร้าง nanowires (a) ภาพ TEM และ (b) ภาพ HRTEM ของ CuO nanowires เตรียมที่ 600 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง [21]

ผลการวิเคราะห์ด้วย HRTEM แสดงให้เห็นว่า nanowires มีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ระนาบที่ขนานกันในแกนแนวขวางซึ่งเป็นผลึกเดี่ยวระยะห่างระหว่างระนาบของข้างนอกประมาณ 0.232 นาโนเมตร และข้างในมีขนาดประมาณ 0.274 นาโนเมตรระนาบที่ {111} และ {110} ของ โครงสร้าง monoclinic CuO ($a = 0.469$ nm, $b = 0.343$ nm, $c = 0.513$ nm) การเกิดระนาบของ nanowires คือระนาบ {111} และ {110} ตามลำดับ การวิเคราะห์ SEM และ TEM แสดงการเกิดของ CuO nanowires อาจจะต้องเตรียมจากกระบวนการ Vapor-liquid-Solid กลไกของ VLS เป็นวิธีการสังเคราะห์โครงสร้าง nanowires ที่ต้องอาศัยตัวกระตุ้นปฏิกิริยาในการเกิดเป็น nanowires ซึ่งอธิบายว่า CuO nanowires สามารถเกิดได้จากกระบวนการ vapor-solid ในรายงานวิจัยนี้ได้ให้ความร้อนกับ copper foils ในบรรยากาศของออกซิเจน เกิดเป็น film บางชิ้นบนแผ่นได้ง่าย จากผล SEM แสดงให้เห็นว่ามีการเกิด สองหรือสามชั้นมีความหนาหลายไมโครเมตร ผลจาก XRD ชั้นแรกจะเกิดก่อน คือ Cu_2O ชั้นต่อมาจะเป็นการเกิดชั้นของ CuO ซึ่งจะสอดคล้องกับกระบวนการออกซิเดชันของทองแดง เมื่อให้ความร้อนกับ copper foil ในบรรยากาศของออกซิเจน จะเกิดการ oxidized เป็น Cu_2O ก่อน จากนั้น Cu_2O จะเกิด oxidation เกิดเป็น CuO nanowires ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่กล่าวถึง (Xu and et al., 2002)

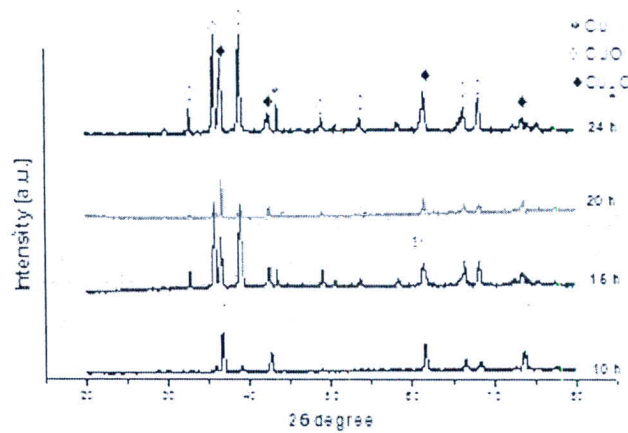
4.1.2 ผลของเวลาในกระบวนการไอระเหยที่มีต่อความยาว nanowires

ผลการวิเคราะห์วัสดุโครงสร้าง nanowires ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการไอระเหยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 °C ในเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะรูปร่างโครงสร้างเป็นแบบ nanowires โดยส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน เวลาที่ใช้ในกระบวนการไอระเหยมีผลต่อความยาวของโครงสร้าง nanowires ถ้าใช้เวลาในการสังเคราะห์มากในกระบวนการไอระเหย ทำให้โครงสร้าง nanowires มีความยาวเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.10 - 4.15 แผ่นทองแดงสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 °C ในบรรยากาศปกติ จากภาพ SEM มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 100 ถึง 600 นาโนเมตร และสามารถวัดความยาวของโครงสร้าง nanowires มีขนาด 25, 30, 35 และ 40 ไมโครเมตร เวลาที่ใช้ในกระบวนการไอระเหยคือ 10, 15, 20 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ



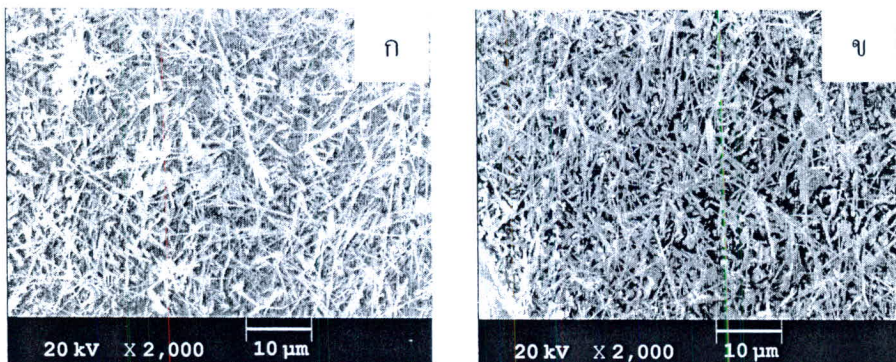


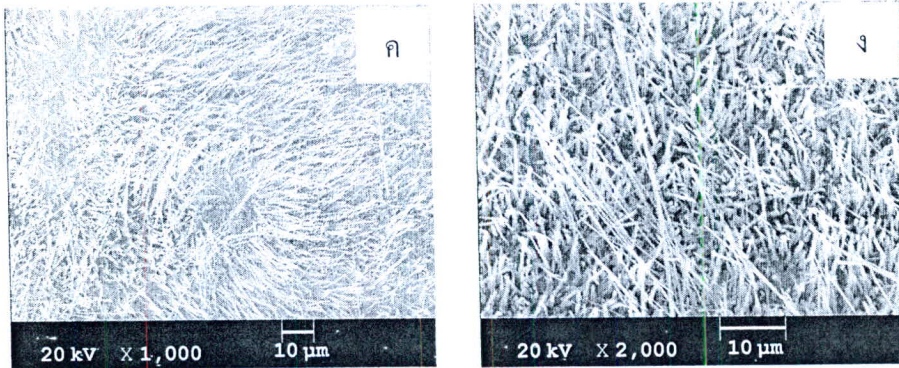
ภาพที่ 4.10 ภาพ SEM ของผลิตภัณฑ์เตรียมที่อุณหภูมิ 600 °C ในบรรยากาศปกติ ที่เวลาแตกต่างกัน (ก) 10 ชั่วโมง (ข) 15 ชั่วโมง (ค) 20 ชั่วโมง และ (ง) 24 ชั่วโมง



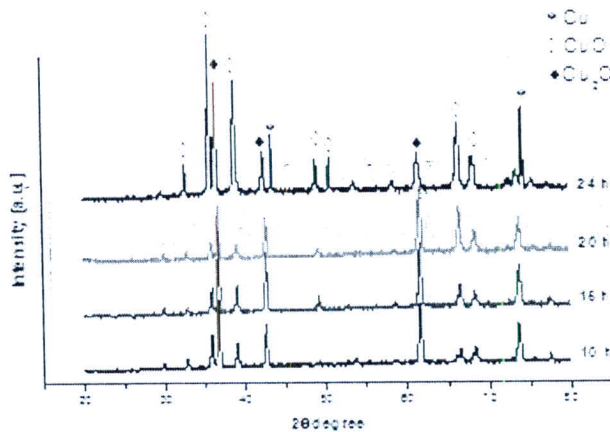
ภาพที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากภาพ 4.10 แสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

แผ่นทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน ในอัตราการไหลของแก๊ส 2 L/min จากภาพ SEM เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดระหว่าง 150 ถึง 200 นาโนเมตร และ ความยาวของ nanowires 24 30 45 และ 60 ไมโครเมตร เวลาที่ใช้ในกระบวนการไอระเหยคือ 10, 15, 20 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ



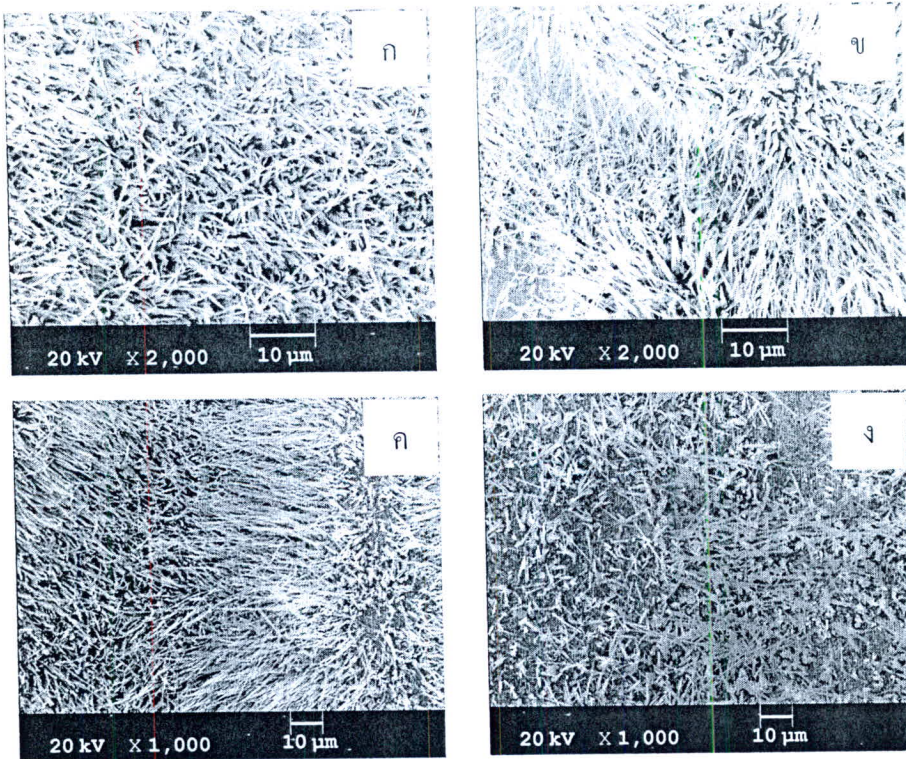


ภาพที่ 4.12 ภาพ SEM ของผลิตภัณฑ์เตรียมที่อุณหภูมิ 600 °C ในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจนที่เวลาแตกต่างกัน (ก) 10 ชั่วโมง (ข) 15 ชั่วโมง (ค) 20 ชั่วโมง และ (ง) 24 ชั่วโมง

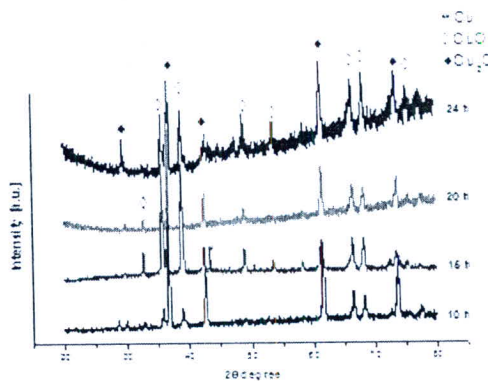


ภาพที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากภาพที่ 4.12 แสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

แผ่นทองแดงเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ในบรรยากาศของอากาศไหลผ่านน้ำกลั่น ในอัตราการไหลของอากาศ 5 L/min เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 200 ถึง 600 นาโนเมตร และ ความยาวของ โครงสร้าง nanowires 24, 30, 45 และ 60 ไมโครเมตร เวลาที่ใช้ในกระบวนการไอระเหยคือ 10, 15, 20 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ



ภาพที่ 4.14 ภาพ SEM ของผลิตภัณฑ์เตรียมที่อุณหภูมิ 600 °C ในบรรยากาศของอากาศไหลผ่าน น้ำกลั่นที่เวลาแตกต่างกัน (ก) 10 ชั่วโมง (ข) 15 ชั่วโมง (ค) 20 ชั่วโมง และ (ง) 24 ชั่วโมง

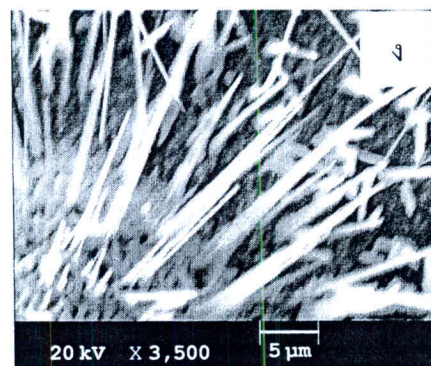
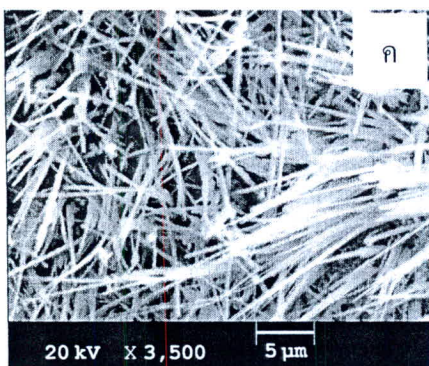
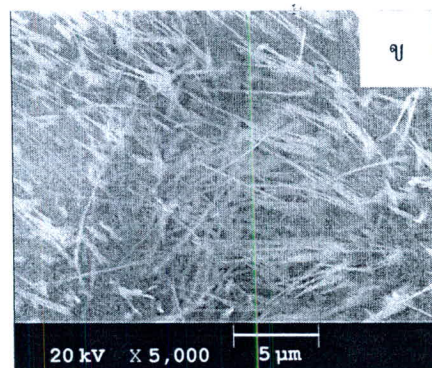
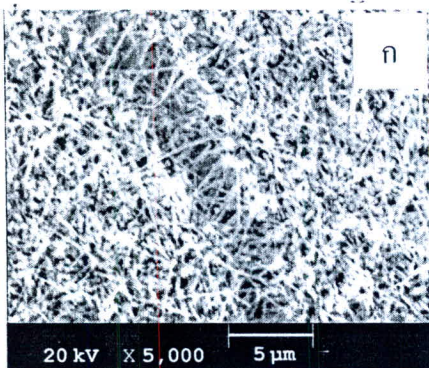


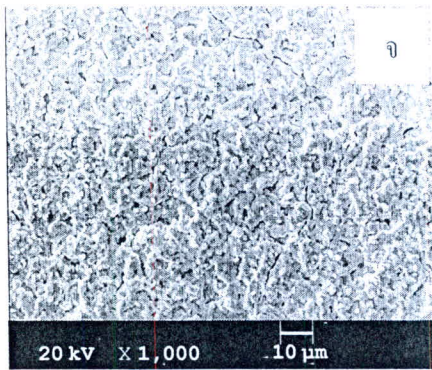
ภาพที่ 4.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากภาพที่ 4.14 แสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

4.1.3 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการไอระเหยที่มีผลต่อขนาดของ nanowires

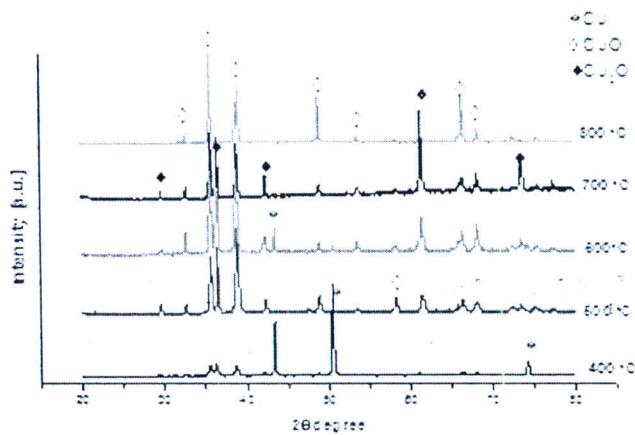
เราศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการไอระเหยบนการเติบโตของ CuO nanowires โดยศึกษาจาก 5 ผลิตภัณฑ์ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 และ 800 °C โครงสร้าง CuO nanowires เตรียมโดยกระบวนการไอระเหย เงื่อนไขการเตรียมในกระบวนการไอระเหยมีผลกับการเกิดของ nanowires ที่อุณหภูมิต่ำ nanowires มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ใน

กระบวนการไอระเหย ที่อุณหภูมิ 800 °C ไม่พบโครงสร้าง nanowires หรือ nanofiber โครงสร้าง nanowires สามารถเกิดที่อุณหภูมิ 400 °C ซึ่งสามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการไอระเหยสูงขึ้น การสังเคราะห์โครงสร้าง nanowires หรือ nanofibers ค่อนข้างทำได้ยาก ซึ่งในงานวิจัยนี้พยายามสังเคราะห์ โครงสร้างนาโนด้วยกระบวนการไอระเหยที่อุณหภูมิสูง 800 °C แต่ไม่เกิดโครงสร้าง nanowires หรือ fibers ในบรรยากาศของอากาศปกติในภาพที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายจาก SEM ทั้ง 5 ผลิตรัณฑ์ จากลักษณะรูปร่างของตัวอย่างจะสังเกตว่า ที่ 400 °C จะเกิดโครงสร้างของ nanowires จำนวนมาก และการกระจายตัวสม่ำเสมอ ผลิตรัณฑ์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเส้นลวดนาโน ประมาณ 50 นาโนเมตร และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ การเตรียมผลิตรัณฑ์ที่อุณหภูมิที่ 500 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กระบวนการไอระเหย ที่อุณหภูมิ 500 °C จะได้ โครงสร้างนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าการเตรียมที่ 400 °C การเตรียมตัวอย่างที่ 600 °C เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าการเกิดที่ 400 °C และ 500 °C ตัวอย่างที่เตรียมอุณหภูมิ 700 °C โครงสร้างที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างใหญ่ประมาณ 3 ไมโครเมตร จะมีรูปร่างคล้าย nanorods หรือริบบิ้นนาโน และตัวอย่างที่เตรียมอุณหภูมิ 800 °C ไม่เกิดโครงสร้าง nanowires หรือ fibers ดังแสดงในภาพที่ 4.16 (จ)



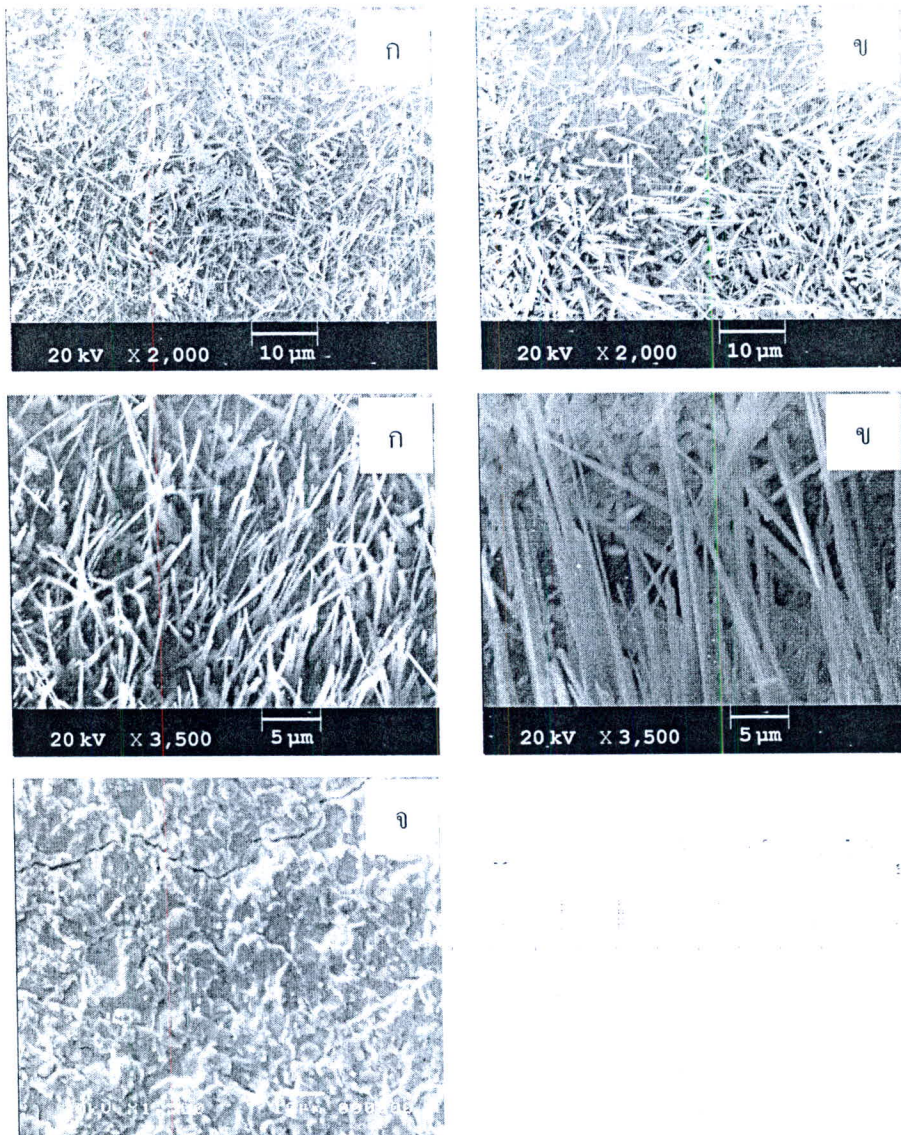


ภาพที่ 4.16 ภาพ SEM ของโครงสร้างนาโนในเวลา 24 ชั่วโมง ในอากาศปกติเตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) 400 °C (ข) 500 °C (ค) 600 °C (ง) 700 °C และ (จ) 800 °C

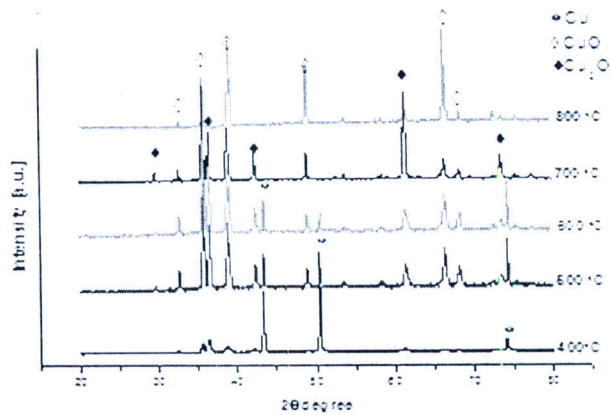


ภาพที่ 4.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากตัวอย่างเตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกันในอากาศปกติแสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

การสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจนในอัตราการไหลของแก๊ส 2 L/min ภาพที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายจาก SEM ทั้ง 5 ผลิตภัณฑ์เตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 400 °C จะเกิดโครงสร้างของ nanowire จำนวนมาก และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และมีขนาดความยาว ประมาณ 50 นาโนเมตร และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 500 °C โครงสร้าง nanowires มีขนาดสั้น และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 800 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าการเตรียมที่อุณหภูมิ 400 °C การเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600 °C มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าการเกิดที่ 400 °C และ 500 °C ตัวอย่างสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 °C มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 ไมโครเมตร ตัวอย่างเตรียมที่อุณหภูมิ 800 °C ไม่พบหรือไม่เกิดโครงสร้าง nanowires หรือ fibers

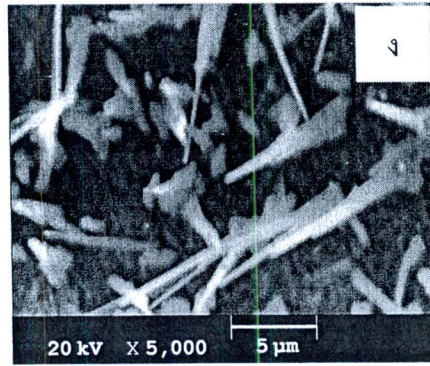
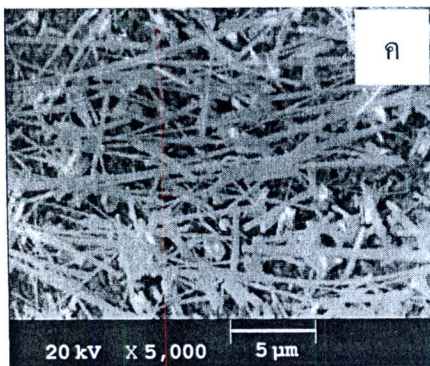
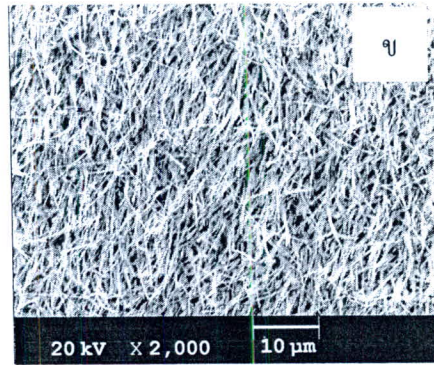
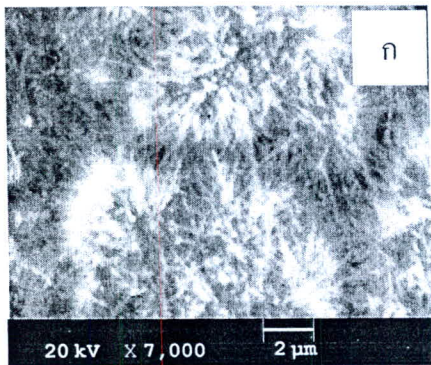


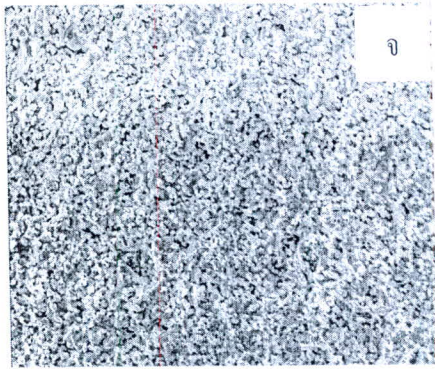
ภาพที่ 4.18 ภาพ SEM ของโครงสร้างนาโนในเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) 400 °C (ข) 500 °C (ค) 600 °C (ง) 700 °C และ (จ) 800 °C



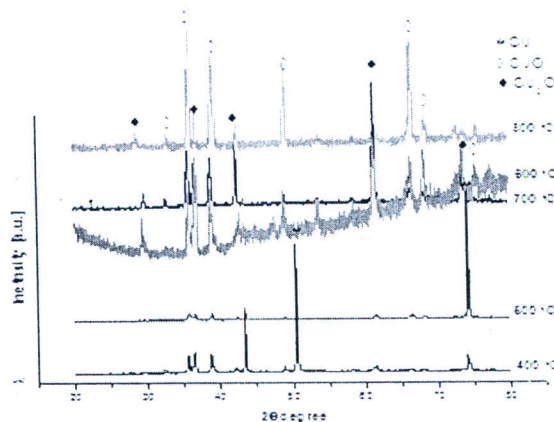
ภาพที่ 4.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากตัวอย่างเตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน แสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

การสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ในบรรยากาศของอากาศไหลผ่านน้ำกลั่นในอัตราการไหลของแก๊ส 2 L/min ภาพที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายจาก SEM ทั้ง 5 ผลิตภัณฑ์เตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 400 °C จะเกิดโครงสร้างของ nanowires จำนวนมาก การกระจายตัวสม่ำเสมอ และเกาะกันเป็นกลุ่ม ๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 15 ไมโครเมตร ตัวอย่างเตรียมที่อุณหภูมิ 500 °C จะได้ nanowires กระจายตัวอย่างหนาแน่นอยู่กันอย่างเป็นระเบียบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าการเตรียมที่อุณหภูมิ 400 °C ตัวอย่างที่เตรียมอุณหภูมิ 600 °C โครงสร้างนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าการเกิดที่อุณหภูมิ 400 °C และที่อุณหภูมิ 500 °C ตัวอย่างที่เตรียมอุณหภูมิ 700 °C โครงสร้างที่สังเคราะห์ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ลักษณะคล้ายแท่งนาโน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 ไมโครเมตร ตัวอย่างเตรียมที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ไม่พบโครงสร้าง nanowires หรือ fibers





ภาพที่ 4.20 ภาพ SEM ของโครงสร้างนาโนในเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศของอากาศไหลผ่านน้ำกลั่นเตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) 400 °C (ข) 500 °C (ค) 600 °C (ง) 700 °C และ (จ) 800 °C

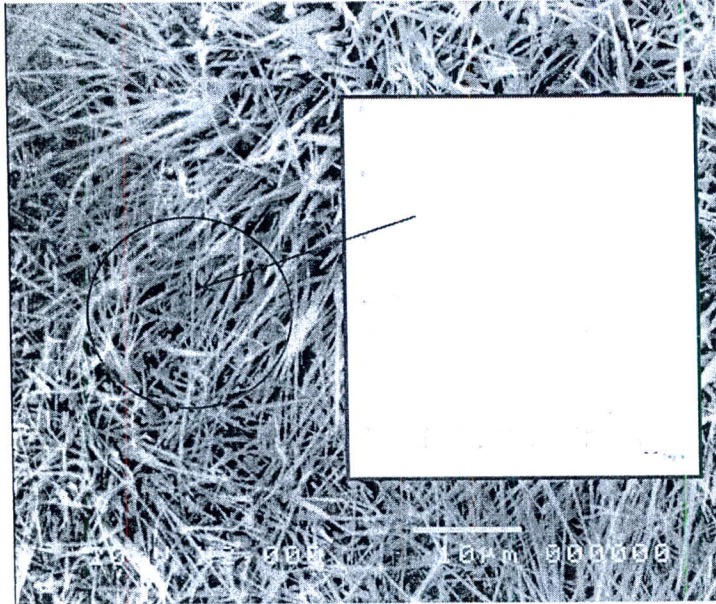


ภาพที่ 4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากตัวอย่างเตรียมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ในบรรยากาศของอากาศไหลผ่านน้ำกลั่นแสดงเฟสของ Cu, CuO และ Cu₂O

การเตรียม CuO nanowire โดยกระบวนการไอระเหย เงื่อนไขในกระบวนการไอระเหยมีผลกับการเกิดของโครงสร้างนาโน ที่อุณหภูมิต่ำ โครงสร้าง nanowires มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไอระเหย ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 700 °C จะเกิดโครงสร้าง CuO fibers ตัวอย่างที่เตรียมอุณหภูมิตั้งแต่ 400 °C และ 600 °C จะเกิดโครงสร้าง CuO nanowires จำนวนมาก และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 นาโนเมตร ถึง 2 ไมโครเมตร เมื่อเวลาของกระบวนการไอระเหยเพิ่มขึ้น ความยาวของ nanowires เพิ่มขึ้นด้วย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการไอระเหย มีอิทธิพลต่อความยาวของโครงสร้างนาโนแต่ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างนาโน

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X- Ray Fluorescence (EDX)

จากการสังเคราะห์โดยวิธีไอระเหยทางความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างเป็นแบบ nanowire สังเคราะห์ในบรรยากาศอากาศปกติ แก๊สออกซิเจน และไอน้ำ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบว่า nanowires ประกอบด้วยธาตุ Cu และ O ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX ที่ได้ตรงกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง nanowires ประกอบไปด้วยเฟสของ CuO ซึ่งมีโครงสร้างแบบ monoclinic



ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX ของ nanowires ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีไอระเหยทางความร้อน

4.1.5 ผลการศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สของโครงสร้าง nanowires

นำโครงสร้างนาโนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน ในอัตราการไหลของแก๊ส 2 L/min ดังแสดงในภาพที่ 4.18 มาศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สโดยอาศัยกฎของโอห์ม (Ohm's Law) สมการ 3.1 ถึง 3.3 และค่าการตอบสนอง (Sensitivity, S) ของ semiconducting gas sensor ($S = R_s / R_a$) และนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์การตอบสนองของโครงสร้างนาโนต่อแก๊ส

ตารางที่ 4.1 ผลการตอบสนองต่อ ethanol ของโครงสร้าง nanowires

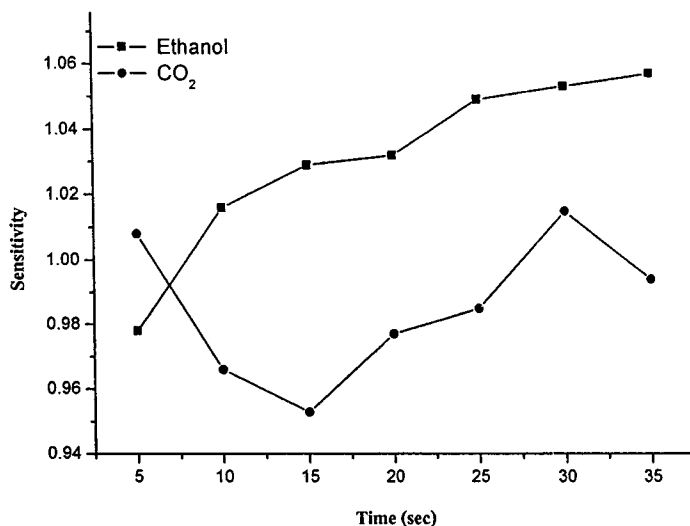
V_C (Volt)	V_S (Volt)	I (μA)	R_{sensor} ($M\Omega$)	R_{air} ($M\Omega$)	Sensitivity	Time (Sec.)
10	4.396	5.605	0.784	0.802	0.978	5
10	4.489	5.511	0.815	0.802	1.016	10
10	4.521	5.479	0.825	0.802	1.029	15
10	4.529	5.472	0.828	0.802	1.032	20
10	4.569	5.431	0.841	0.802	1.049	25
10	4.579	5.422	0.845	0.802	1.053	30
10	4.588	5.412	0.848	0.802	1.057	35

ตารางที่ 4.2 ผลการตอบสนองต่อ CO₂ ของโครงสร้าง nanowires

V_C (Volt)	V_S (Volt)	I (μA)	R_{sensor} ($M\Omega$)	R_{air} ($M\Omega$)	Sensitivity	Time (Sec.)
10	5.370	4.630	1.160	1.151	1.008	5
10	5.265	4.735	1.112	1.151	0.966	10
10	5.230	4.770	1.096	1.151	0.953	15
10	5.291	4.709	1.124	1.151	0.977	20
10	5.313	4.687	1.134	1.151	0.985	25
10	5.388	4.613	1.168	1.151	1.015	30
10	5.335	4.665	1.144	1.151	0.994	35

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1-4.2 เรานำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองต่อแก๊สของโครงสร้าง CuO nanowires กับเวลา ดังภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของโครงสร้างนาโนต่อแก๊ส ethanol และ CO₂ ณ อุณหภูมิห้อง กับเวลา ในบรรยากาศของ ethanol พบว่าค่าการตอบสนองขึ้นอยู่กับเวลาที่ปล่อยแก๊สเข้าไปในระบบ เวลาที่ 5 ถึง 35 วินาที มีค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้น ถ้าใช้เวลาในการปล่อยแก๊สมากขึ้นค่าการตอบสนองต่อแก๊สเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ในบรรยากาศของ CO₂ ค่าการตอบสนองต่อแก๊สจะลดลงที่เวลา 15 และ 35 วินาที ซึ่งผลการทดสอบสังเกตว่า เวลาในการปล่อยแก๊สเข้าไปในระบบมีผลต่อค่าการตอบสนองของโครงสร้างนาโนต่อแก๊ส จากผลการทดลองมีลักษณะ

แนวโน้มสอดคล้องกับรายงานของ Ruksa and et al. (2009) ซึ่งอาศัยกระบวนการออกซิเดชัน และ โครงสร้าง nanowires มีการตอบสนองต่อแก๊ส ethanol



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองต่อแก๊สของ โครงสร้าง CuO nanowires

กับเวลา ในบรรยากาศของ ethanol และ CO₂ ณ อุณหภูมิห้อง

จากผลการศึกษาสมบัติการตอบสนองของโครงสร้างนาโนต่อแก๊ส และ วัดสัญญาณค่าความต่างศักย์ของ sensor พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ในบรรยากาศของแก๊ส ซึ่งอาจเป็นเพราะสมบัติการเป็น semiconductor ชนิด P และน่าจะมิกลไกคังต่อไปนี้เมื่อปล่อยแก๊ส ethanol หรือ CO₂ ถูกปล่อยเข้าไปในระบบจะเกิดแรง แวนเดอร์วาลส์ เกิดปฏิกิริยาอ่อนระหว่าง ethanol กับ โครงสร้างนาโนเป็นผลทำให้ค่าความต่างศักย์ และค่าต้านทานของ sensor เปลี่ยนแปลง

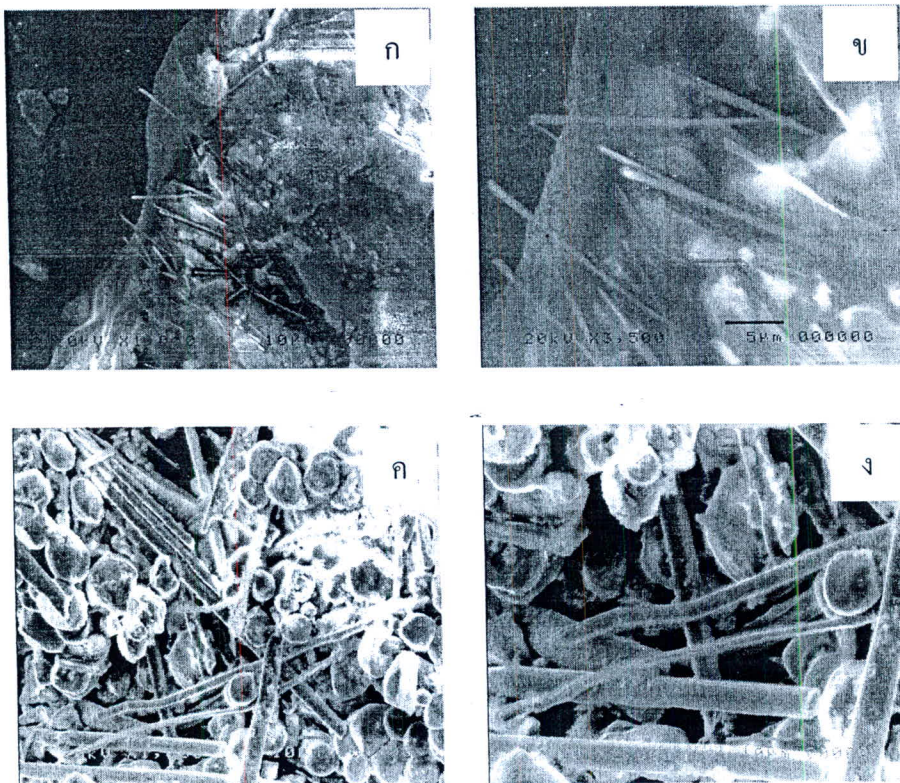
4.1.6 ผลการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนคอปเปอร์ออกไซด์โดยใช้ตัวกระตุ้น

ผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการแยกส่วนทางความร้อน (Thermal decomposition) และใช้สารละลายเกลือเป็นตัวกระตุ้น เมื่อมองด้วยตาเปล่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีสีค่อนข้างดำ ล้างด้วยน้ำกลั่นและ ethanol โดยเครื่องอัลตราโซนิก อบให้แห้งนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM และ XRD ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.24-4.25 จากภาพ SEM พบว่าลักษณะรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างลักษณะรูปร่างคล้าย nanorods จำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Xu et al. (2002) สังเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการแยกส่วนทางความร้อน (Thermal decomposition) ซึ่งอาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสาร Cu(CH₃COO)₂·H₂O และ H₂C₂O₄·2H₂O ในสาร ether กับสาร NaCl ให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

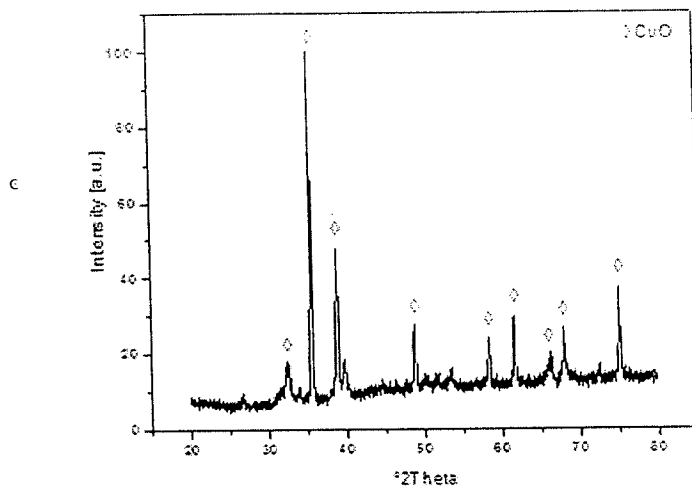
สังเคราะห์ได้โครงสร้าง nanorods มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ถึง 100 นาโนเมตร และมีความยาวระหว่าง 1 ถึง 3 ไมโครเมตร ซึ่งได้อธิบายกลไกการเกิดโครงสร้างเหล่านี้เป็นไปตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



สารประกอบ CuC_2O_4 จะมีสีฟ้า แต่เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีดำซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้คือ CuO



ภาพที่ 4.24 ภาพ SEM ของโครงสร้างนาโนในเตรียมโดยกระบวนการแยกส่วนทางความร้อน (Thermal decomposition)



ภาพที่ 4.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธี thermal decomposition แสดงเฟสของ CuO

จากภาพที่ 4.24 (ก) และ (ข) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 100 ถึง 200 นาโนเมตร และมีขนาดความยาว 15 ไมโครเมตร เมื่อถ่ายภาพ SEM ที่บริเวณอื่นพบว่าโครงสร้างที่สังเคราะห์มีขนาดใหญ่กว่า ภาพที่ 4.24 (ค) และ (ง) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 500 นาโนเมตร ถึง 5 ไมโครเมตร และมีความยาวประมาณ 30 ถึง 50 ไมโครเมตร จากภาพ SEM จะเห็นได้ว่าโครงสร้างนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดใหญ่กว่า แต่มีความยาวมากกว่าผลงานวิจัยที่กล่าวถึง (Xu and et al., 2002) ในภาพที่ 4.25 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโครงสร้างแท่งนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการแยกส่วนด้วยความร้อน แสดงเฟสของ CuO และมีโครงสร้างแบบ monoclinic (JCPDS no. 05 - 0661) และมีค่า Lattice Constance $a = 0.468$ nm, $b = 0.342$ nm, $c = 0.513$ nm ไม่พบเฟสของสารเจือ เช่น NaCl และ ether

4.1.7 ผลการศึกษาสมบัติการตอบสนองของโครงสร้าง nanorods

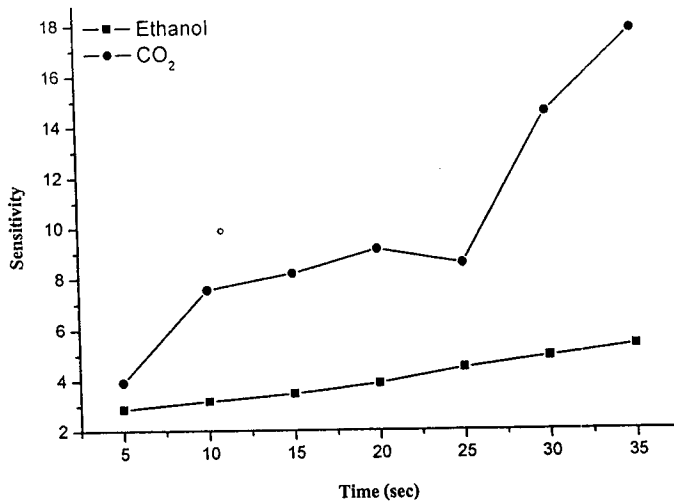
เราทำการเลือกคุณสมบัติที่ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้าง CuO nanorods ที่สังเคราะห์ได้ มาศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อแก๊ส โดยอาศัยกฎของโอห์ม (Ohm's Law) สมการ 3.1 ถึง 3.3 และค่าการตอบสนอง (Sensitivity, S) ของ semiconducting gas sensor ($S = R_s / R_0$) แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.3 และนำข้อมูลที่ได้อ่านไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์การตอบสนองของโครงสร้างนาโนต่อแก๊สกับเวลา

ตารางที่ 4.3 ผลการตอบสนองต่อแก๊ส ethanol ของโครงสร้าง nanorods

V_c (Volt)	Time (Sec.)	V_s (Volt)	I (μA)	R_{sensor} ($M\Omega$)	R_{air} ($M\Omega$)	Sensitivity
10	5	9.924	0.076	131.100	45.729	2.867
10	10	9.932	0.069	144.985	45.729	3.171
10	15	9.937	0.063	158.490	45.729	3.466
10	20	9.944	0.056	176.936	45.729	3.869
10	25	9.951	0.049	204.339	45.729	4.468
10	30	9.956	0.044	224.225	45.729	4.903
10	35	9.959	0.041	244.098	45.729	5.338

ตารางที่ 4.4 ผลการตอบสนองต่อแก๊ส CO₂ ของโครงสร้าง nanorods

V_c (Volt)	Time (Sec.)	V_s (Volt)	I (μA)	R_{sensor} ($M\Omega$)	R_{air} ($M\Omega$)	Sensitivity
10	5	9.961	0.039	257.398	65.445	3.933
10	10	9.980	0.020	494.050	65.445	7.549
10	15	9.981	0.019	536.634	65.445	8.200
10	20	9.983	0.017	597.802	65.445	9.134
10	25	9.982	0.018	560.798	65.445	8.569
10	30	9.990	0.011	951.381	65.445	14.537
10	35	9.991	0.009	1161.791	65.445	17.752



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองต่อแก๊สของโครงสร้าง CuO nanorods กับเวลา ในบรรยากาศของ ethanol และ CO₂ ณ อุณหภูมิห้อง

จากภาพที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของโครงสร้างนาโนต่อแก๊ส ethanol และ CO₂ ณ อุณหภูมิห้อง กับเวลา ในบรรยากาศของ ethanol ค่าการตอบสนองขึ้นอยู่กับเวลาที่ปล่อยแก๊สเข้าไปในระบบ ถ้าใช้เวลาในการปล่อยแก๊สมากขึ้นค่าการตอบสนองก็เพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ในบรรยากาศของ CO₂ ค่าการตอบสนองต่อแก๊สจะลดลงที่เวลา 20 วินาที จากผลการศึกษาศัมบัติการตอบสนองต่อแก๊สจะสังเกตเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการปล่อยแก๊ส เข้าไปในระบบมีผลต่อค่าการตอบสนองของโครงสร้างนาโนต่อแก๊ส ผลจากการศึกษาทดลองพบว่ามีลักษณะแนวโน้มสอดคล้องกับรายงานของ Lioa and et al. (2001) และ โครงสร้าง nanorods มีการตอบสนองต่อแก๊ส ethanol

4.2 ผลการสังเคราะห์ SnO₂ nanostructures

เราได้ดำเนินการสังเคราะห์โครงสร้าง SnO₂ nanostructures โดยวิธีทางความร้อนในเตาความร้อน 2 รูปแบบ คือ เตาท่อ (quartz tube) และเตาสีเหลี่ยม (chamber furnace)

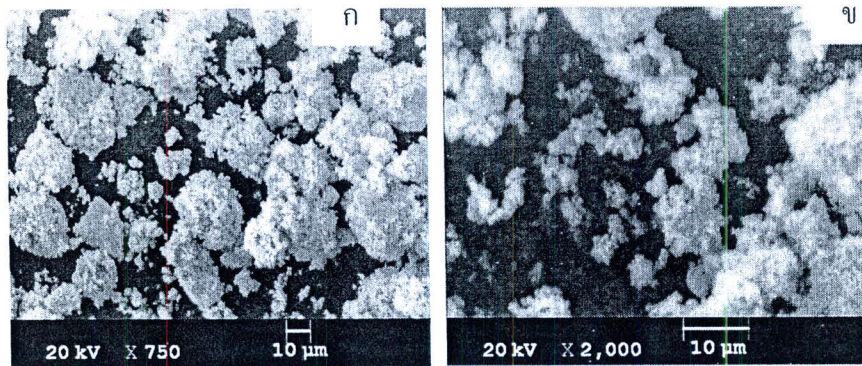
4.2.1 ผลของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากเตาท่อควอทซ์

การดำเนินการทดลองสังเคราะห์โครงสร้าง SnO₂ nanostructures เราใช้ ฟงคีนุกบริสุทซ์ ฟงคีนุกบริสุทซ์ผสมกับฟงถ่านกะลา และฟงคีนุกบริสุทซ์ผสมกับฟงแกรไฟท์ เป็นสารตั้งต้น ในอัตราส่วนที่ต่างกัน เผาที่อุณหภูมิและบรรยากาศต่างๆกัน เมื่อปล่อยให้เตาท่อควอทซ์เย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก

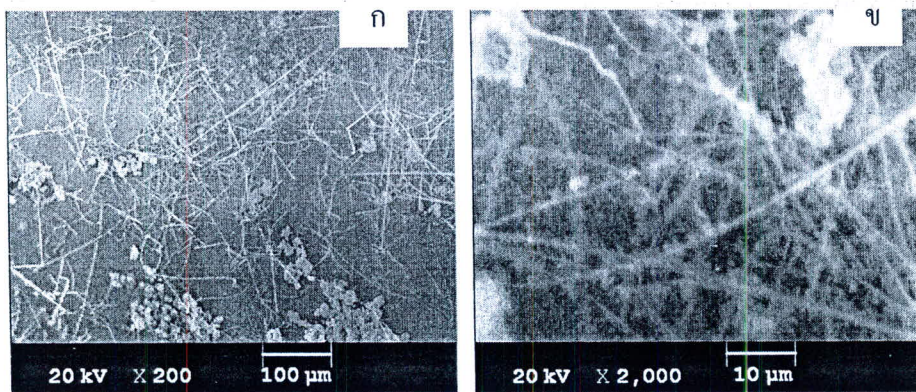
การสังเคราะห์บนผงตัวอย่าง และฐานรองซิลิกอน
ตอบสนองต่อแก๊ส

จะถูกนำมาศึกษาวิเคราะห์สมบัติปั้งซี และการ

ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากการเผาผงดิบที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง สังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.27-4.28

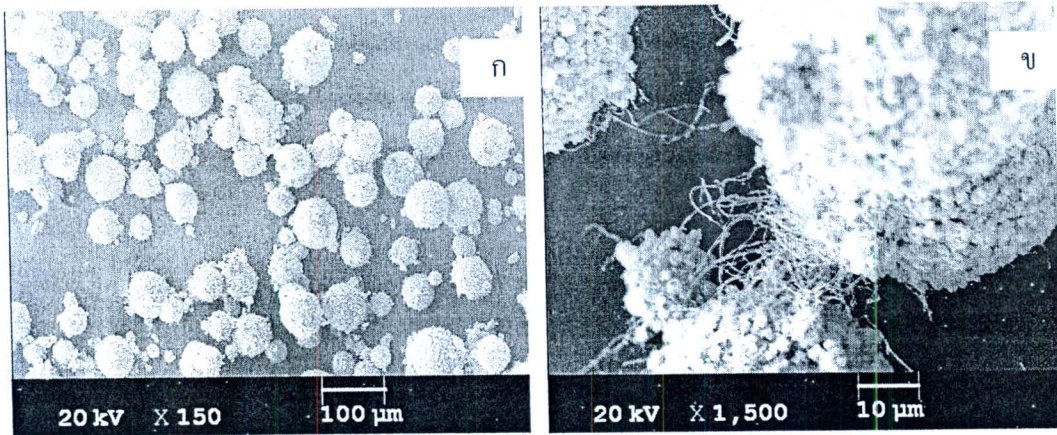


ภาพที่ 4.27 ภาพ SEM ของผงผลิตภัณฑ์ หลังเผาที่ 2 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง



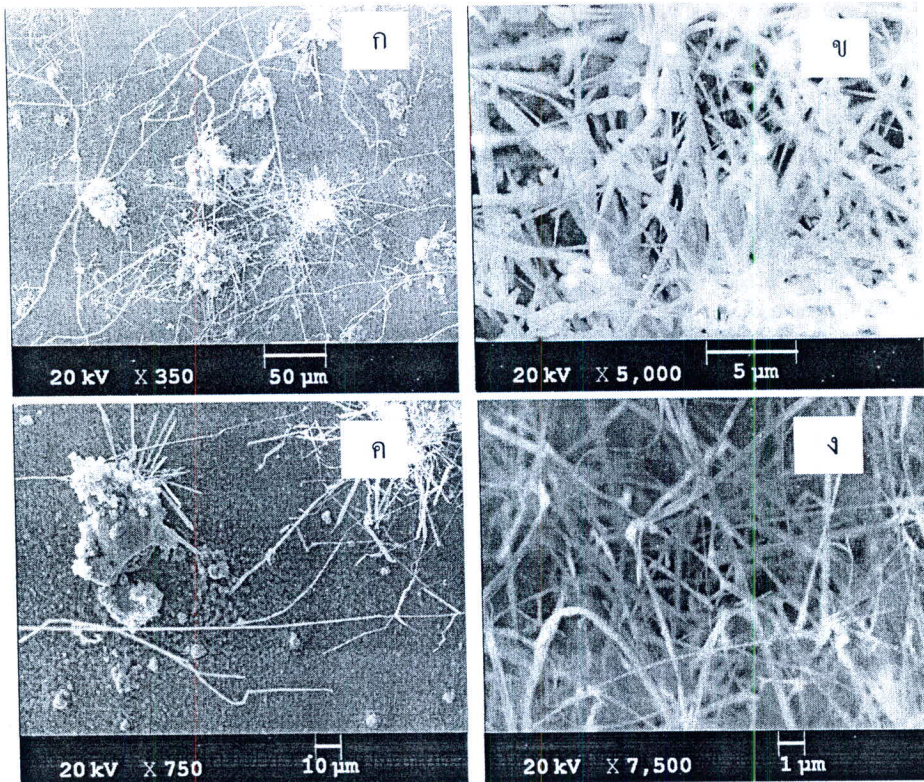
ภาพที่ 4.28 ภาพ SEM ของผลิตภัณฑ์บนฐานรองซิลิกอน (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากการเผาผงดิบที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.29



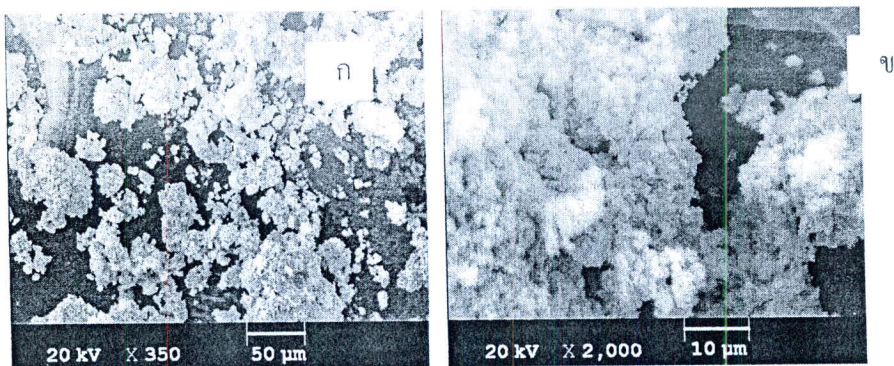
ภาพที่ 4.29 ภาพ SEM ของผลผลิตภักดิ์ หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองชีวิตก้อนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.30



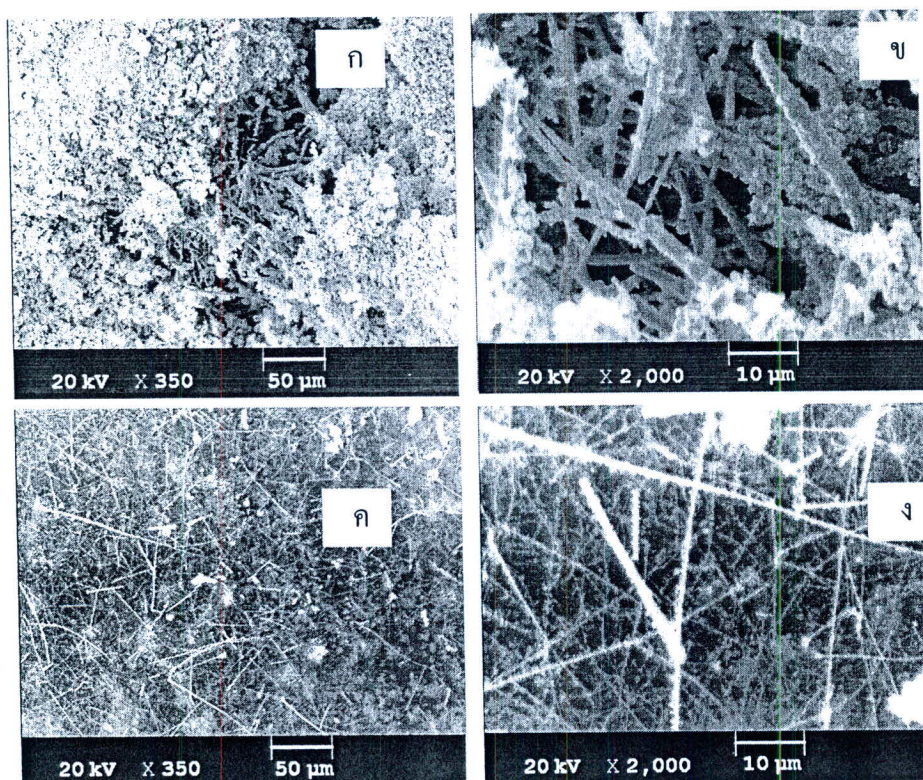
ภาพที่ 4.30 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 ภาพ SEM ของผงตัวอย่างหลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

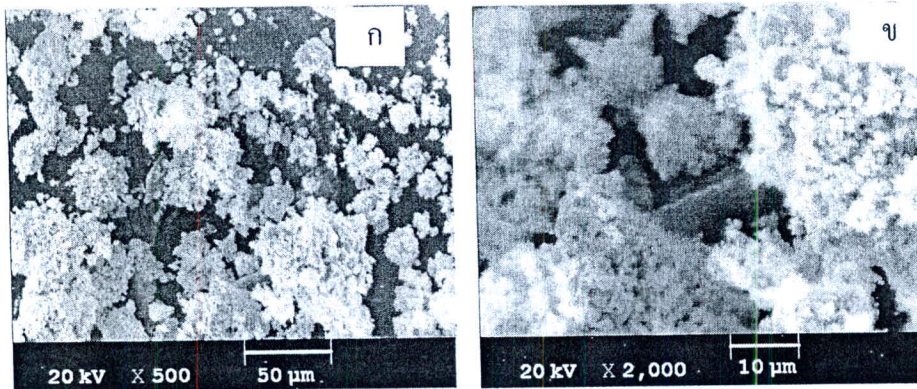
เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข)กำลัง ขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

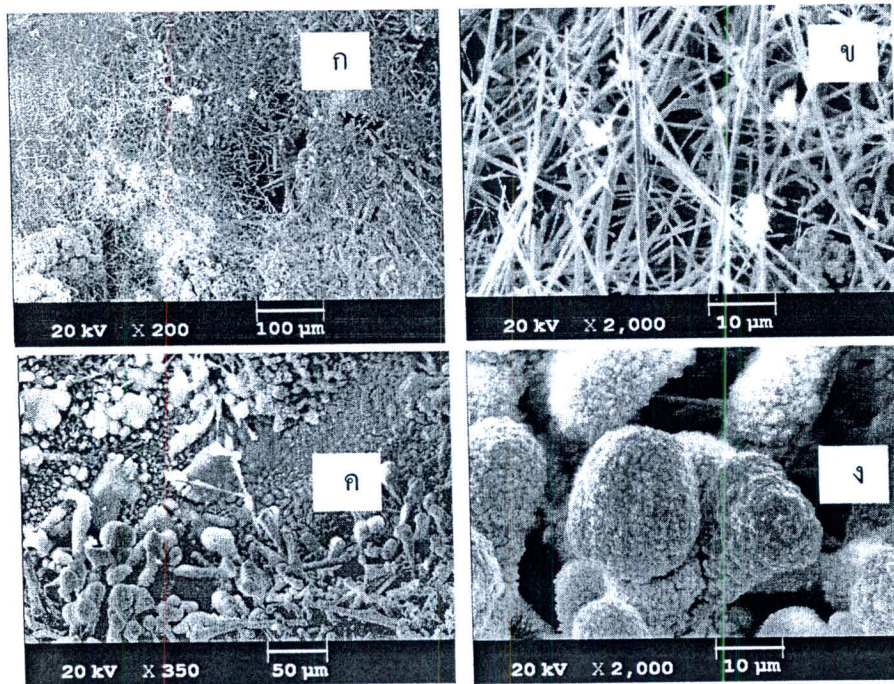
เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊ส

ครั้งที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

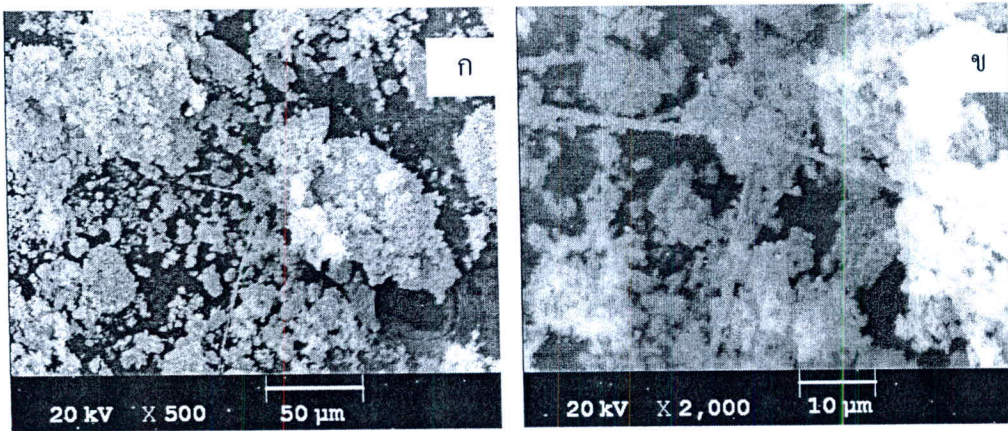
เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.33 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

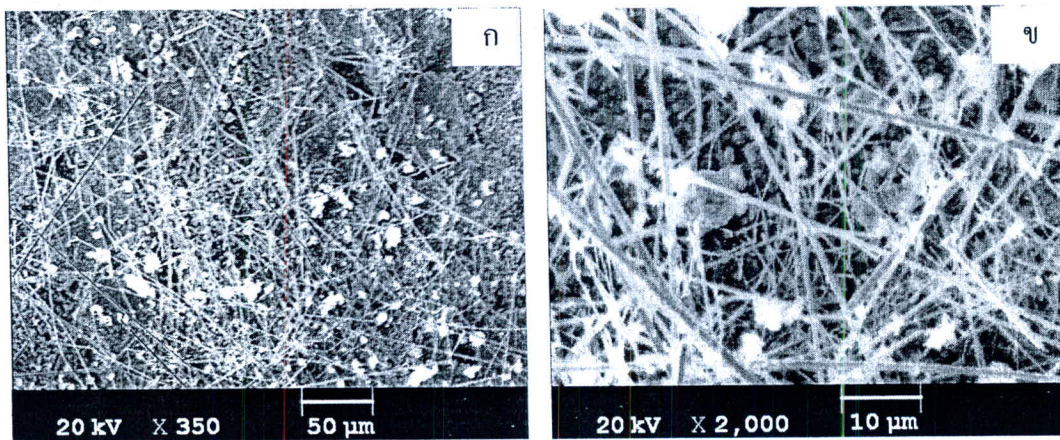
เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊ส

คงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.34



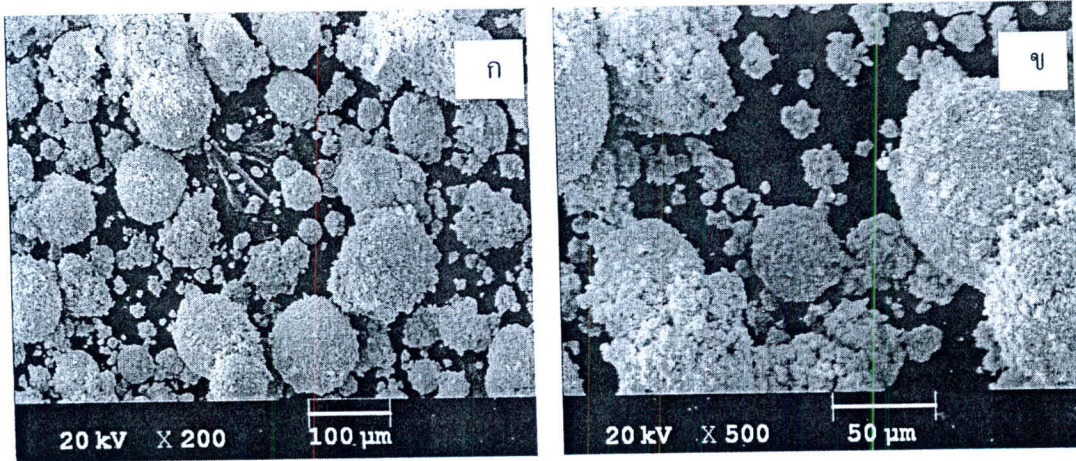
ภาพที่ 4.34 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.35



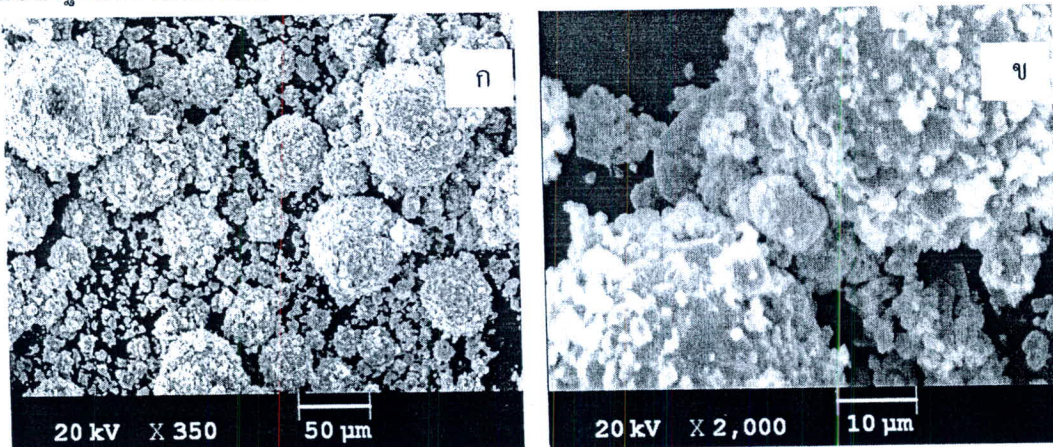
ภาพที่ 4.35 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง A09 (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ อาร์กอน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊ส คงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.36



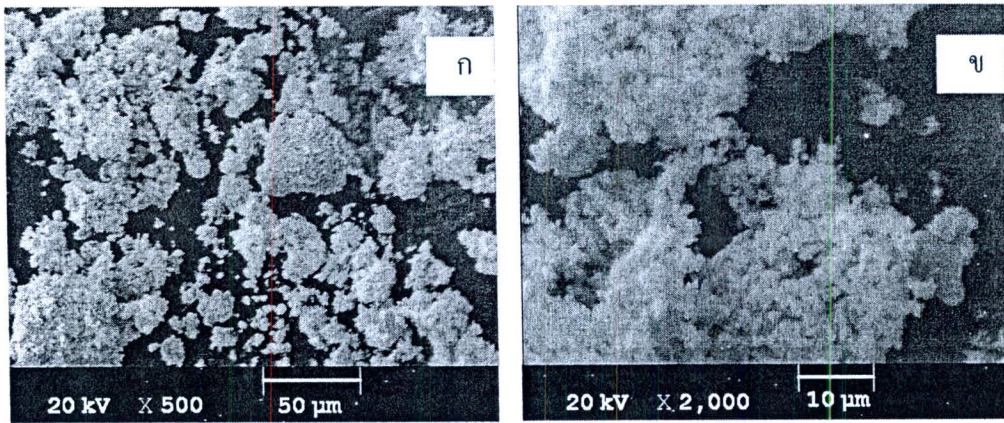
ภาพที่ 4.36 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.37



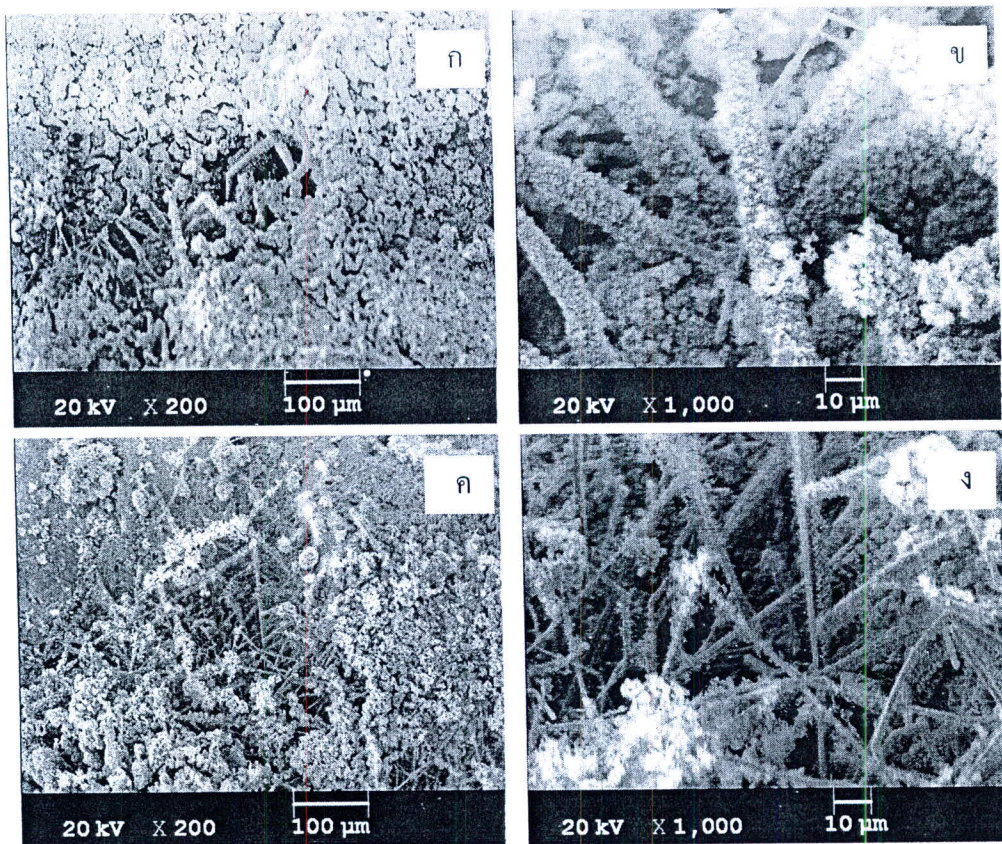
ภาพที่ 4.37 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง A10 (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ อาร์กอน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊ส คงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.38



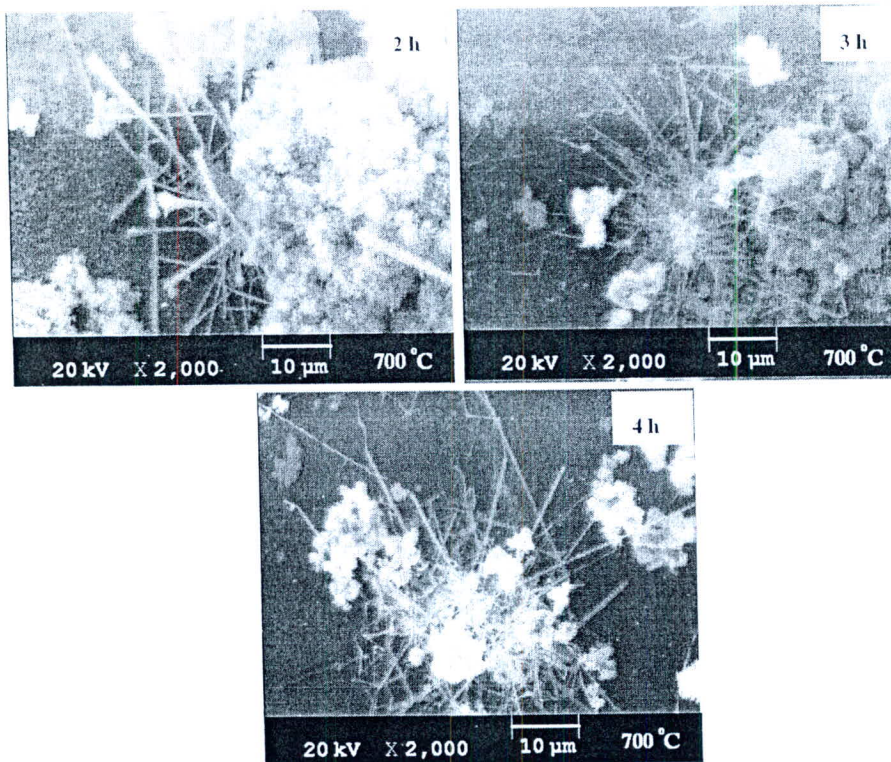
ภาพที่ 4.38 ภาพ SEM ของตัวอย่างหลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.39 จากภาพ SEM ของการเตรียมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ ในเตาท่อควอทซ์ที่ใช้ผงดีบุกบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นนั้น พบว่า บนผงวัสดุตัวอย่างของแต่ละเงื่อนไขจะประกอบไปด้วย nanoparticles และ nanowires ยกเว้นการเตรียมที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน และออกซิเจน จะสังเกตเห็นเฉพาะ nanoparticles และ microparticles เท่านั้น ดังภาพที่ 4.36 และ 4.37 นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกว่าบนผงวัสดุตัวอย่าง (source materials) ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 800 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ



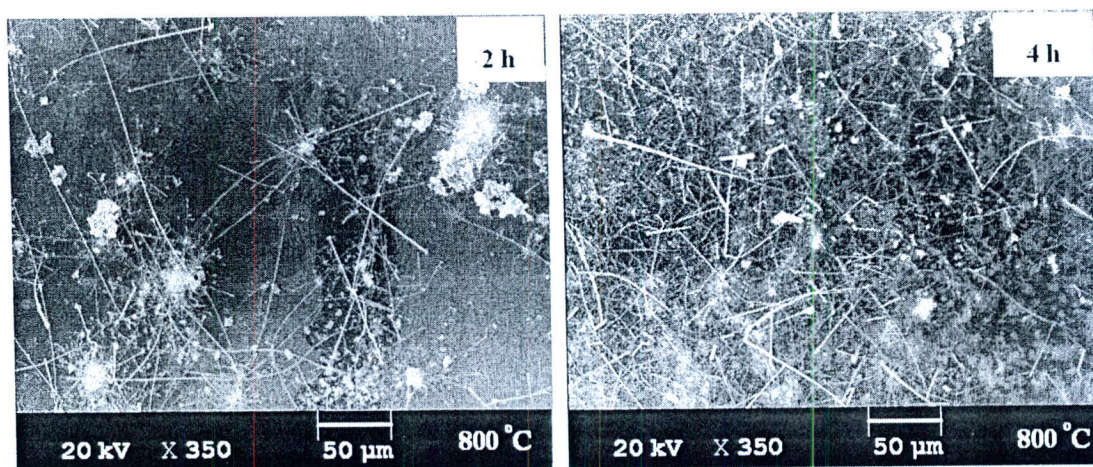
ภาพที่ 4.39 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง A11 (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

ไนโตรเจน และออกซิเจน ประกอบไปด้วย microspheres ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10 ไมโครเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร และแต่ละ microsphere ถูกเชื่อมต่อกันด้วย nanowires ที่ยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร กว้าง 200 ไมโครเมตร ถึง 500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แปลกใหม่ นอกจากนั้นแล้ว ภาพ SEM บนฐานรองซิลิกอนยังพบว่า การเตรียมที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 700 °C สังเกตเห็นโครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่งกระจายตัวเป็นกลุ่มออกจากอนุภาคอย่างเบาบาง โครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่งจะเกิดขึ้นหนาแน่นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 800 °C และ 900 °C ตามลำดับ จากภาพ SEM ยังพบอีกว่า ที่อุณหภูมิ 700 °C เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น nanowires จะยาวขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.27-4.29 และที่อุณหภูมิ 800 °C เมื่อเพิ่มเวลาจาก 2 ชั่วโมง เป็น 4 ชั่วโมง



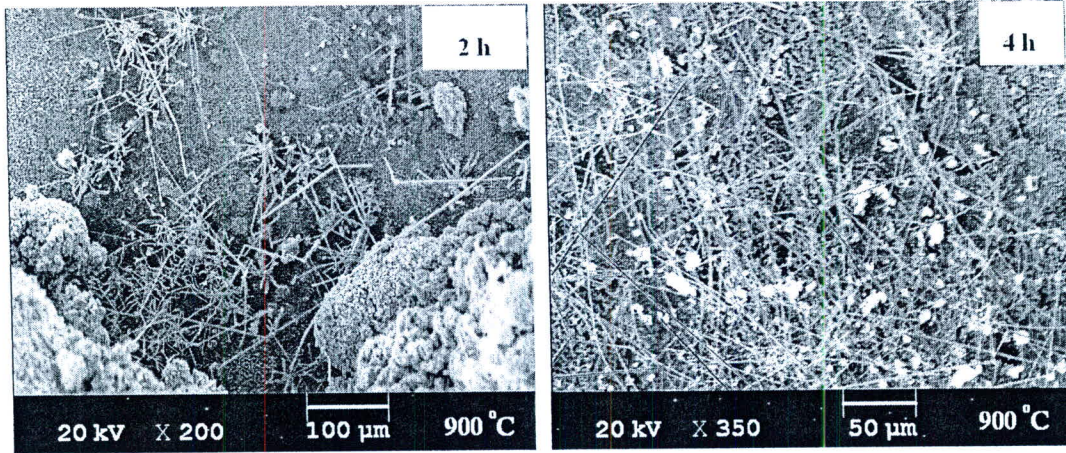
ภาพที่ 4.40 ความยาวของ nanowires ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 700 °C เวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

สังเกตเห็นว่า nanowires ที่เกิดขึ้นบนฐานรองซิลิกอนส่วนใหญ่แล้วจะยาวขึ้น และเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น แสดงดังภาพที่ 4.40 เช่นเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อเพิ่มเวลาจาก 2 ชั่วโมง

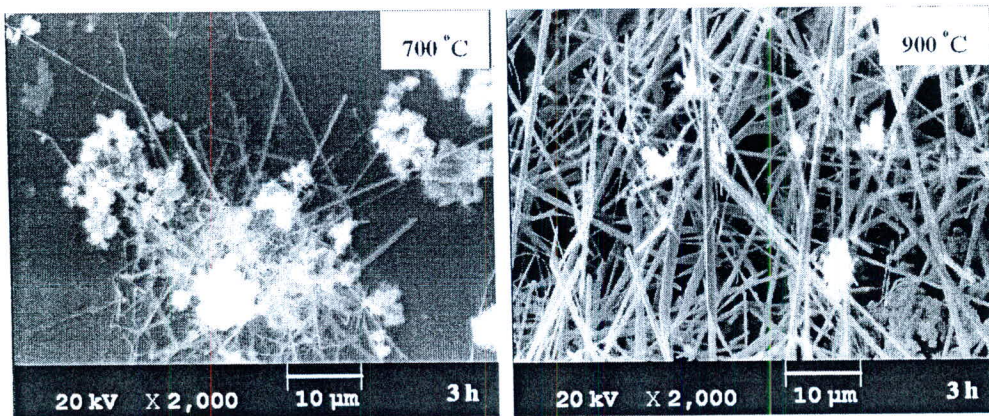


ภาพที่ 4.41 ความยาวของ nanowires ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง

เป็น 4 ชั่วโมง สังเกตเห็นว่า nanowires มีความยาวมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และกระจายเต็มแผ่นซิลิกอน ดังแสดงดังภาพที่ 4.25 นอกจากนั้นแล้ว ยังพบว่า ที่เวลา 3 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จาก 700 °C เป็น 900 °C โครงสร้างของ nanowires มีขนาดโตขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.42 และที่เวลา

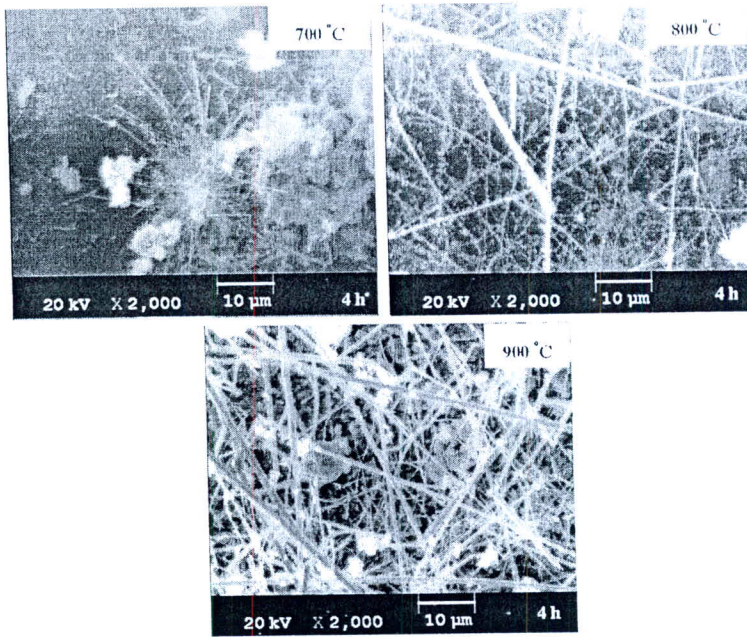


ภาพที่ 4.42 ความยาวของ nanowires ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง



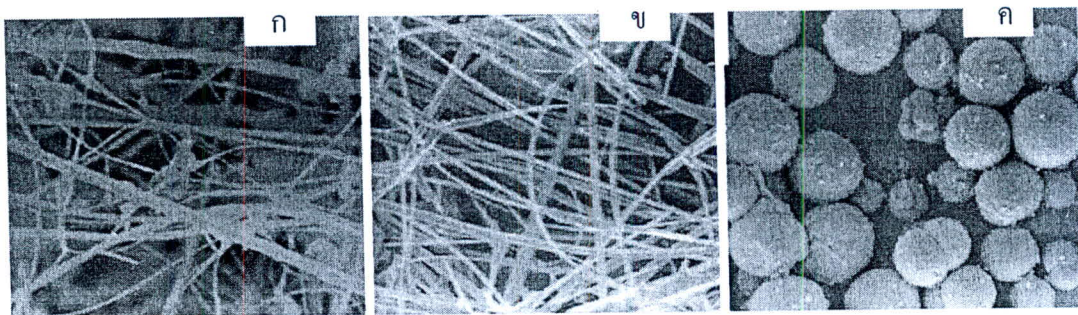
ภาพที่ 4.43 ขนาดของ nanowires ที่เตรียมได้ที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 °C และ 900 °C

4 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเตรียมจาก 700 °C เป็น 800 °C และ 900 °C เตรียมได้ nanowires ที่มีขนาดโตขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้เตรียมเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.44



ภาพที่ 4.44 ขนาดของ nanowires ที่เตรียมได้ที่เวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 °C, 800 °C และ 900 °C

จากผลการทดลอง เราสังเกตได้ว่าการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์บนฐานรองซิลิกอนในแต่ละเงื่อนไขจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ตามบริเวณที่เกิดบนฐานรองซิลิกอน ซึ่งอาจจะประกอบด้วยโครงสร้างนาโนแบบมิติศูนย์ หรือมิติหนึ่ง ดังแสดงให้เห็นในภาพ SEM และยังพบอีกว่าการเตรียมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีนี้ สามารถเตรียมได้โครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะคล้ายคลึงกับการเตรียมด้วยเทคนิคอื่น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.45

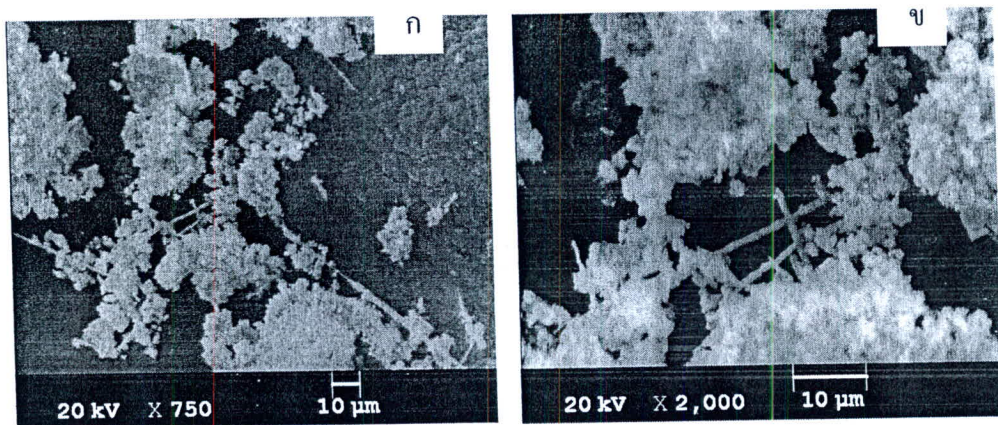


ภาพที่ 4.45 รูปร่างลักษณะโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ (ก) nanowires [20] (ข) nanobelts [21] (ค) microspheres [14]

จากภาพที่ 4.45 (ก) nanowires ที่เตรียมได้โดย Yang และคณะ[20] ด้วยเทคนิคเดียวกัน โดยการเผาผงดีบุกบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในเตาท่อควอทซ์ ซึ่งรูปร่างลักษณะดังกล่าว คล้ายกับการเตรียมโดยการเผาผงดีบุกที่ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และจากการเตรียมที่ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้โครงสร้างนาโน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ การเตรียม nanobelts ของ Huang และคณะ[21] ดังภาพที่ 4.45 (ข)

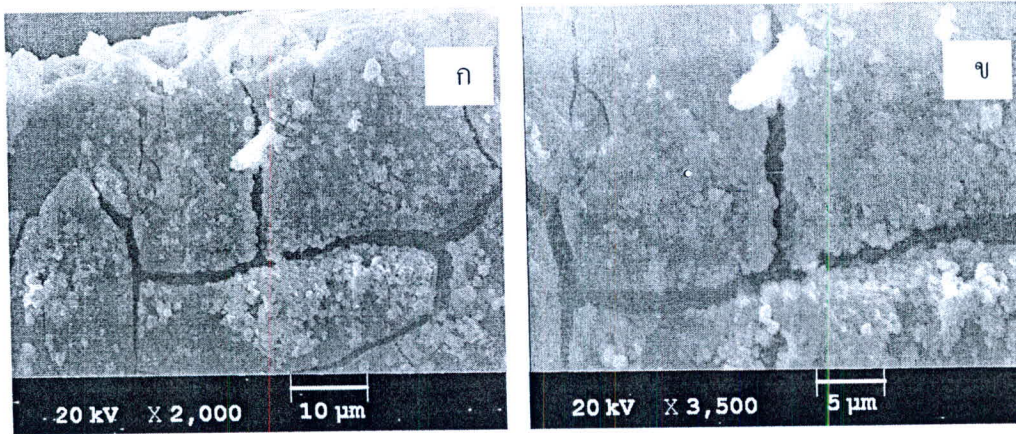
ด้วยการเผาผงดีบุกบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน โดยใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้น นอกจากนี้ microspheres ที่เตรียมได้โดย Wang และคณะ[14] ซึ่งมีลักษณะคังภาพที่ 4.45 (ก) เตรียมโดยวิธีทางเคมีโดยใช้ สารละลาย SnCl₂ เป็นสารตั้งต้น มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับการเตรียมได้บนผงวัสดุตัวอย่าง โดยการเผาผงดีบุกบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน ซึ่งโครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการ ไรระเหยความร้อน ของกลไก ไอ-ของเหลว-ของแข็ง และไอ-ของแข็ง ซึ่งเป็นไปตามกลไกที่อธิบายไว้ในสมการที่ 2.7 และ 2.8

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะคังภาพที่ 4.46



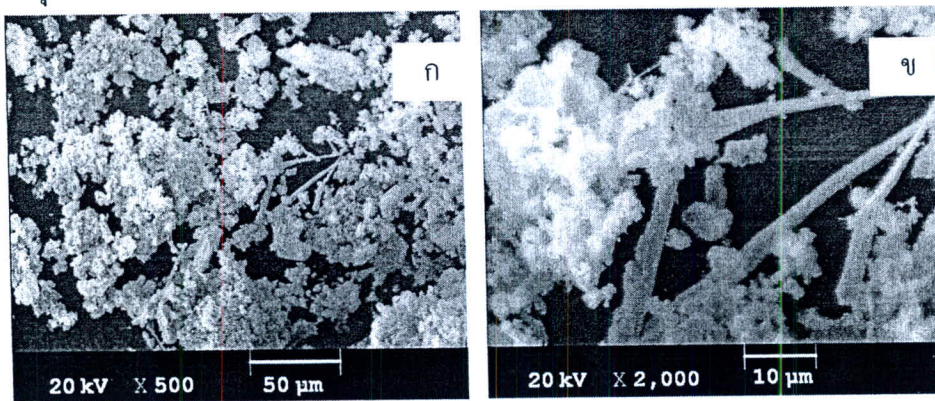
ภาพที่ 4.46 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง B01 หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะคังภาพที่ 4.47



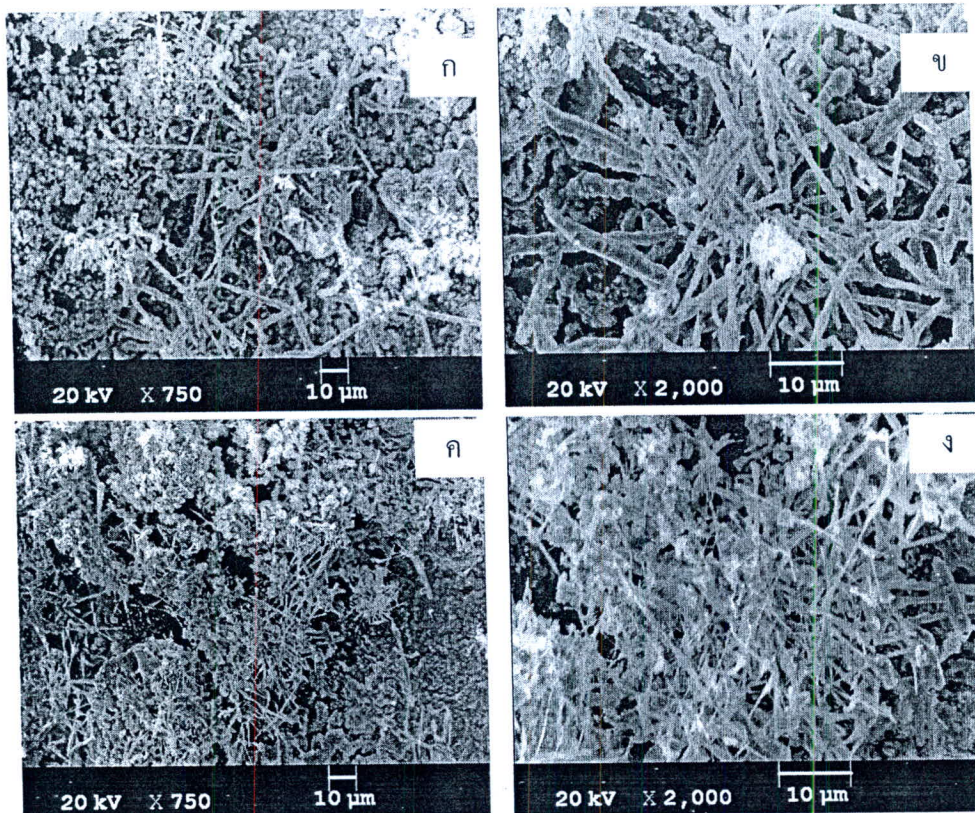
ภาพที่ 4.47 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงซิลิกอนผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.48



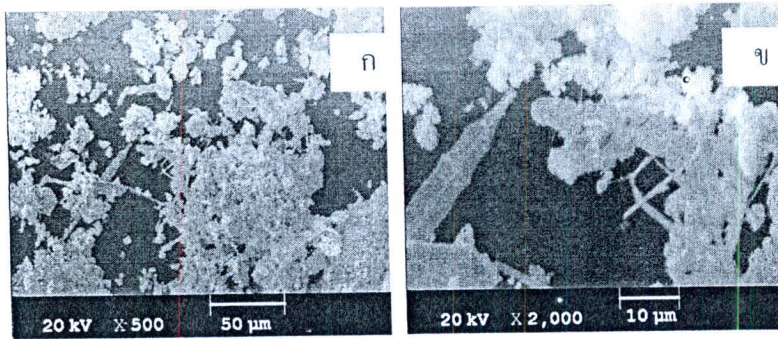
ภาพที่ 4.48 ภาพ SEM ของตัวอย่าง หลังเผาที่ 2 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.49 จากภาพจะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์โครงสร้าง nanowires, nanorods และ nanofibers อย่างชัดเจน



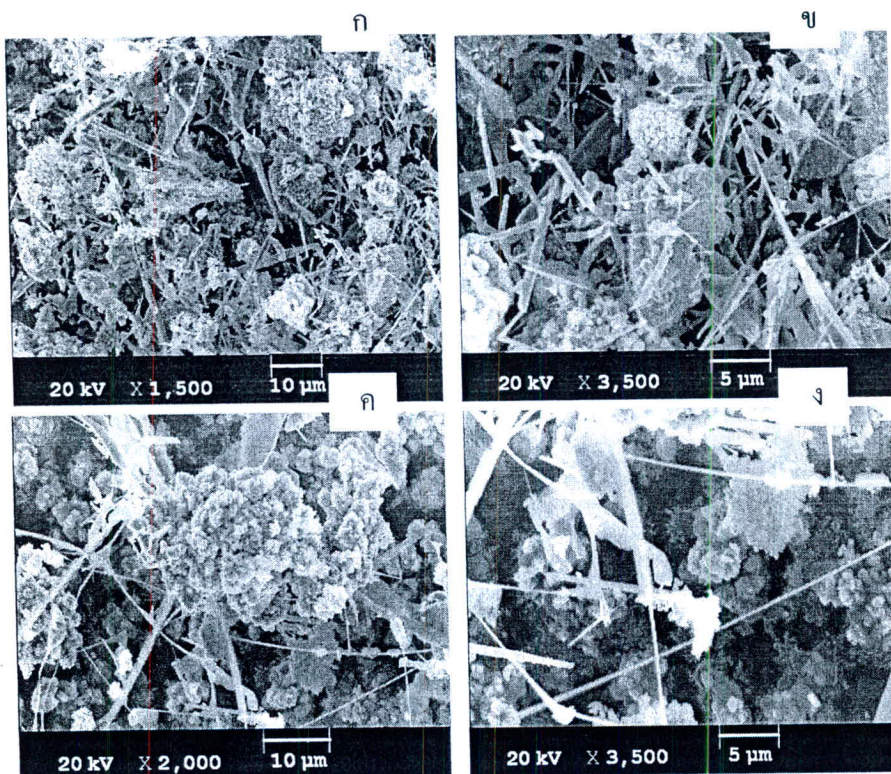
ภาพที่ 4.49 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงคิงผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.50



ภาพที่ 4.50 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง B03 หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

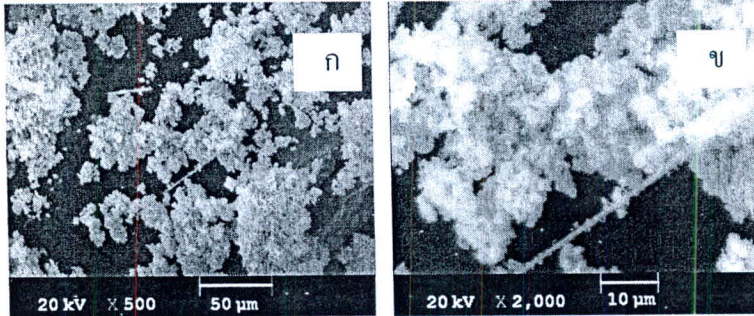
เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.51



ภาพที่ 4.51 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

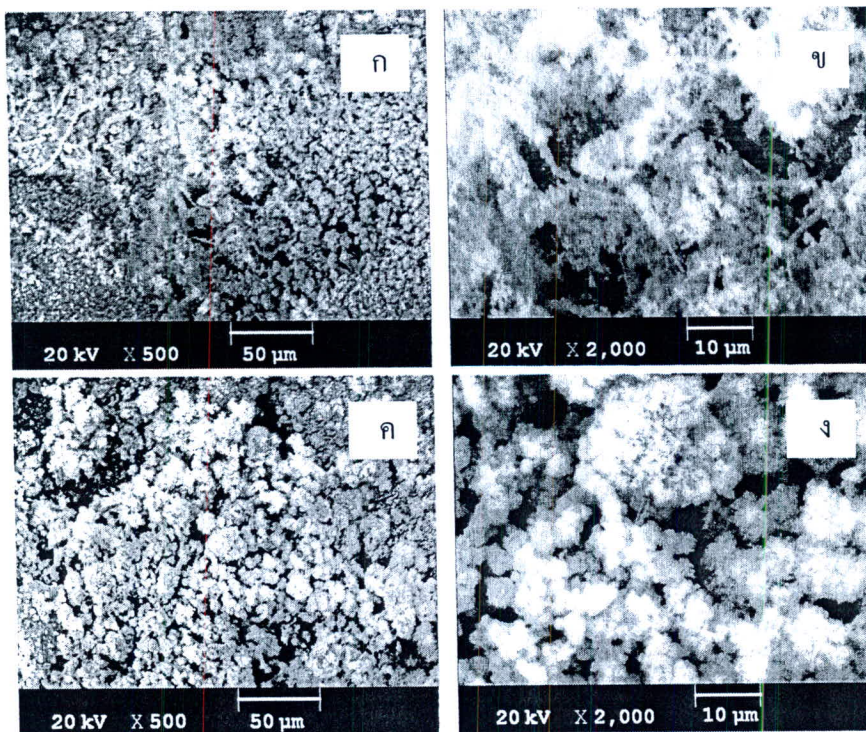
เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการ

ไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.52



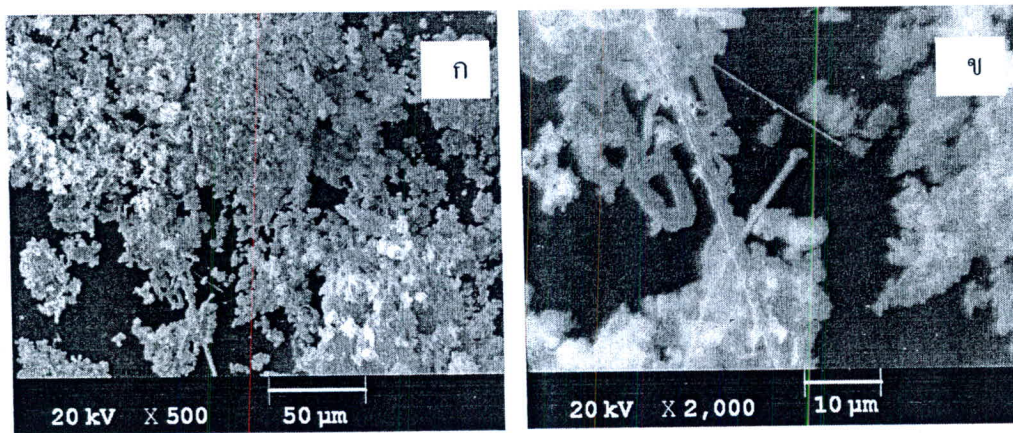
ภาพที่ 4.52 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง B04 หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.53



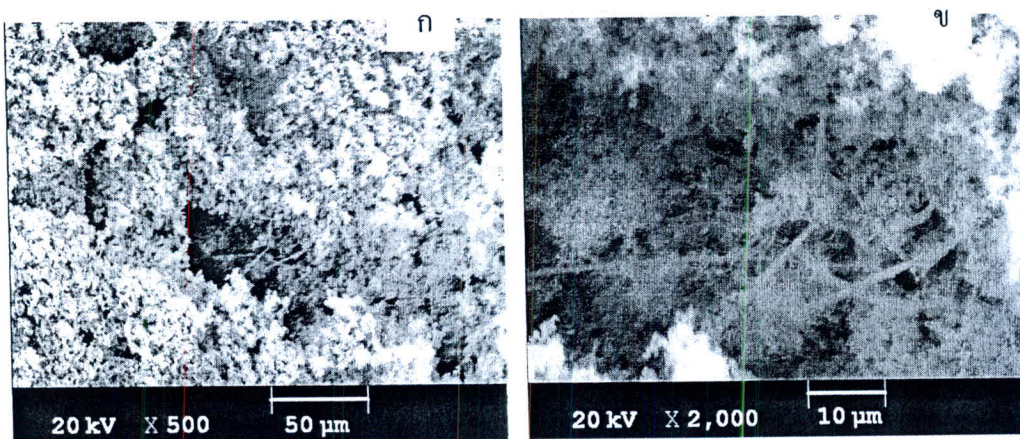
ภาพที่ 4.53 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่าวัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.54



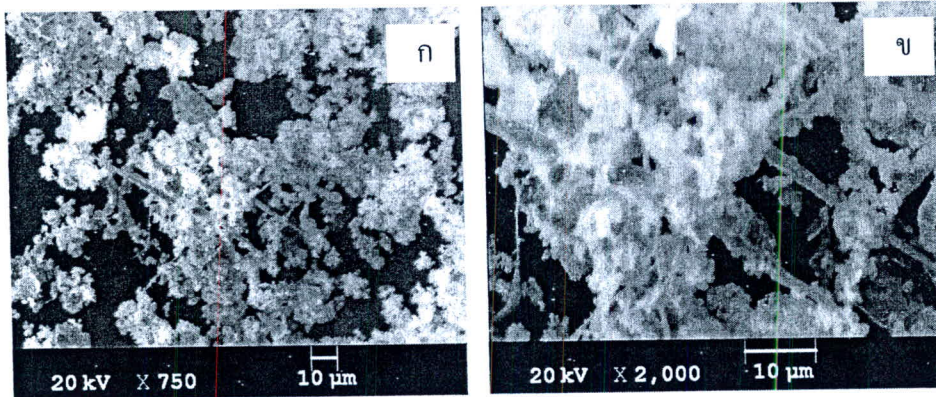
ภาพที่ 4.54 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.55



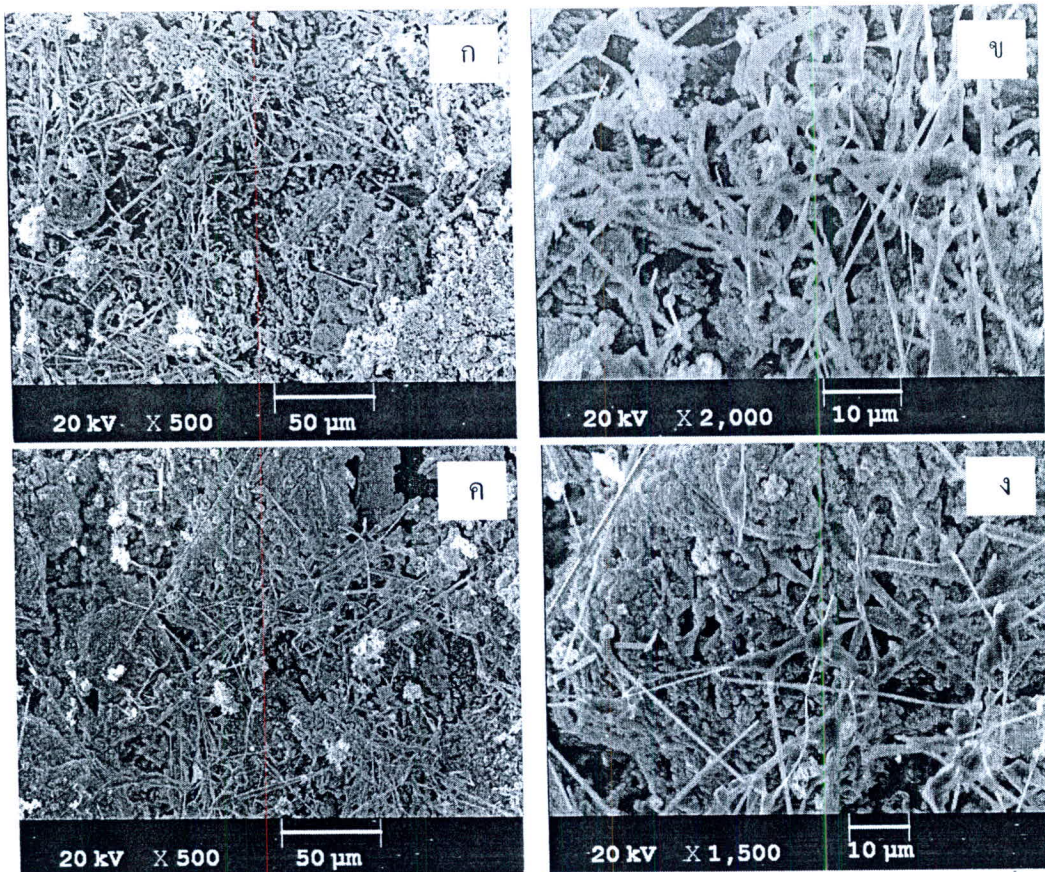
ภาพที่ 4.55 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง B05 (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงถ่านกลาดด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.56



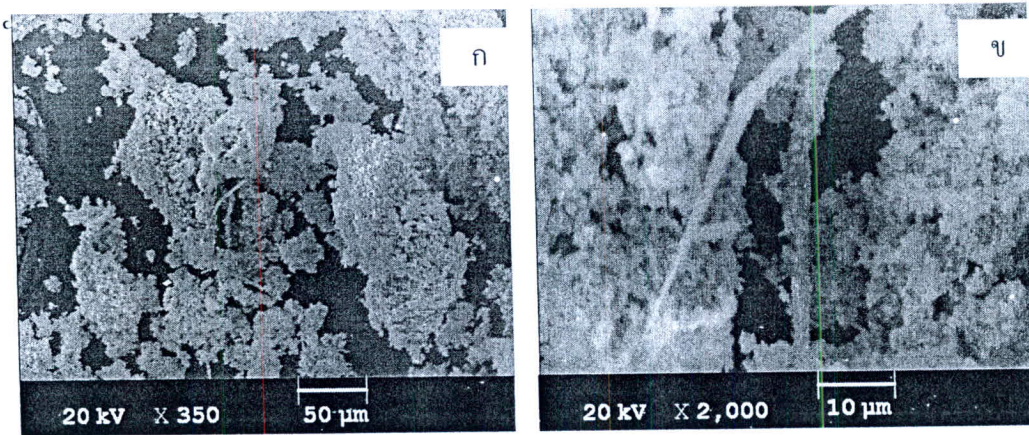
ภาพที่ 4.56 ภาพ SEM ของตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.57



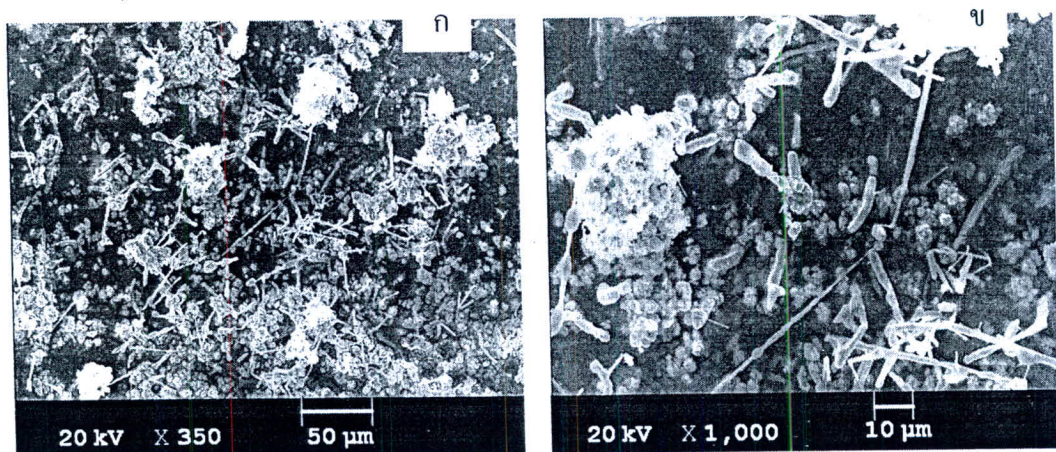
ภาพที่ 4.57 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงคิบุกผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.58



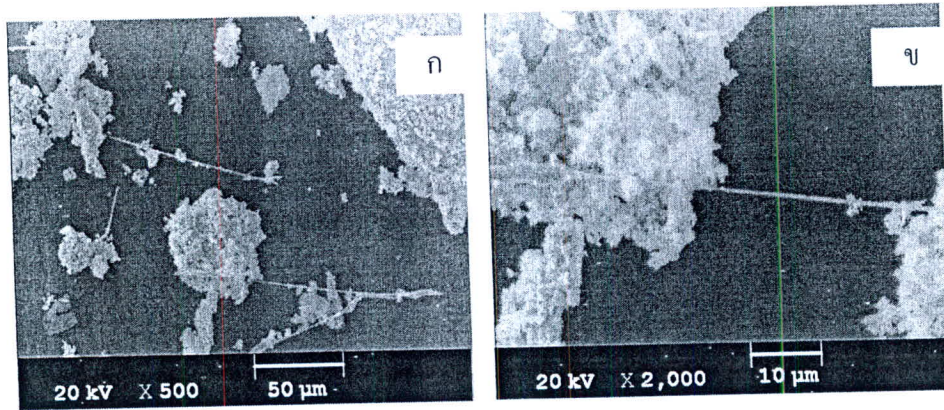
ภาพที่ 4.58 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง B07 หลังเผาที่ 2 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.59



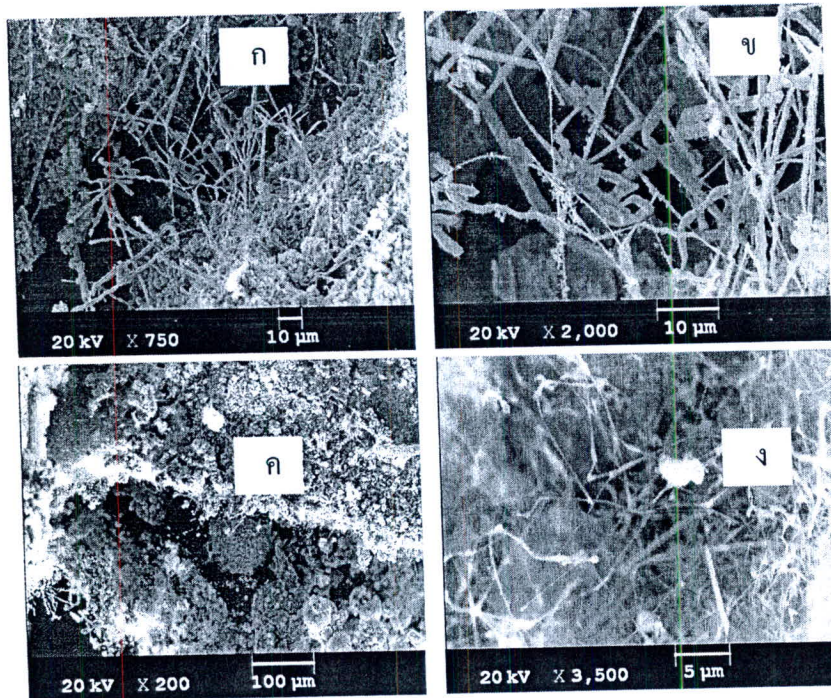
ภาพที่ 4.59 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง B07 (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินบุกผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.60



ภาพที่ 4.60 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

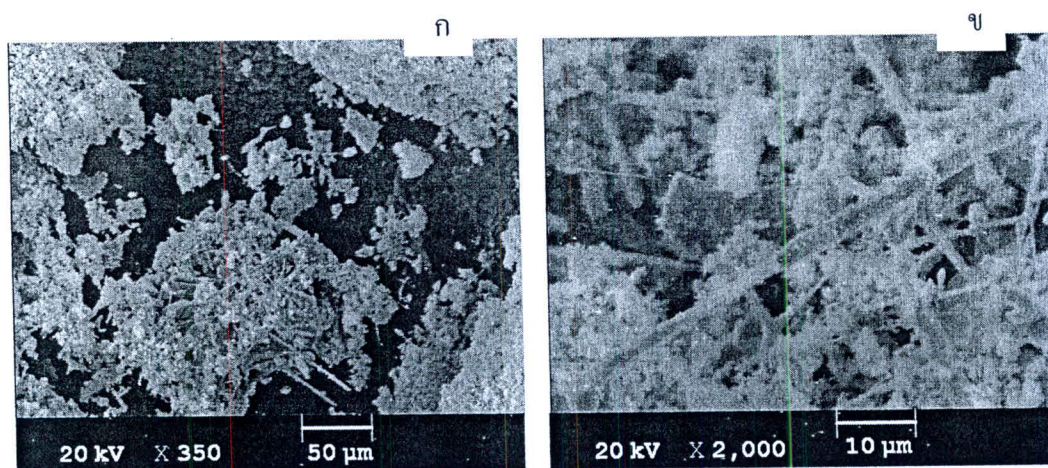
เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.61



ภาพที่ 4.61 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง B08 (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

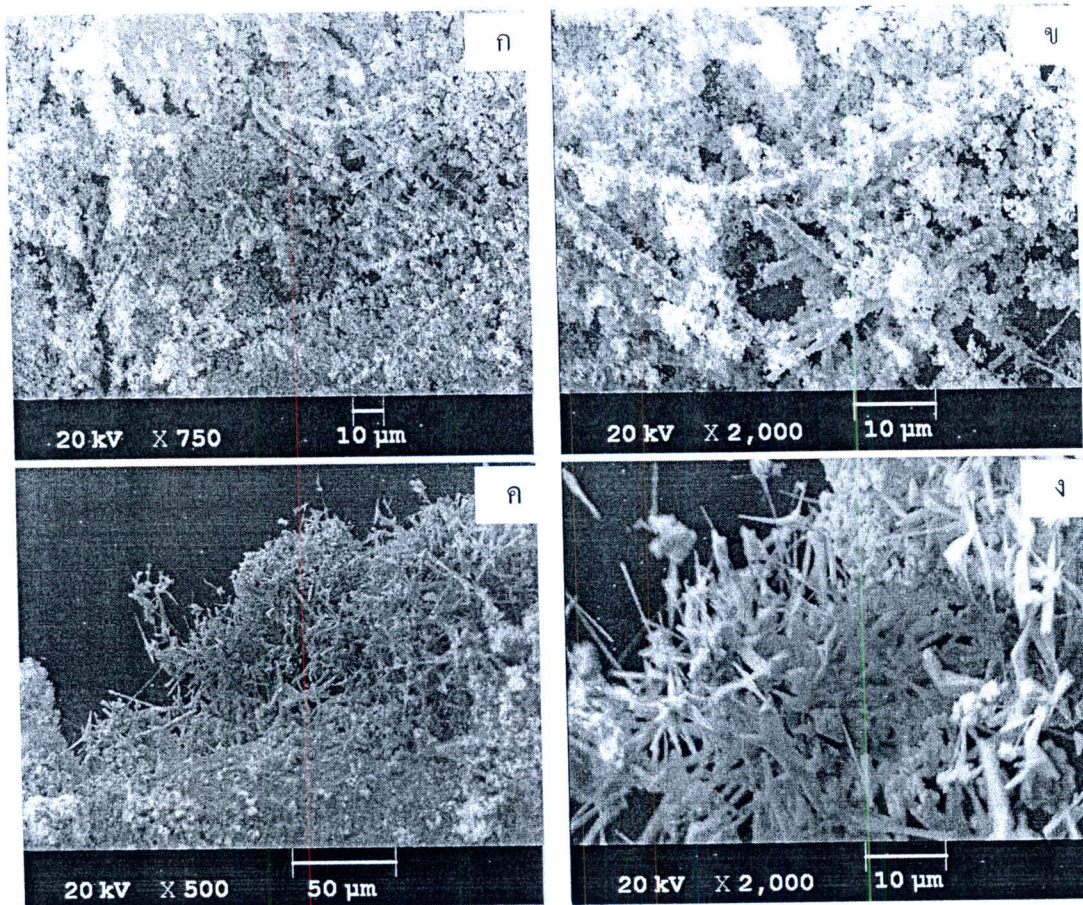
เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการ

ไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่าวัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.62



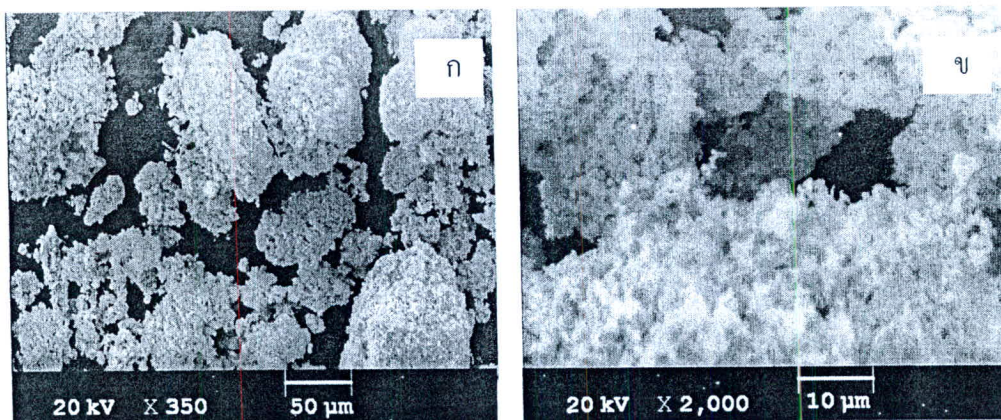
ภาพที่ 4.62 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.63



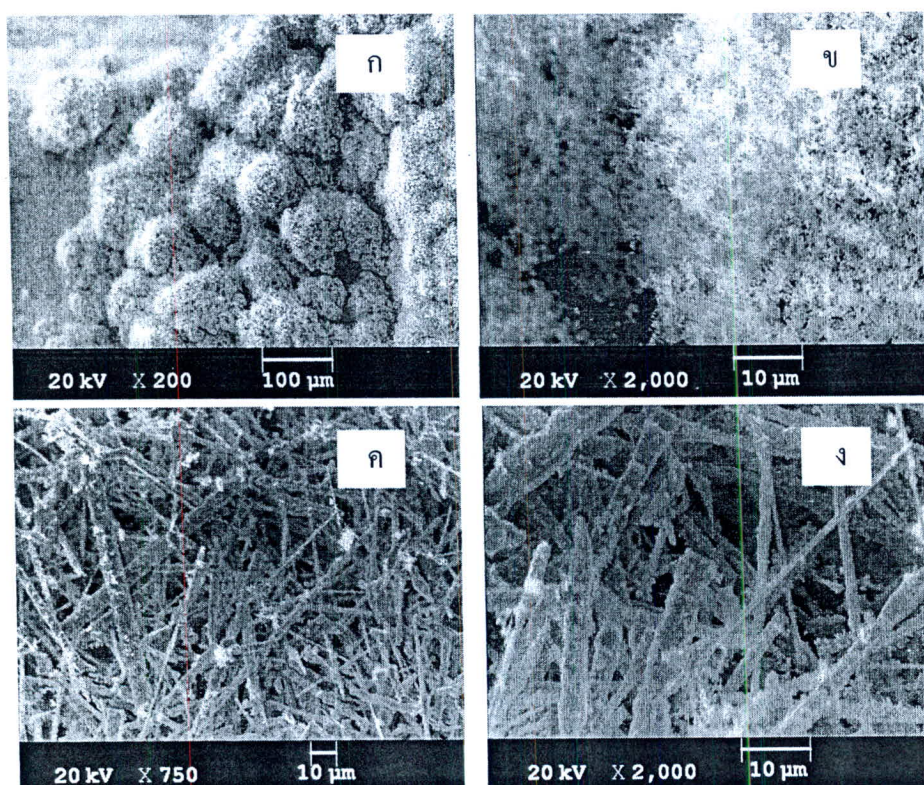
ภาพที่ 4.63 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินุคผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่าวัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.64



ภาพที่ 4.64 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 2 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.65

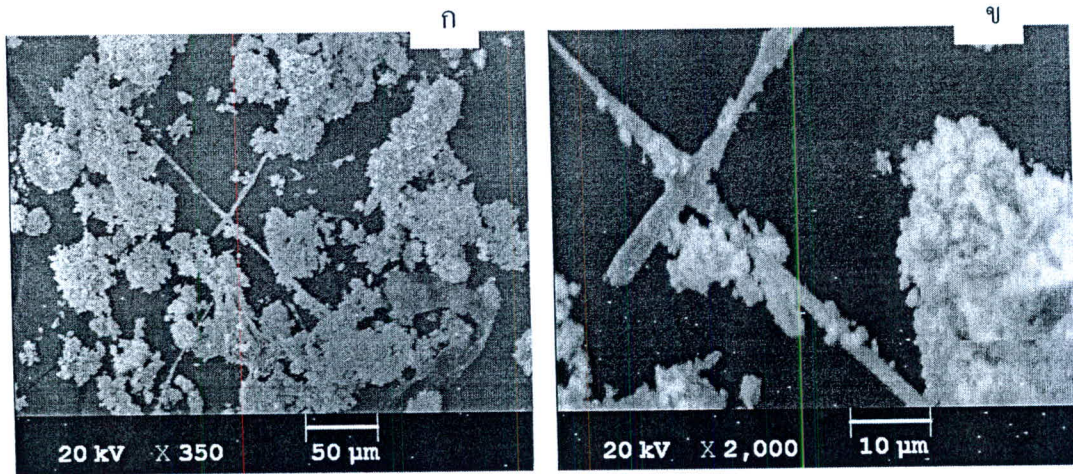


ภาพที่ 4.65 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1

(ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

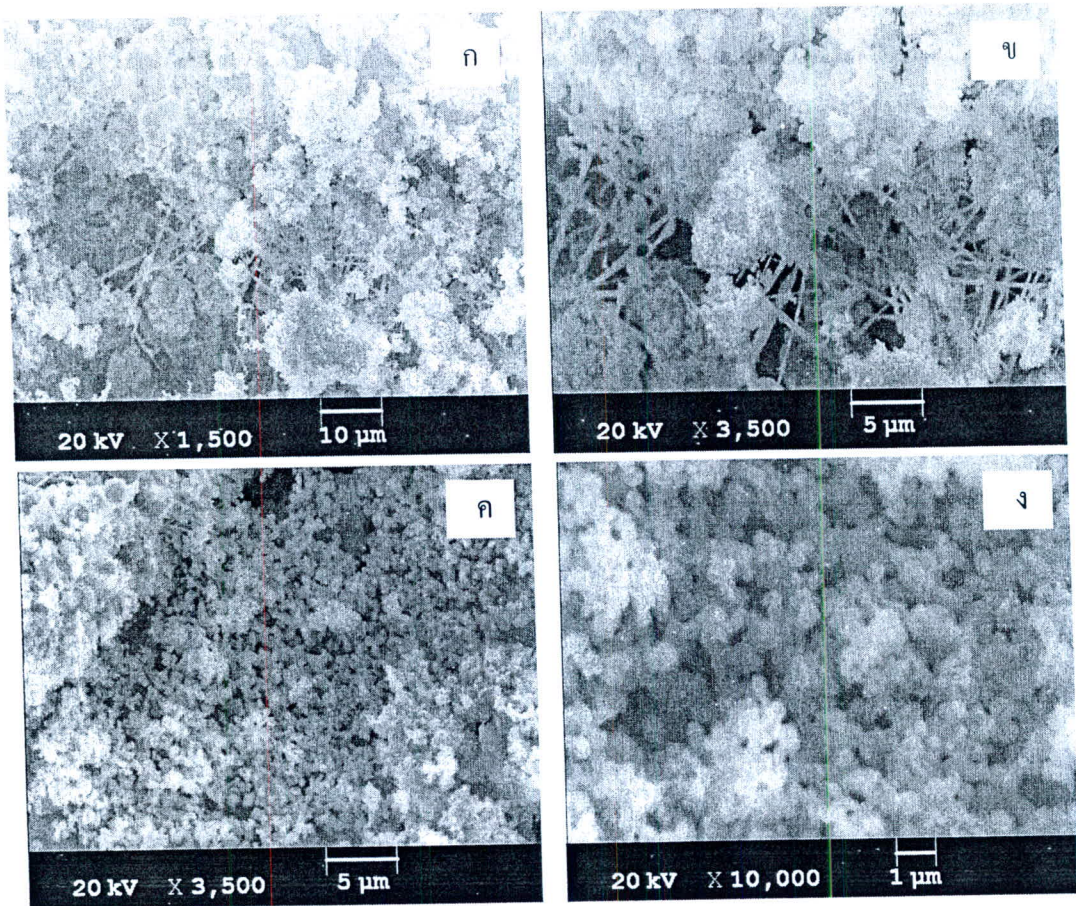
เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการ

ไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง พบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.66



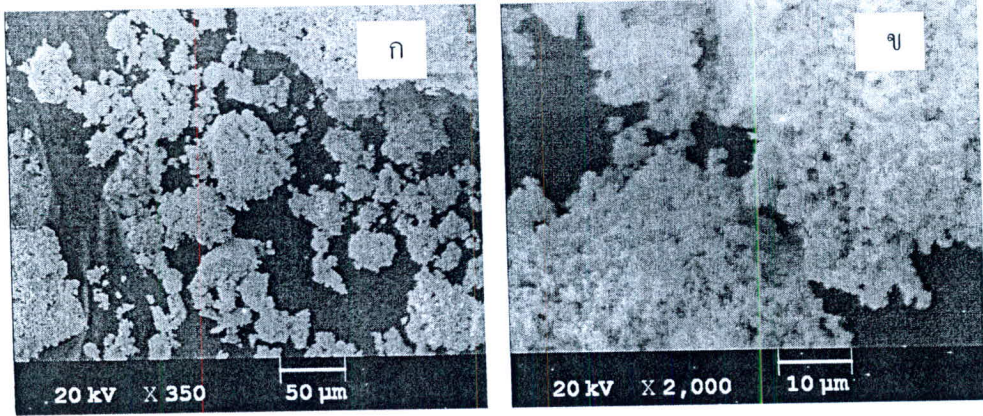
ภาพที่ 4.66 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.67



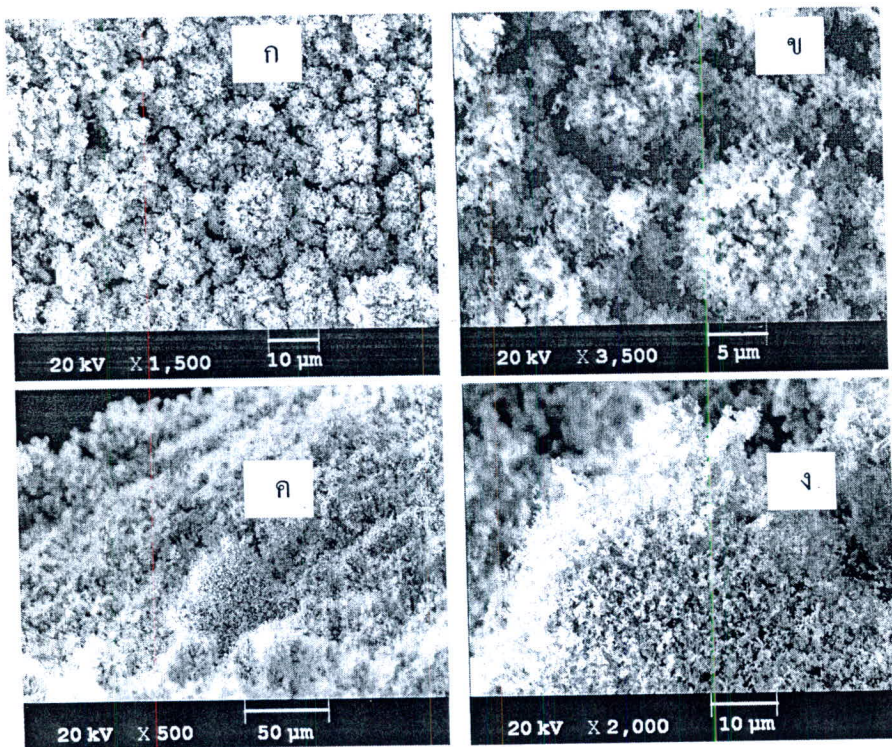
ภาพที่ 4.67 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง B11 (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 1 L/min, 0.5 L/min ตามลำดับ ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.68



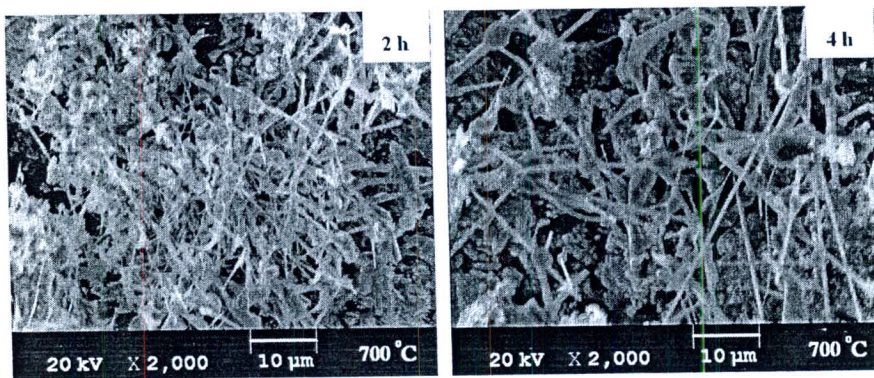
ภาพที่ 4.68 ภาพ SEM ของผงตัวอย่างหลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.69



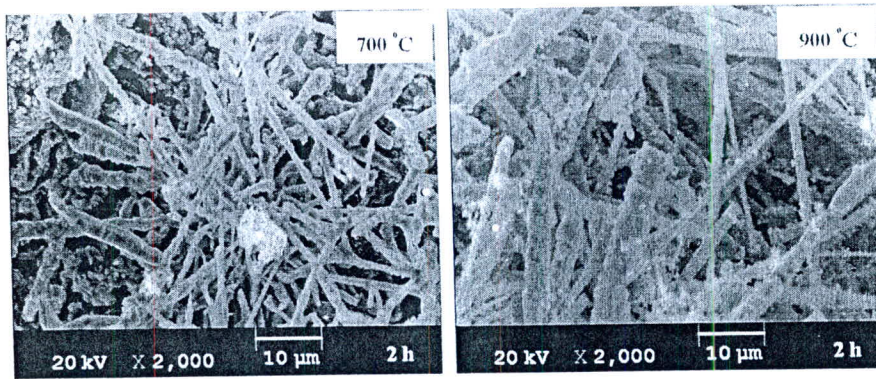
ภาพที่ 4.69 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM การเตรียมโครงสร้างนาโนทิวไดออกไซด์ในเตาท่อควอทซ์ ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน โดยใช้ผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลาในอัตราส่วน 1:1 เป็นสารตั้งต้น จะเห็นได้ว่าบนวัสดุผงตัวอย่างของแต่ละเงื่อนไขจะประกอบไปด้วย nanoparticles nanowires และ nanofibers ยกเว้นการเตรียมที่อุณหภูมิ 900 °C ที่เวลา 2 , 4 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นเฉพาะผงสีขาวที่ประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดต่าง ๆ ในส่วนของวัสดุนาโนที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนที่เงื่อนไขเดียวกัน จะมีลักษณะเป็น nanowires รวมกลุ่มกันอย่างหนาแน่นบนผิวของ microspheres และที่อุณหภูมิ 600 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง จะมีอนุภาคมาเกาะที่ผิวหน้าของฐานรองซิลิกอนเป็นชั้นหนา ส่วนเงื่อนไขอื่น ๆ จะมีโครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่งเกิดขึ้นบนแผ่นซิลิกอน นอกจากนั้นยังพบว่า nanowires มีขนาดโตขึ้น และยาวขึ้นหลาย 10 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 700 °C เมื่อใช้เวลาในการเผาเพิ่มจาก 2 ชั่วโมง เป็น 4 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.70

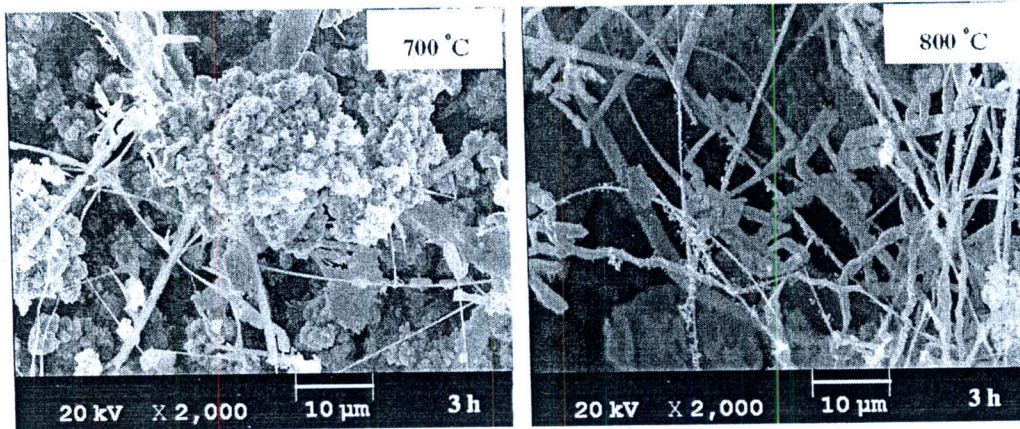


ภาพที่ 4.70 ความยาวของ nanowires ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 700 °C ที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง

นอกจากนั้นยังพบว่า ที่เวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 700 °C เป็น 900 °C ขนาดของ microfibers จะโตขึ้นด้วย แสดงดังภาพที่ 4.72 เช่นเดียวกันที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดของ nanowires มีขนาดโตขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 700 °C เป็น 800 °C แสดงดังภาพที่ 4.73

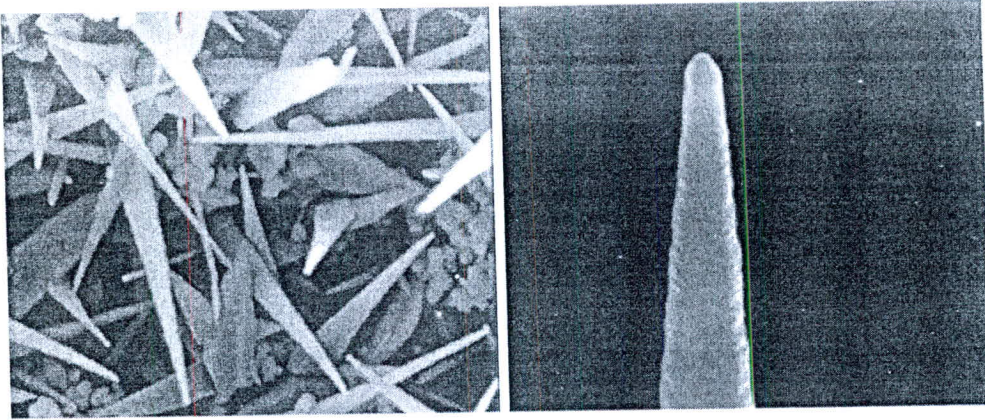


ภาพที่ 4.71 ขนาดของ microfibers ที่เตรียมได้ ที่เวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 °C และ 900 °C



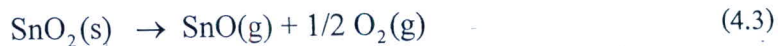
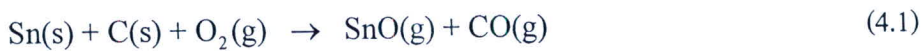
ภาพที่ 4.72 ขนาดของ nanowires ที่เตรียมได้ ที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 700 °C และ 800 °C

จากผลการทดลอง การเตรียมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 4 ชั่วโมง จะมีรูปร่างลักษณะคล้ายกับการเตรียมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ของ Kim และคณะ[27] เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกบริสุทธิ์ในเตาท่อควอทซ์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศ ซึ่งโครงสร้างนาโนที่เตรียมได้มีรูปร่างแบบเข็ม (needle-shaped) ดังแสดงในภาพที่ 4.73 จะเห็นว่า การเตรียมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ที่มีรูปร่างคล้ายกันสามารถเตรียมได้ด้วยสภาวะ เงื่อนไขที่แตกต่างกัน



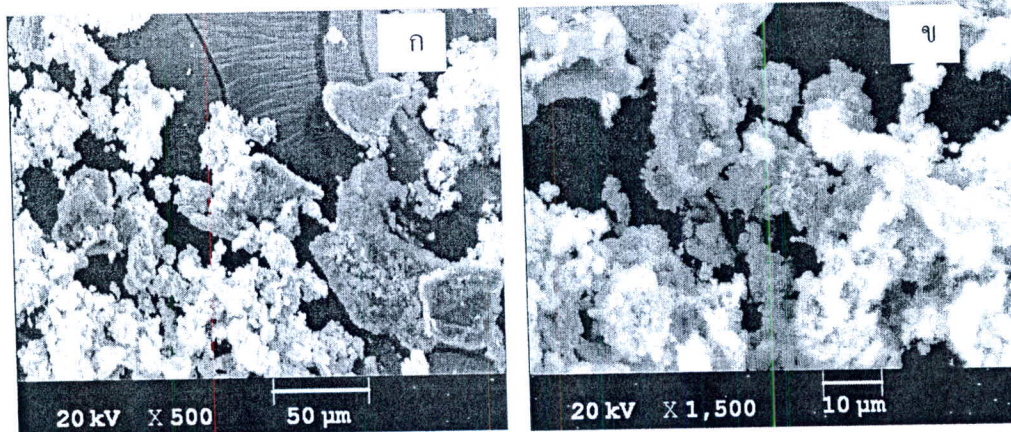
ภาพที่ 4.73 รูปร่างลักษณะโครงสร้างนาโนทिनไดออกไซด์แบบ needle-shaped ที่สังเคราะห์ได้โดย Kim et al [27]

การเกิดโครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่ง เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่อง ดังปฏิกิริยาเคมีข้างล่างนี้



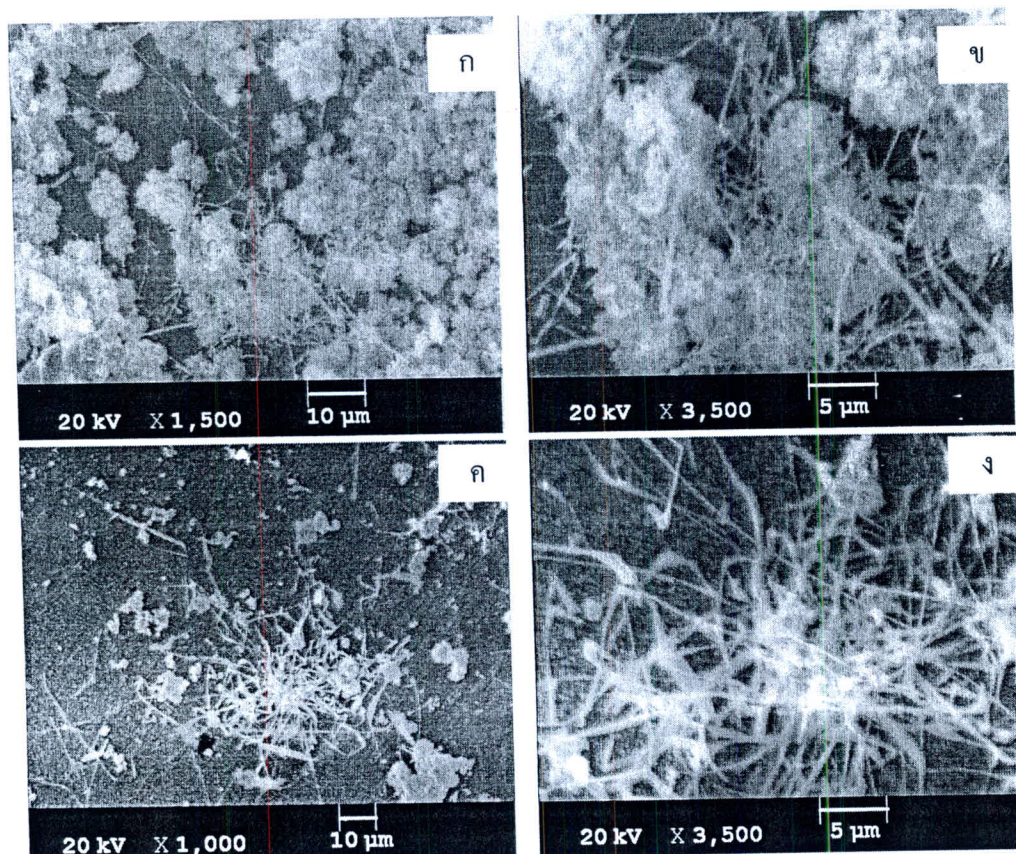
เมื่ออุณหภูมิของเตาถึงช่วงที่เกิดปฏิกิริยา Sn(s) จะทำปฏิกิริยากับ C(s) และ O₂(g) เกิดเป็นไอระเหย SnO(g) และ CO(g) ดังสมการที่ 4.1 หลังจากนั้นไอระเหยของ SnO(g) ที่มีจำนวนมากจะถูกแยกออกเป็น Sn(l) และ SnO₂(s) ในขณะเดียวกัน Sn(l) จะตกลงที่ผิวหน้าของฐานรองซิลิกอนโดยการพาของแก๊ส และเกิดการ adsorption กับ SnO(g) จนเกิดการอิมิตัว และโครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่งก็เกิดขึ้น โดยที่ SnO₂(s) ในสมการที่ 4.2 ถูกอธิบายด้วยสมการที่ 4.3 ซึ่งเป็นไปตามกลไก VLS ซึ่งได้อธิบายแล้วในงานวิจัยที่ผ่านมา

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ โดยใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้น หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.74



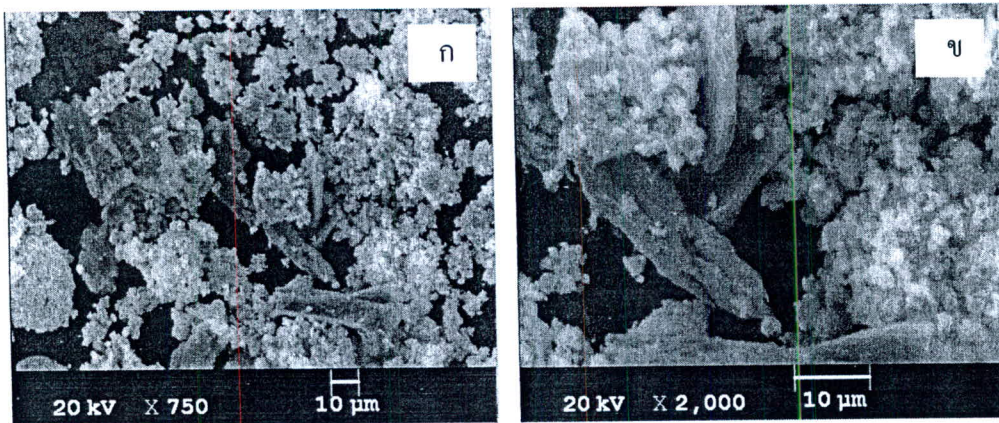
ภาพที่ 4.74 ภาพ SEM ของผงตัวอย่างหลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.75



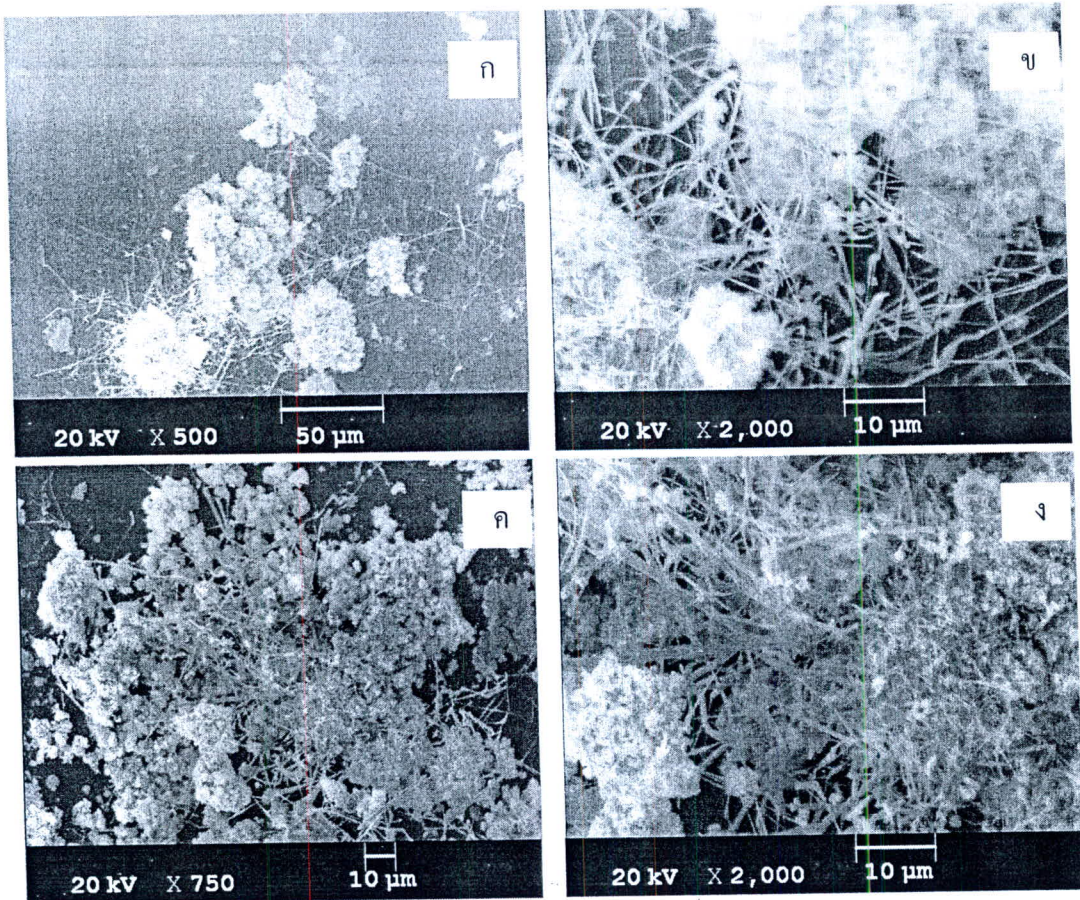
ภาพที่ 4.75 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงคีนุกผสมกับผงแกรไฟท์ ด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ โดยใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้น หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.76



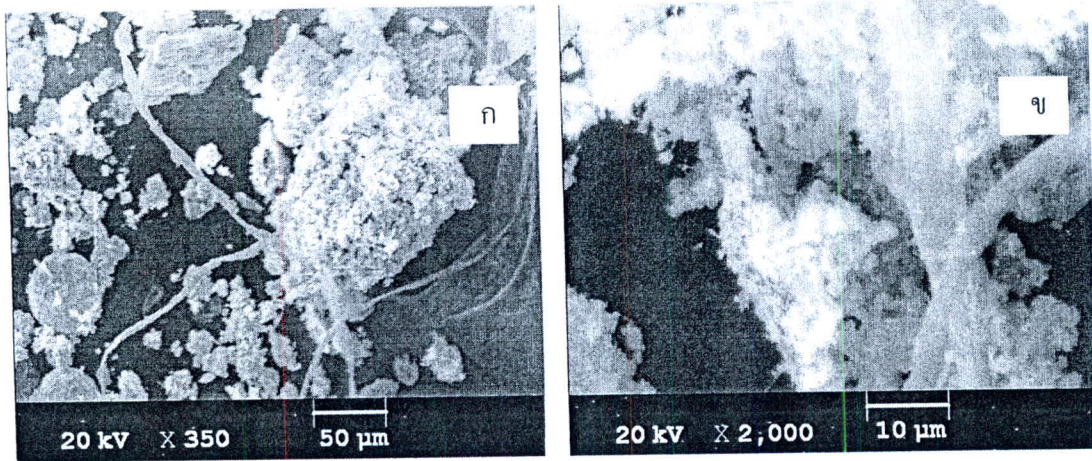
ภาพที่ 4.76 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง C03 หลังเผาที่ 2 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.77



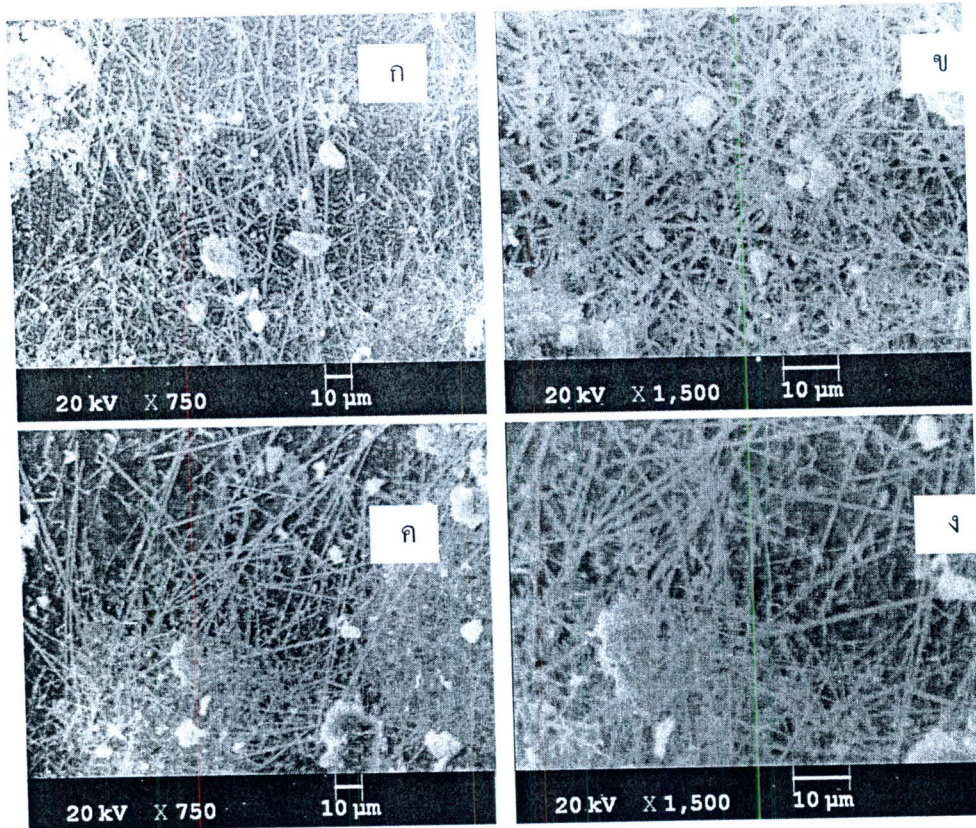
ภาพที่ 4.77 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินุคผสมกับผงแกรไฟท์ ด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ โดยใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้น หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.78



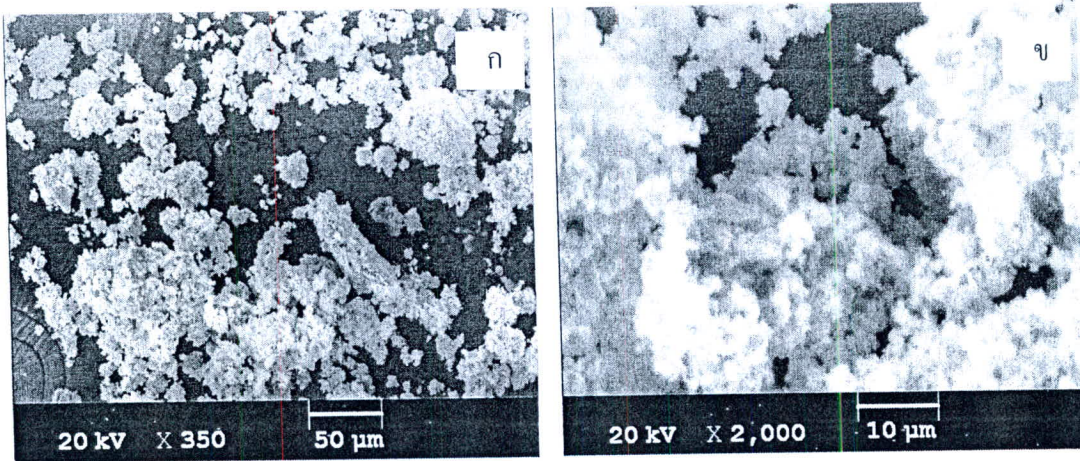
ภาพที่ 4.78 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.79



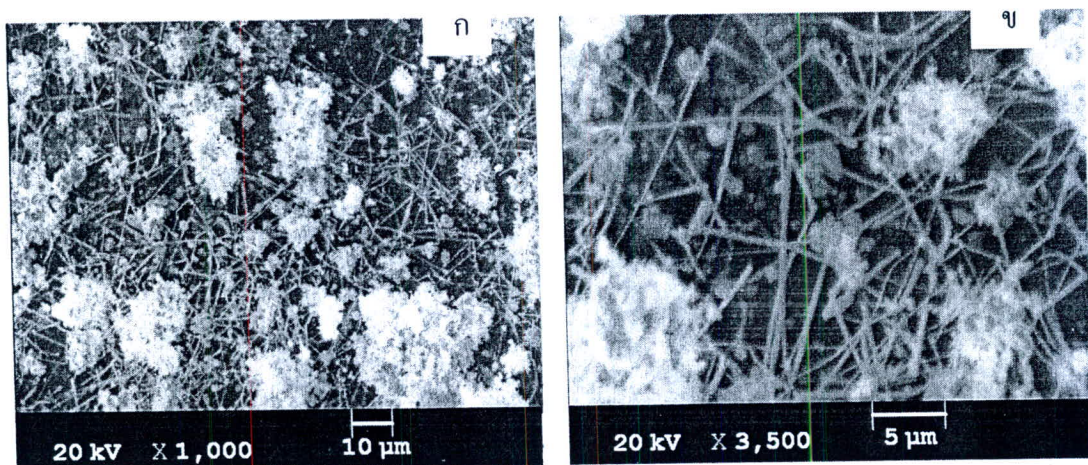
ภาพที่ 4.79 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลั้งขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลั้งขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลั้งขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลั้งขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงแกรไฟท์ ด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ โดยใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้น หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.80



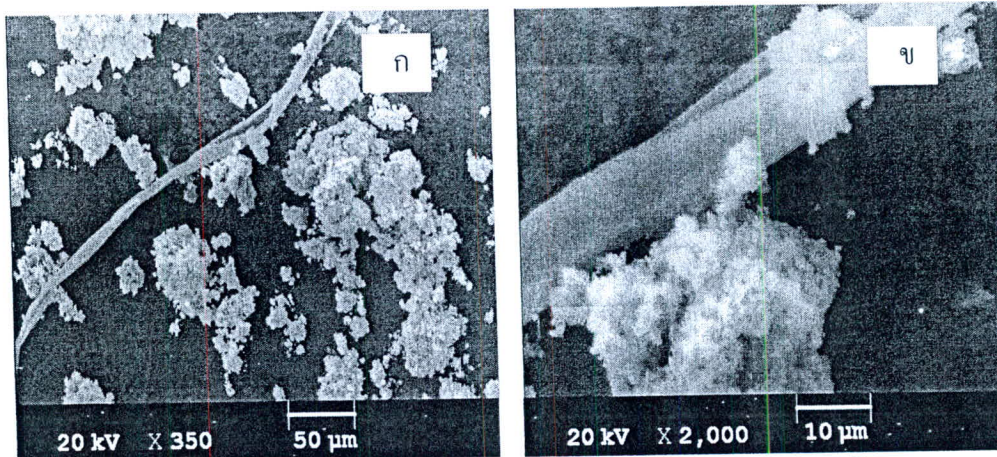
ภาพที่ 4.80 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.81



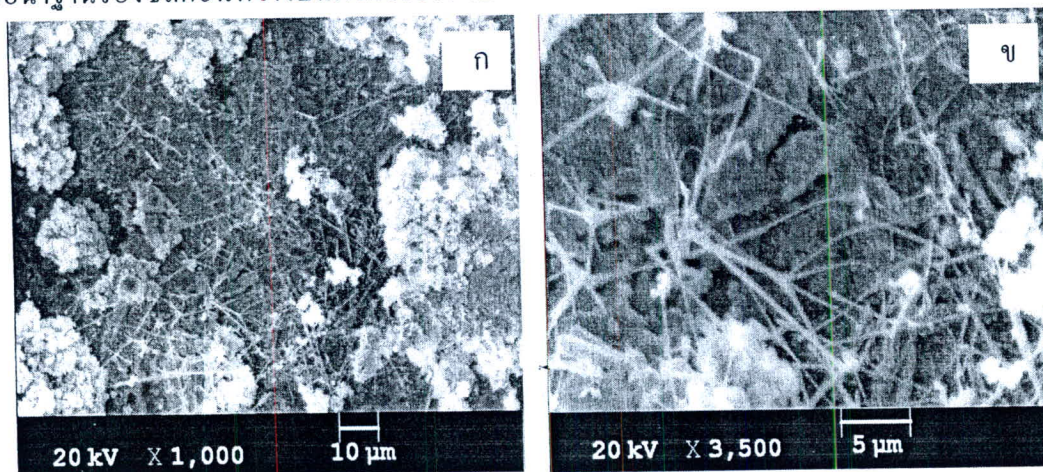
ภาพที่ 4.81 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ โดยใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้น หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.82



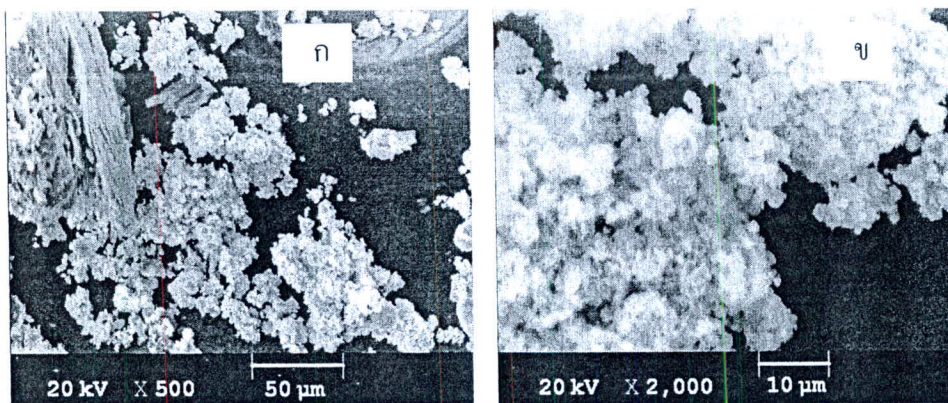
ภาพที่ 4.82 ภาพ SEM ของผงตัวอย่างหลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.83



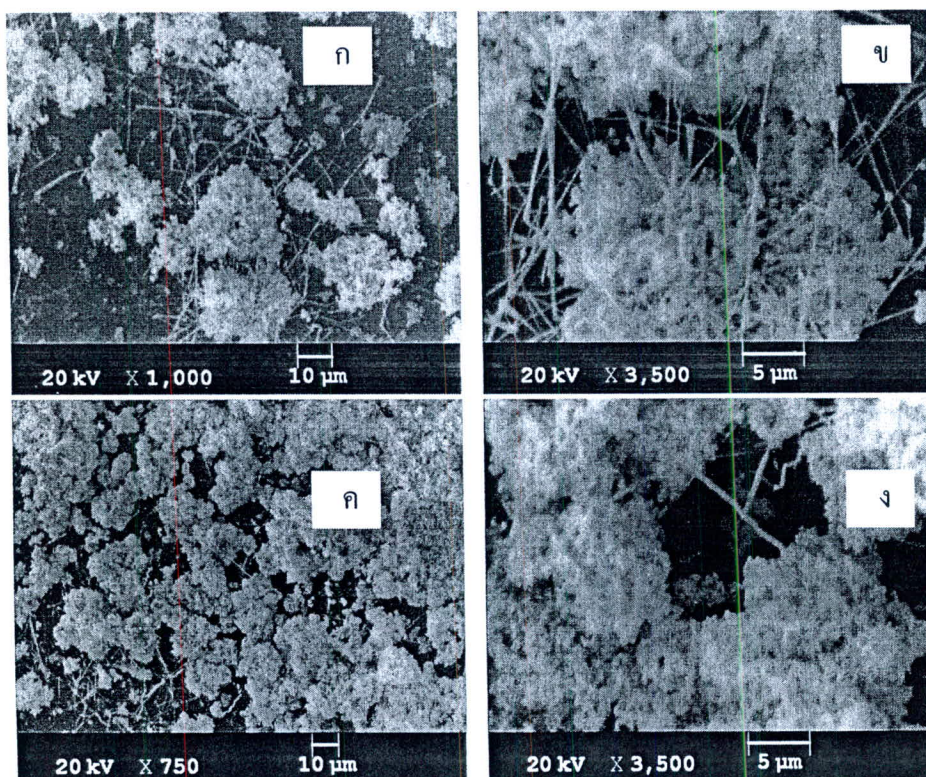
ภาพที่ 4.83 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงคิบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ด้วยอัตราส่วน 4:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ โดยใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้น หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.84



ภาพที่ 4.84 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.85

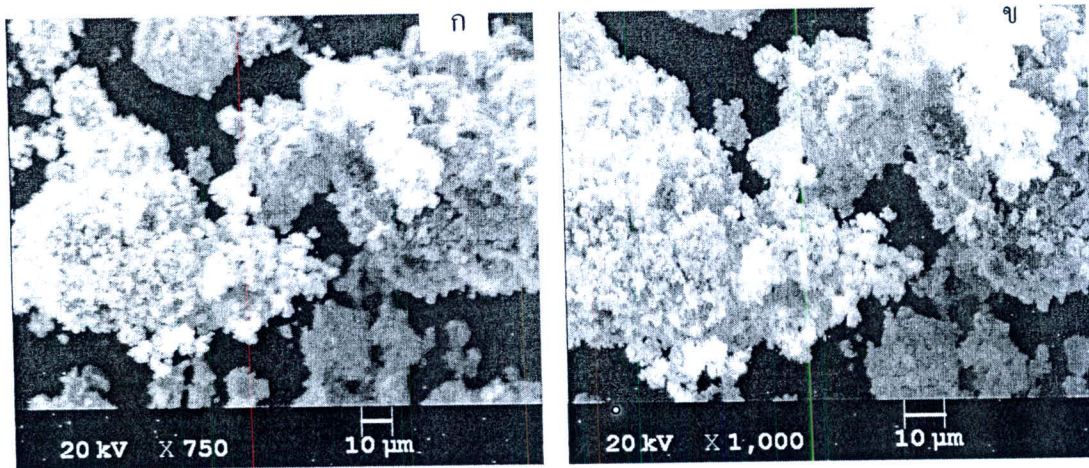


ภาพที่ 4.85 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1

(ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

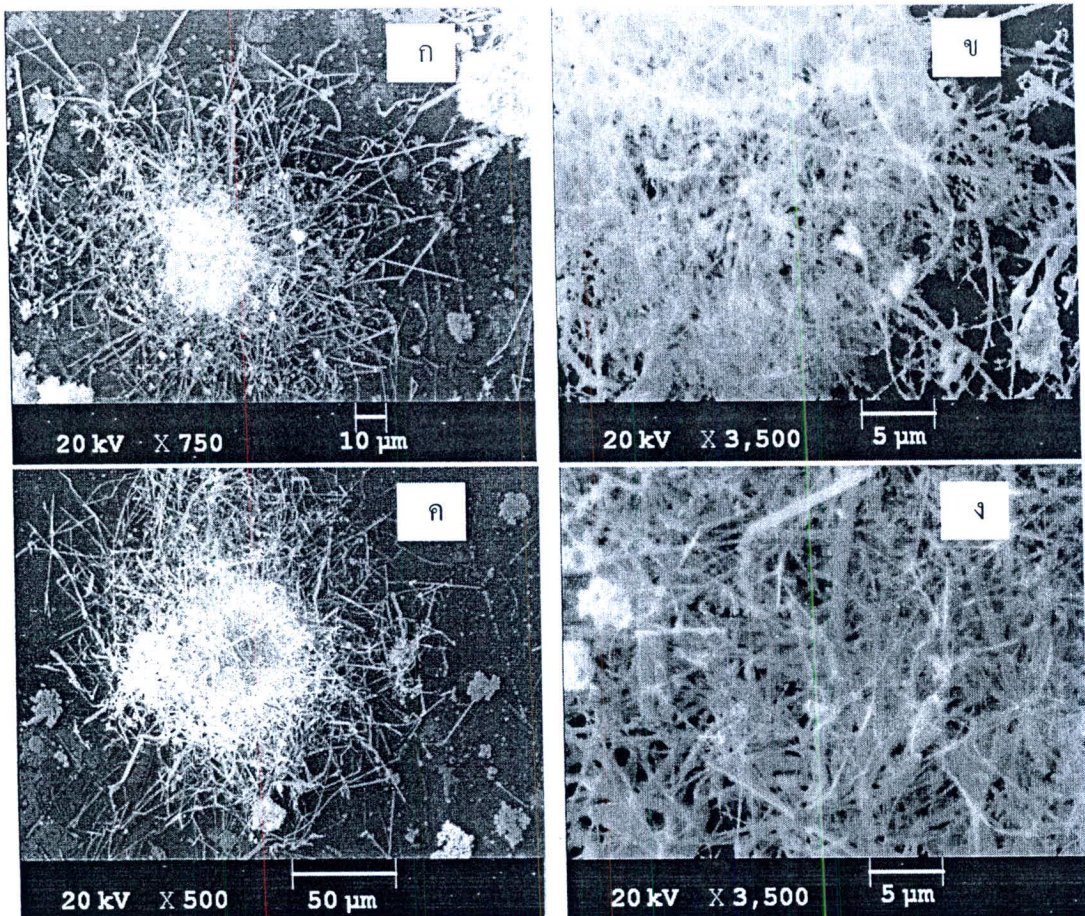
เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ด้วยอัตราส่วน 5:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่

ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ โดยใช้ น้ำ เป็นตัวกระตุ้น หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.86



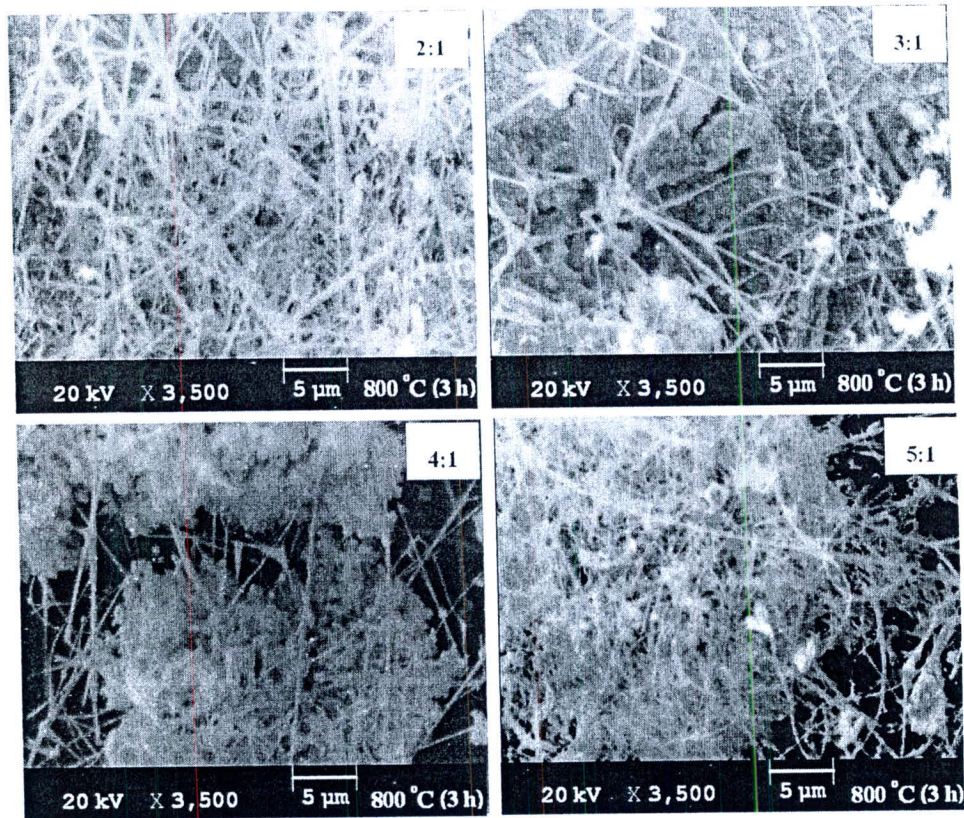
ภาพที่ 4.86 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่างไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.87



ภาพที่ 4.87 ภาพ SEM ของฐานรองซิงคิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

จากผลการวิเคราะห์ภาพ SEM พบว่ารูปร่างลักษณะของวัสดุนาโนที่เตรียมได้บนผงตัวอย่างที่ อุณหภูมิ 700 °C, 800 °C และ 900 °C เวลา 3 ชั่วโมง จะประกอบไปด้วย particles จำนวนมาก แต่ที่เงื่อนไขอื่น ๆ จะปรากฏ microfibers อยู่ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า บนฐานรองซิงคิกอนที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 3 ชั่วโมง เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของสารตั้งต้นเป็น 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 ขนาดของ nanowires มีขนาดลดลง และยังพบอีกว่าที่เงื่อนไขการเตรียมที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนสารตั้งต้น 2:1 จะเกิด nanowires หนาแน่นที่สุด และยาวที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.88 เนื่องจากเมื่อผงดิบถูกได้รับความร้อนสูงจนกลายเป็นไอ และเกิด oxidized โดยไอน้ำ อยู่ในรูปของ SnO(g)



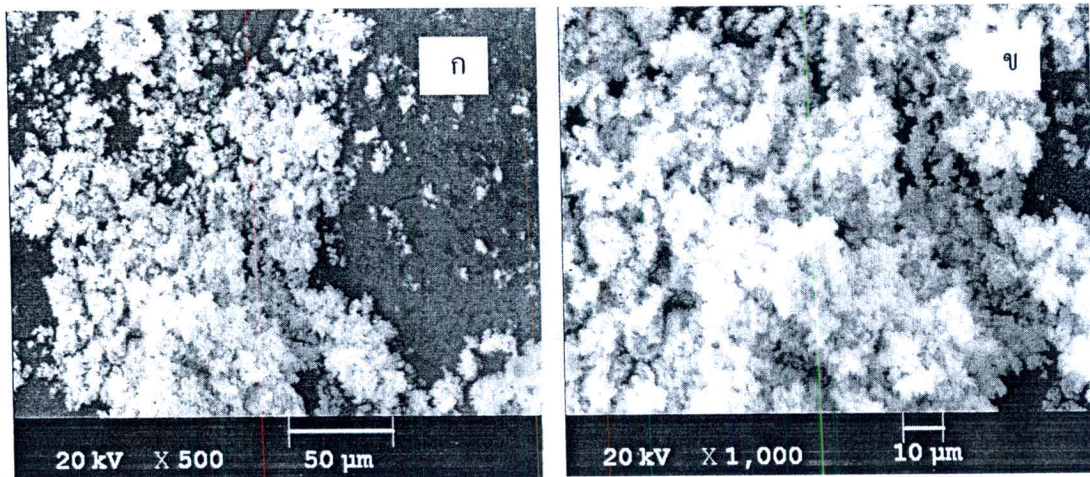
ภาพที่ 4.88 ขนาดของ nanowires ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนสารตั้งต้น 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1

และจะถูกแยกออกเป็น $\text{SnO}_2(\text{g})$ และ $\text{Sn}(\text{g})$ หลังจากนั้น $\text{SnO}_2(\text{g})$ จะเคลื่อนที่สู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ อยู่ในรูป SnO_2 particles ตกสู่ผิวหน้าของฐานรองซิลิกอนโดยการพาไปของแก๊สไนโตรเจน หลังจากนั้น SnO_2 particles จะเกิดการ absorbed โมเลกุลของ $\text{SnO}_2(\text{g})$ ในบรรยากาศจนเกิดการอึดตัว และทำให้เกิดโครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่งขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกลไก ไอ-ของแข็ง และอาจเป็นไปได้ว่า คาร์บอนจากแกรไฟท์จะทำให้เกิดแก๊ส $\text{CO}_2(\text{g})$ จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ในท่อควอทซ์ เนื่องจากภายในท่อควอทซ์ยังถือว่าเป็นสุญญากาศ จึงมีโมเลกุลของแก๊ส $\text{O}_2(\text{g})$ กระจายอยู่ กลไกการเกิดนี้ถูกอธิบายไว้แล้วในสมการที่ 2.12 และ 2.13

4.2.2 การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนทิวไดออกไซด์ในเตาสีเคลือบ

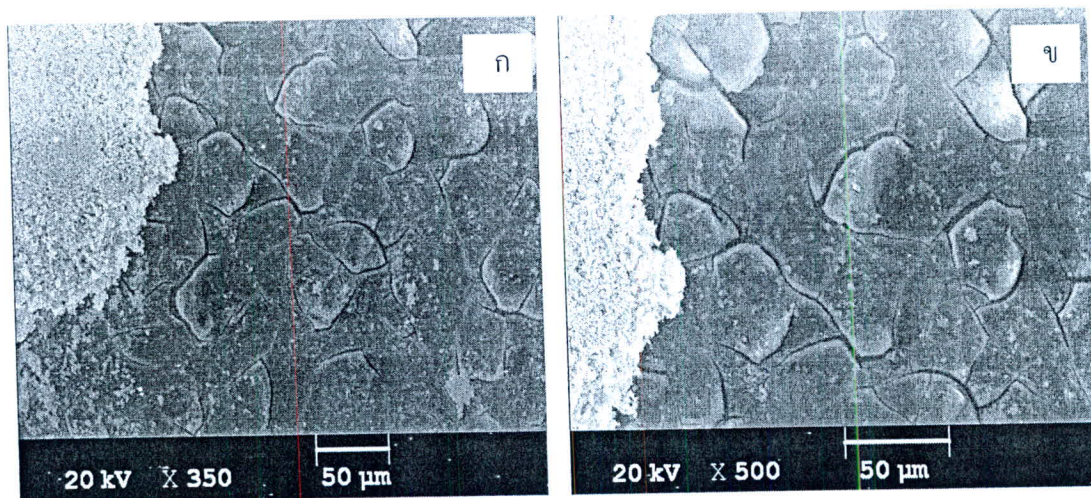
การดำเนินการวิจัยในเตาสีเคลือบนี้ จะใช้ผงทิวไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลา ในอัตราส่วนที่ต่างกันเป็นสารตั้งต้น ทำการวิจัยในสถานะเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เมื่อปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง รูปร่างลักษณะโครงสร้างนาโนทิวไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้บนผงวัสดุตัวอย่าง และฐานรองซิลิกอน ถูกศึกษาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM แสดงผล ดังนี้

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงทิวไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน ที่ไหลเข้าสู่เตาด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.89



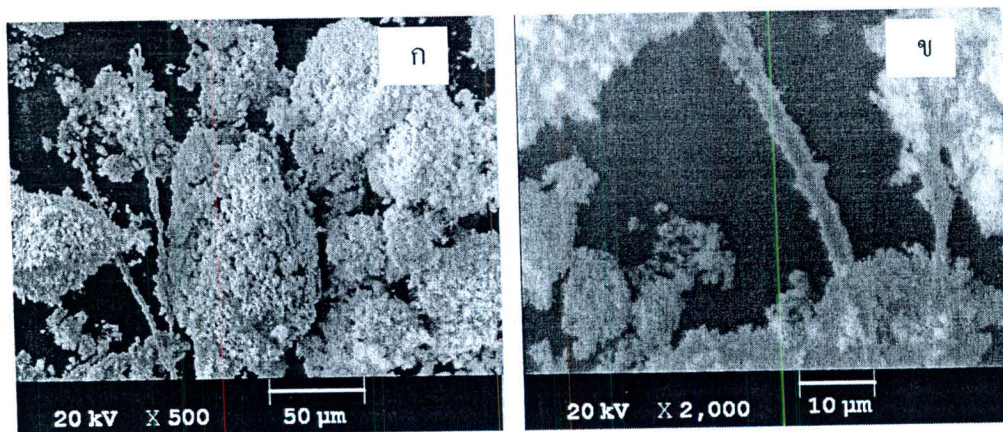
ภาพที่ 4.89 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 1 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.90



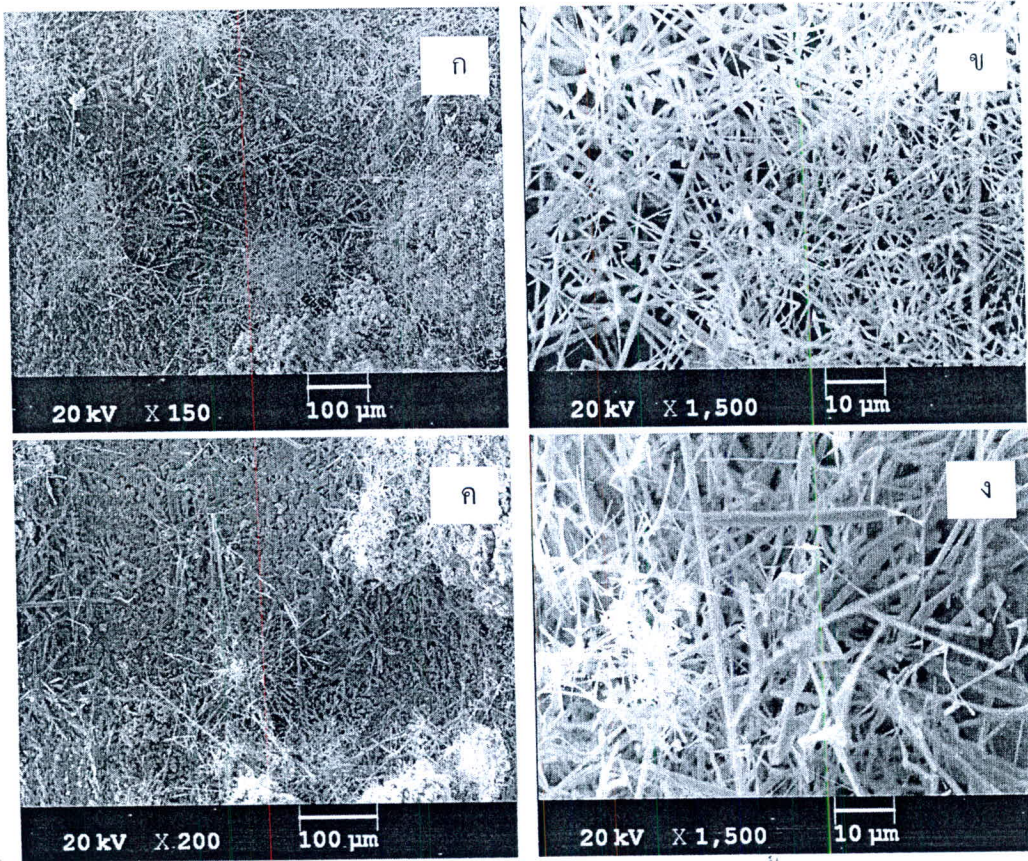
ภาพที่ 4.90 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน บนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงทินไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน ที่ไหลเข้าสู่เตาด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มีลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.90



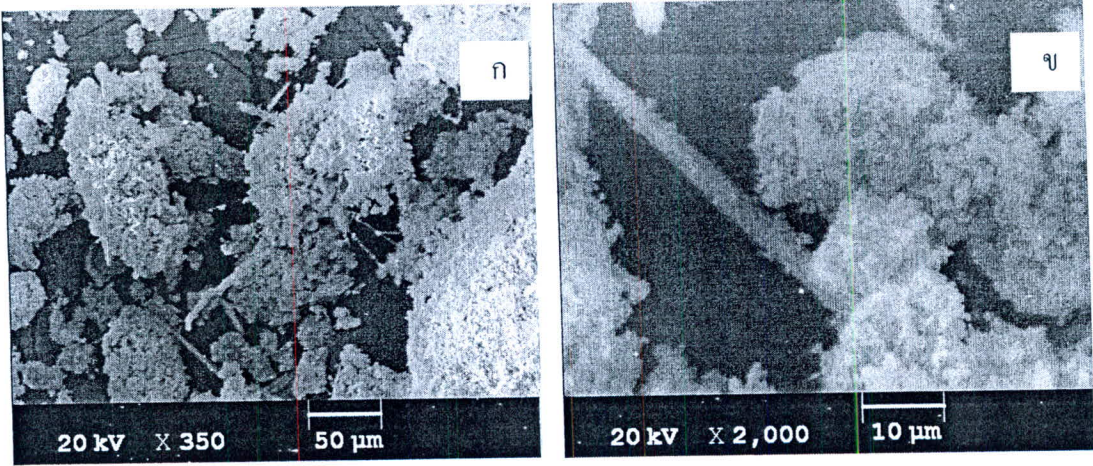
ภาพที่ 4.91 ภาพ SEM ของตัวอย่าง หลังเผาที่ 2 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.92



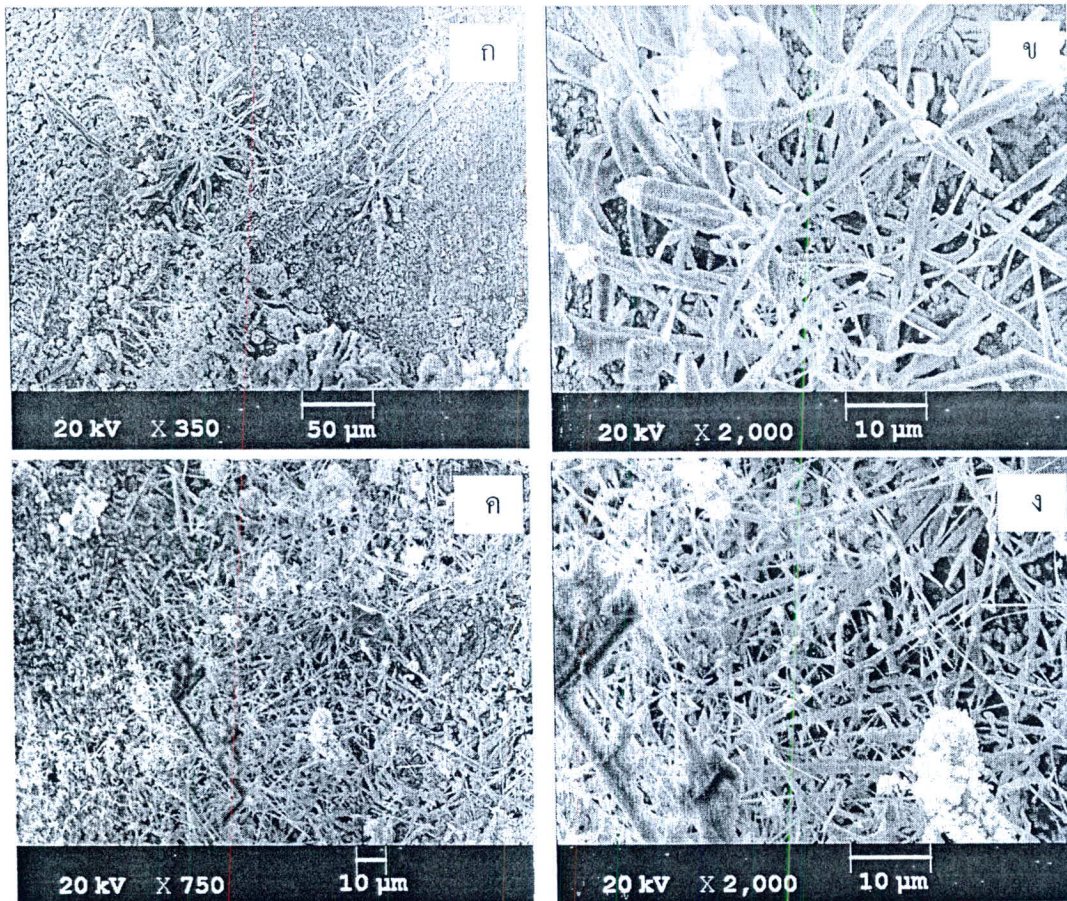
ภาพที่ 4.92 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการผสมทินไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดย น้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน ที่ไหลเข้าสู่เตาด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มี ลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.92



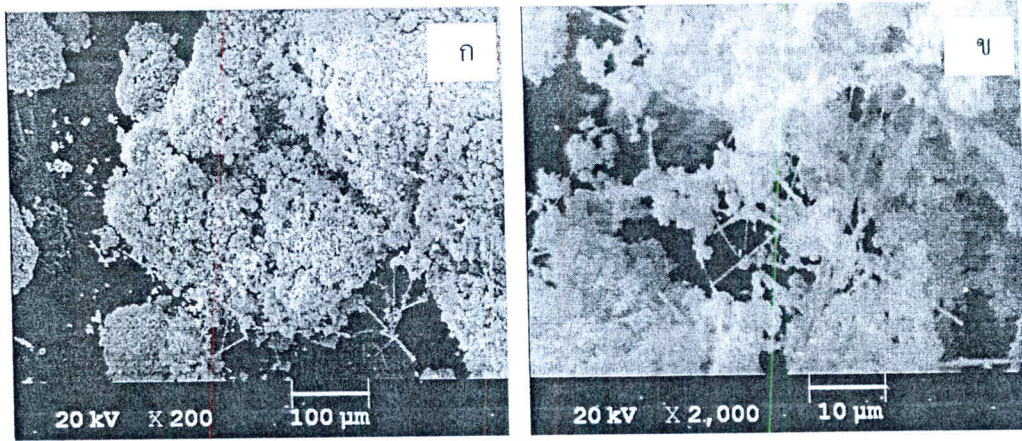
ภาพที่ 4.93 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.94



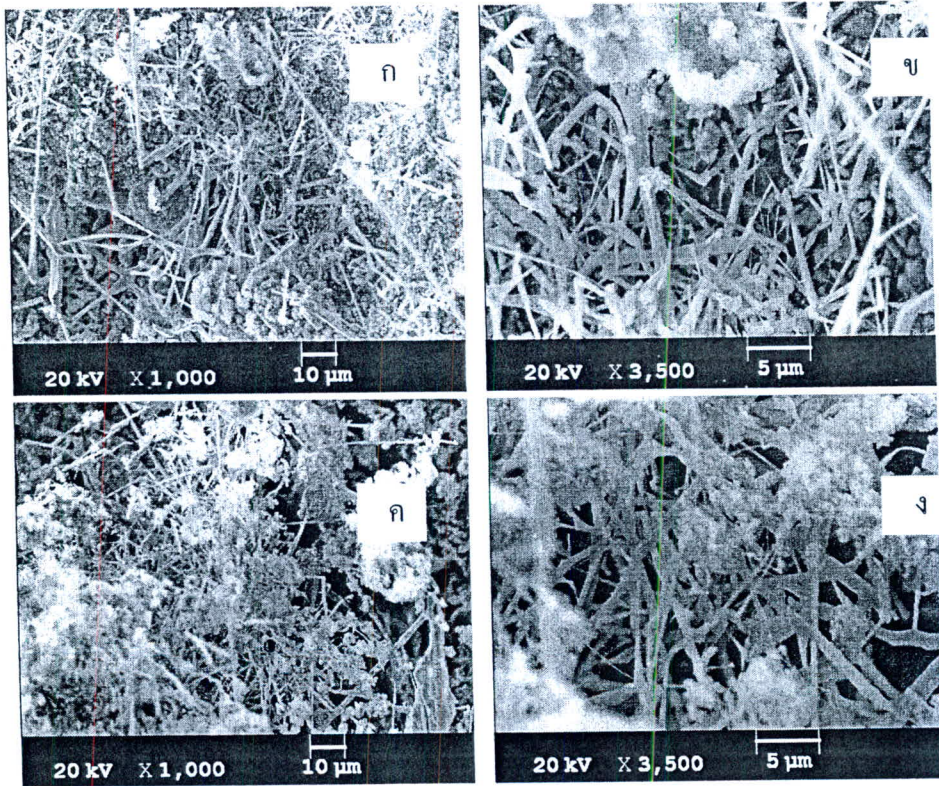
ภาพที่ 4.94 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงทินไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดย น้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน ที่ไหลเข้าสู่เตาด้วยอัตราการไหล 0.5 L/min ที่ความดันแก๊สคงที่ 1 บาร์ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องพบว่า วัสดุที่เตรียมได้มี ลักษณะสีขาว เมื่อนำไปถ่าย SEM จะมีลักษณะ ดังภาพที่ 4.95



ภาพที่ 4.95 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 1 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

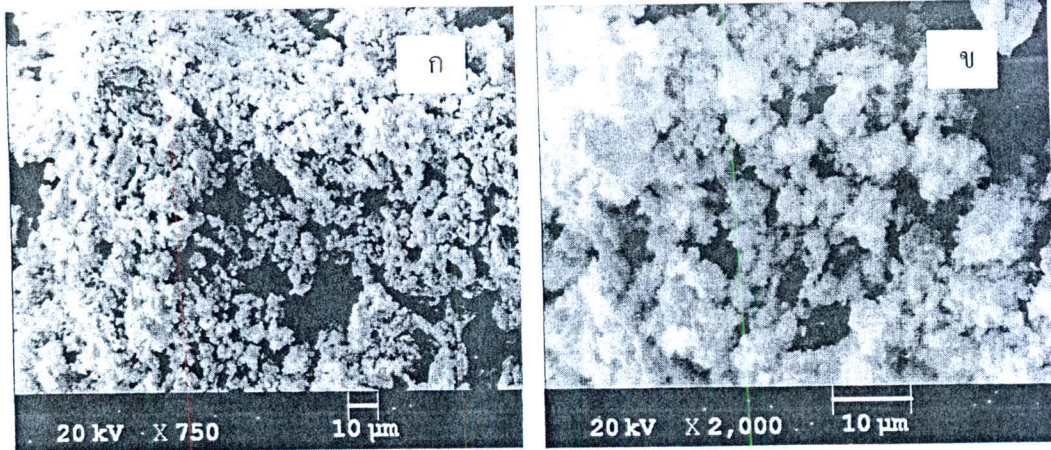
เมื่อนำฐานรองซิลิกอนที่วางบนผงตัวอย่าง ไปถ่ายภาพด้วย SEM จะได้ลักษณะดังภาพที่ 4.96



ภาพที่ 4.96 ภาพ SEM ของฐานรองซิลิกอน ที่วางบนผงตัวอย่าง (ก) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 1 (ข) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 1 (ค) กำลังขยายต่ำ บริเวณที่ 2 (ง) กำลังขยายสูง บริเวณที่ 2

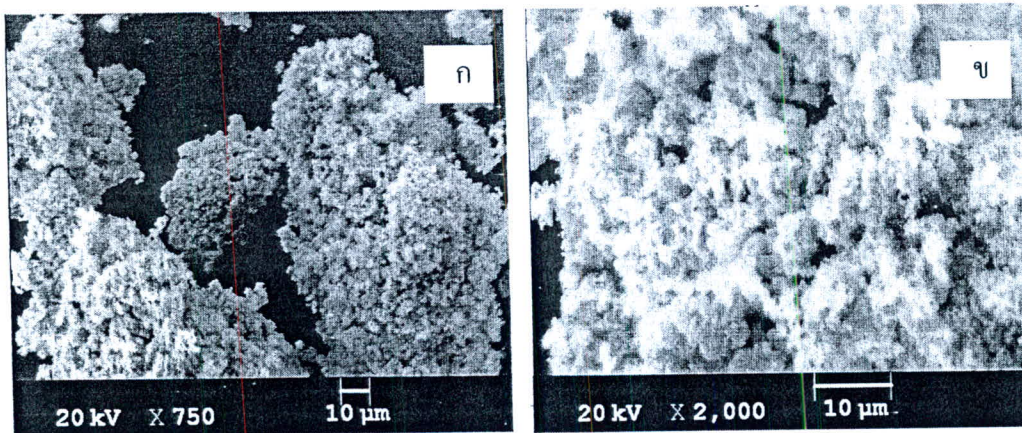
การวิเคราะห์ผลจากภาพ SEM พบว่า รูปร่างลักษณะของวัสดุนาโนที่เตรียมได้บนผงวัสดุตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 700 °C และ 900 °C จะประกอบไปด้วย particles แต่ที่เงื่อนไข 800 °C ใช้เวลาในการเผา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง จะมี microfibers รวมอยู่ด้วย ในส่วนของฐานรองซิลิกอนนั้น ที่อุณหภูมิ 700 °C เวลาในการเผา 3 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 1 ชั่วโมง จะเกิด particles เกาะกลุ่มกันเป็นชั้นหนา นอกจากนั้นยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง บนฐานรองซิลิกอนจะประกอบไปด้วย nanoparticles, nanowires และ nanofibers เกิดขึ้นกระจายตัวกันเต็มพื้นผิวฐานรองซิลิกอน ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 3 ชั่วโมง สังเกตเห็น microfibers ขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ บางบริเวณจะมี nanowires แทรกอยู่ระหว่าง microfibers และที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 4 ชั่วโมง จะเกิดโครงสร้างนาโนหลาย ๆ ลักษณะรวมกันอยู่ในบริเวณเดียวกัน นอกจากนั้นยังพบอีกว่า ที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 4 ชั่วโมงจะได้โครงสร้างนาโนแบบ nanofibers ขนาดใหญ่แทรกตัวอยู่ระหว่าง particles จะสังเกตเห็นว่า การเตรียมโครงสร้างนาโนในสถานะเงื่อนไขนี้จะเกิดโครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่ง ที่อุณหภูมิ 800 °C ที่เวลาต่าง ๆ กันจะเตรียมได้โครงสร้างนาโนที่แตกต่างกัน และยังพบอีกว่า การเตรียมโครงสร้างนาโนด้วยเงื่อนไขที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง จะได้โครงสร้าง nanowires คล้ายกับการเตรียมของ Yang และคณะ โครงสร้างนาโนแบบมิติหนึ่งที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้ เกิดจากเมื่อผง $\text{SnO}_2(\text{s})$ ถูกกระตุ้นด้วย $\text{C}(\text{s})$ ที่อุณหภูมิสูง ที่สถานะนี้จะเกิด $\text{SnO}(\text{g})$ และ $\text{CO}(\text{g})$ หลังจากนั้น $\text{CO}(\text{g})$ ทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ $\text{SnO}_2(\text{s})$ ทำให้เกิดเป็น $\text{SnO}(\text{g})$ และ $\text{CO}_2(\text{g})$ จากปฏิกิริยาดังกล่าว ทำให้เกิด $\text{SnO}(\text{g})$ จำนวนมาก เมื่ออุณหภูมิลดลง (อยู่ในช่วงสูงกว่า 600 °C) $\text{SnO}(\text{g})$ จะแยกตัวออกเป็น $\text{Sn}(\text{l})$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายหยดน้ำ (Sn droplets) และ $\text{SnO}_2(\text{s})$ เนื่องจากคิบุคมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ หลังจากนั้น Sn droplets เกิดการ adsorption กับ $\text{SnO}(\text{g})$ ในบรรยากาศเกิดเป็น $\text{SnO}_2(\text{s})$ และ SnO_2 nanowires ซึ่งเป็นกลไกการเกิดแบบ VLS ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.11

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผา ผงคิบุคผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่าง ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.97



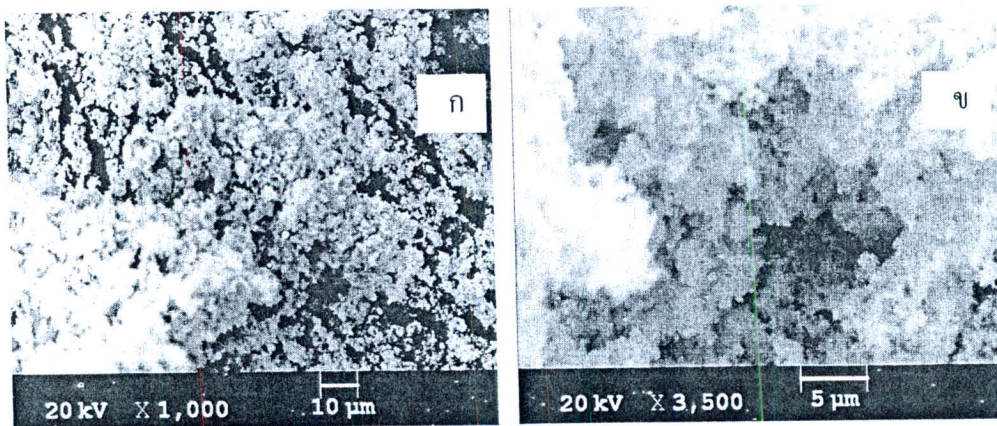
ภาพที่ 4.97 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินบุกผสมกับผง กำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.98



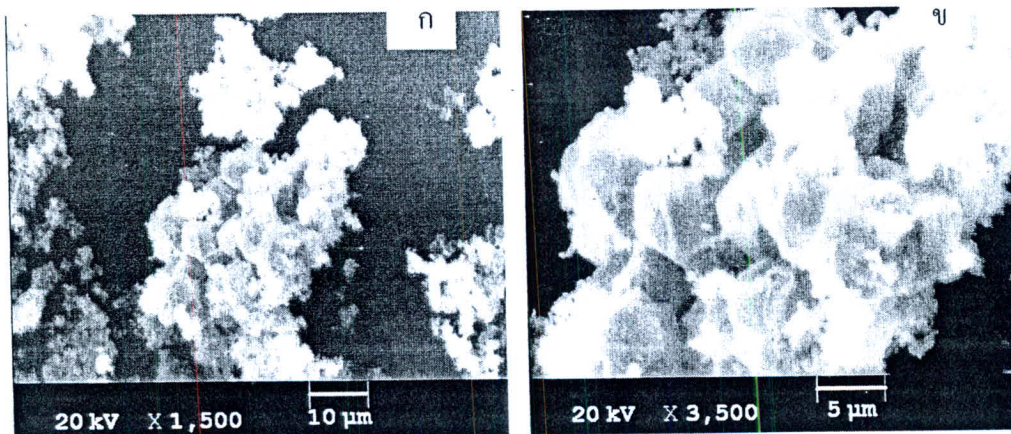
ภาพที่ 4.98 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินบุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.99



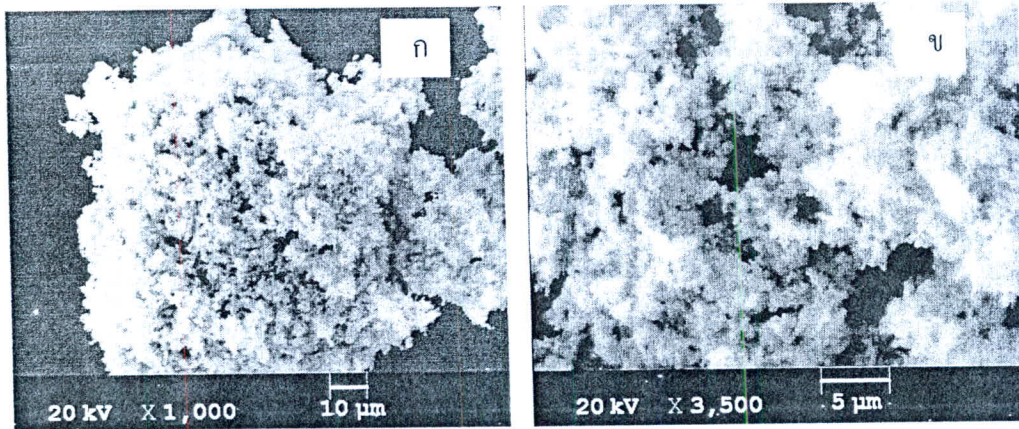
ภาพที่ 4.99 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 5 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินบุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.100



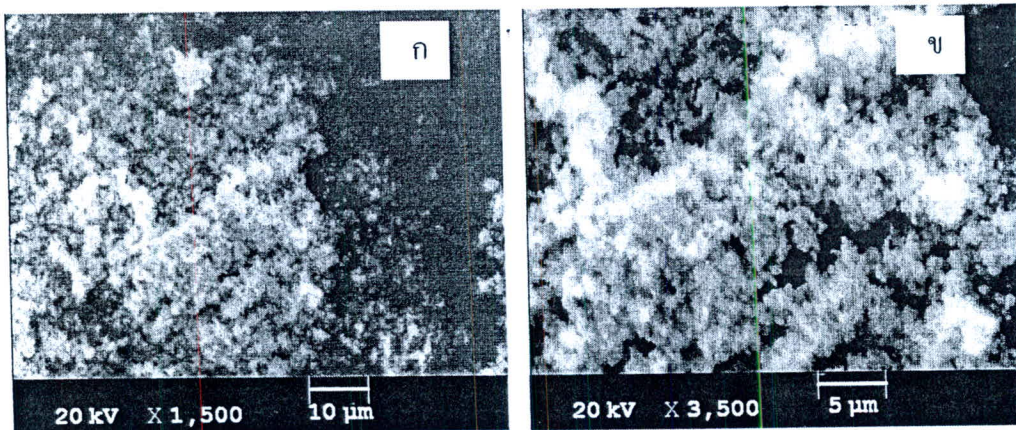
ภาพที่ 4.100 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 6 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินบุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.101



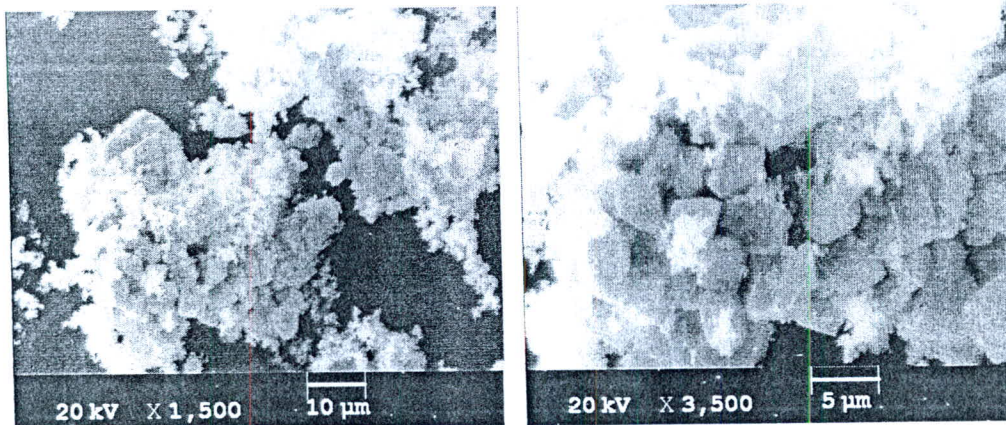
ภาพที่ 4.101 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.102



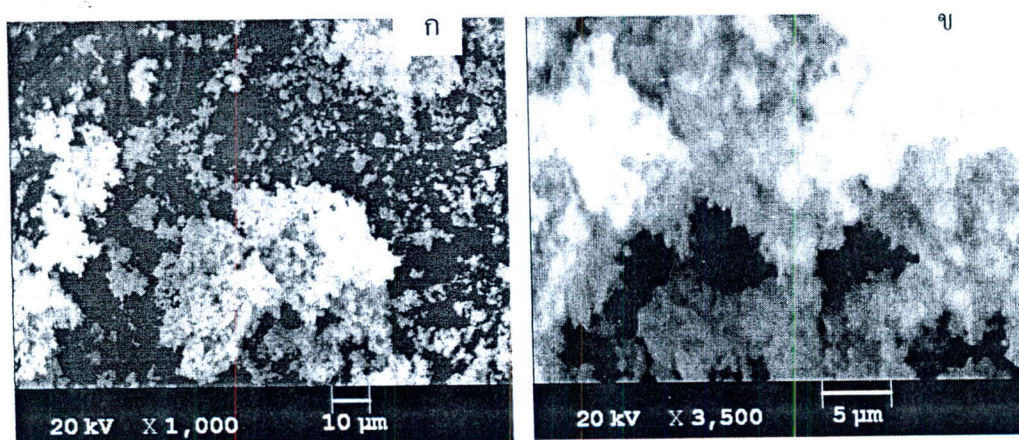
ภาพที่ 4.102 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.103



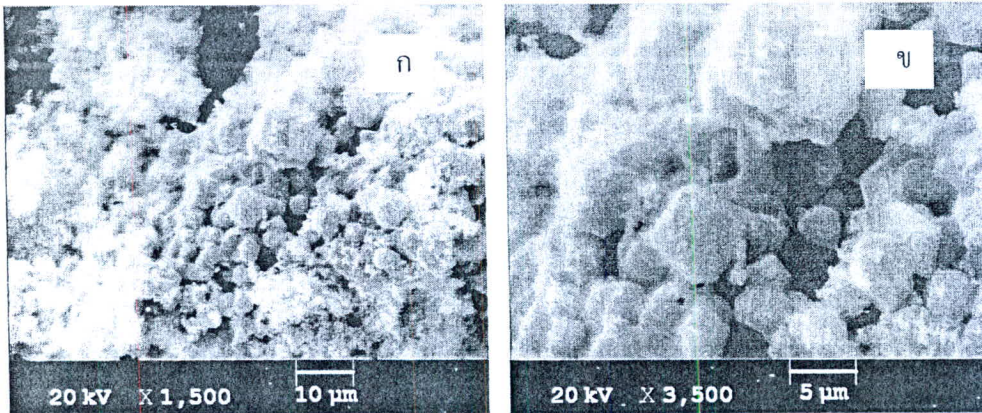
ภาพที่ 4.103 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 5 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.104



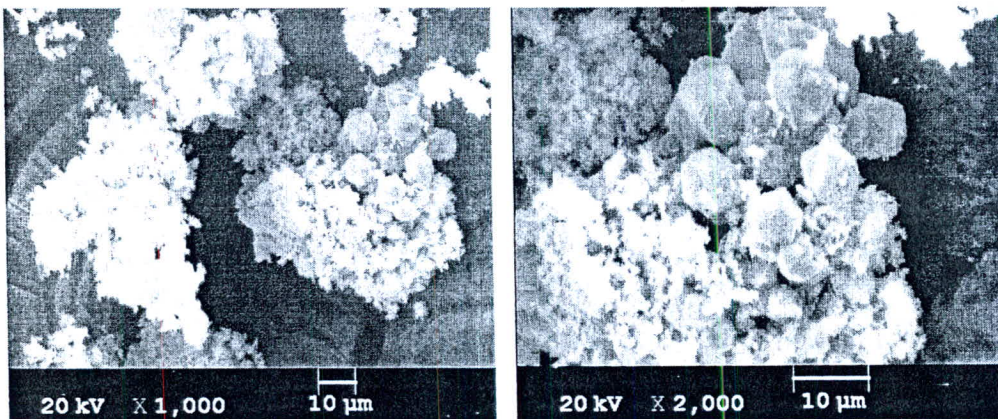
ภาพที่ 4.104 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 6 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.105



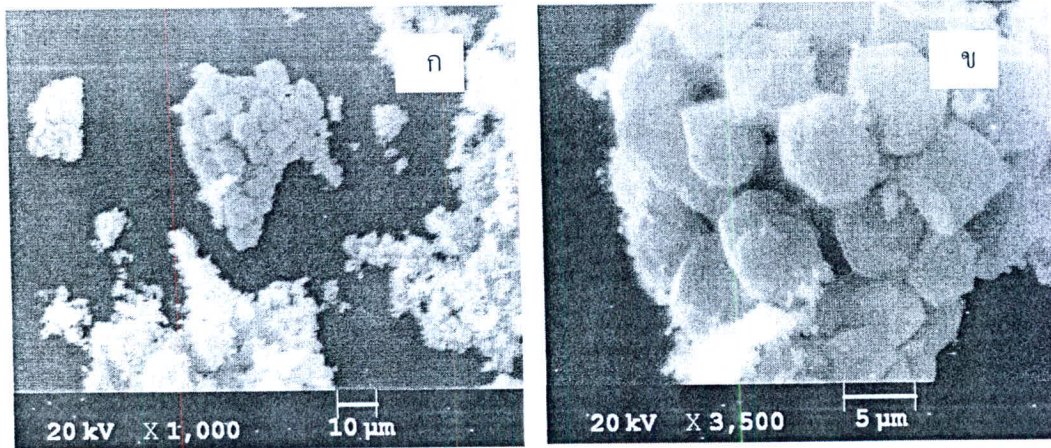
ภาพที่ 4.105 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.106



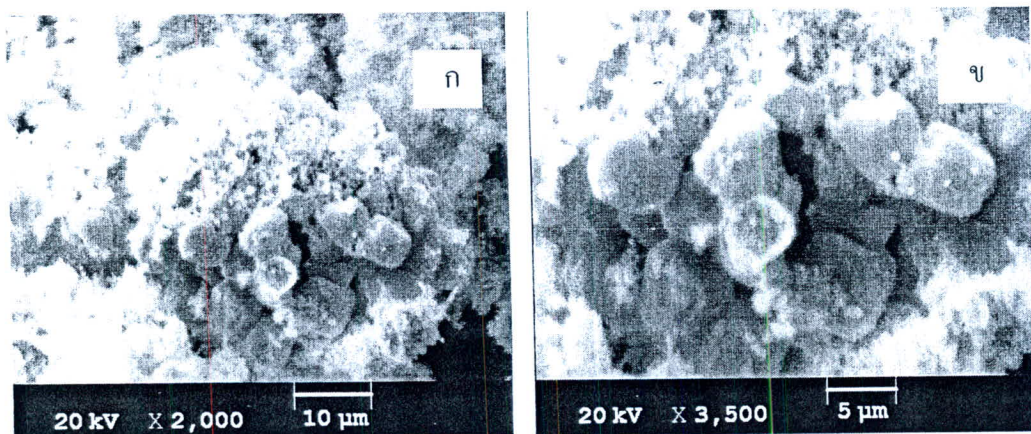
ภาพที่ 4.106 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.107



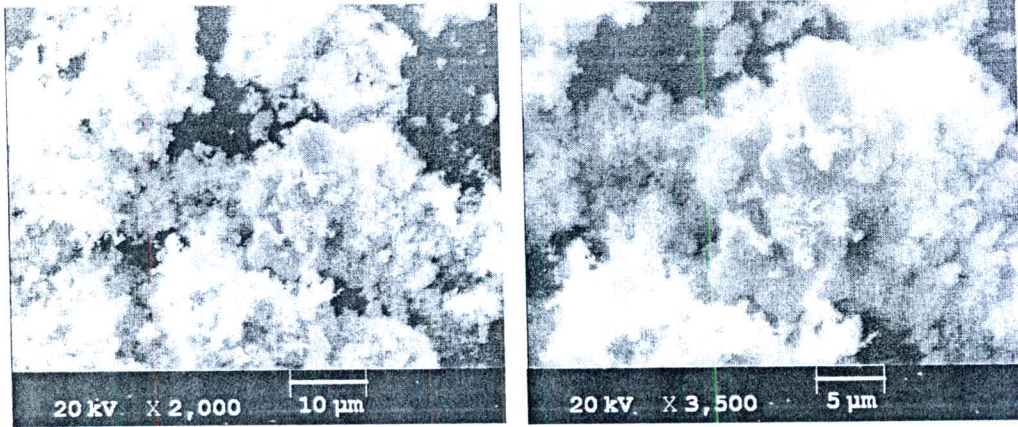
ภาพที่ 4.107 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 5 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:2:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.108



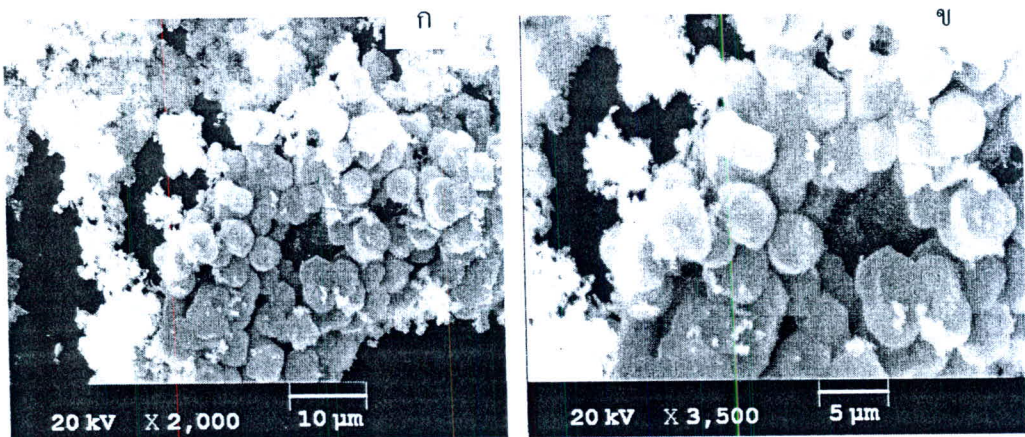
ภาพที่ 4.108 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง E12 หลังเผาที่ 6 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3:1.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง ผงวัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.109



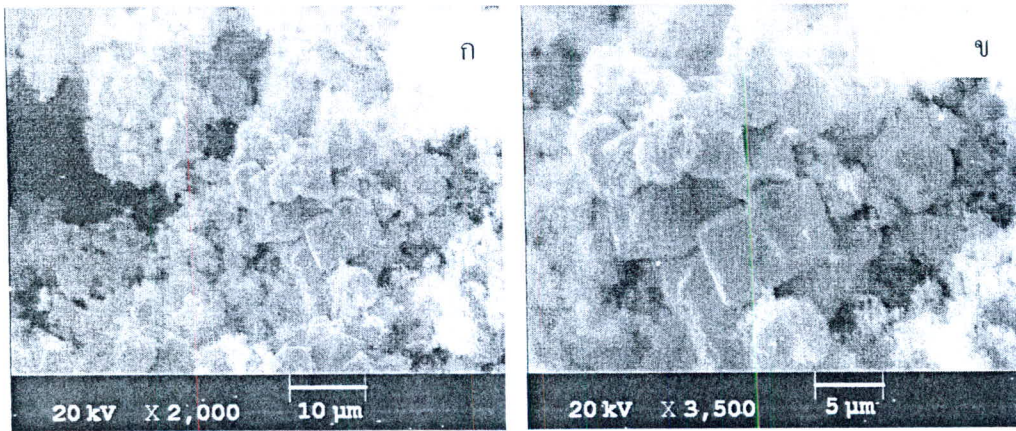
ภาพที่ 4.109 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง E13 หลังเผาที่ 3 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3:1.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.110



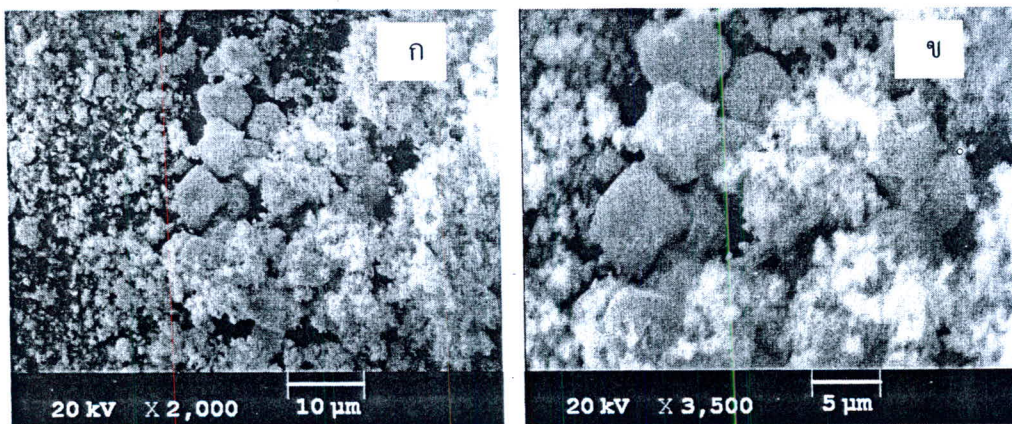
ภาพที่ 4.110 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 4 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3:1.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.111



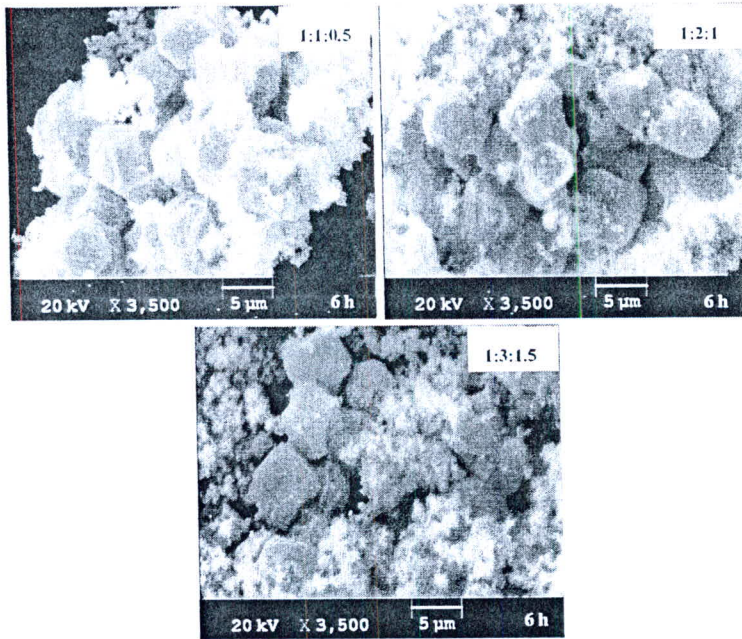
ภาพที่ 4.111 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 5 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดินุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3:1.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศอากาศปกติ หลังจากปล่อยให้เตาเย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปถ่ายภาพ SEM จะมีลักษณะดังภาพที่ 4.112

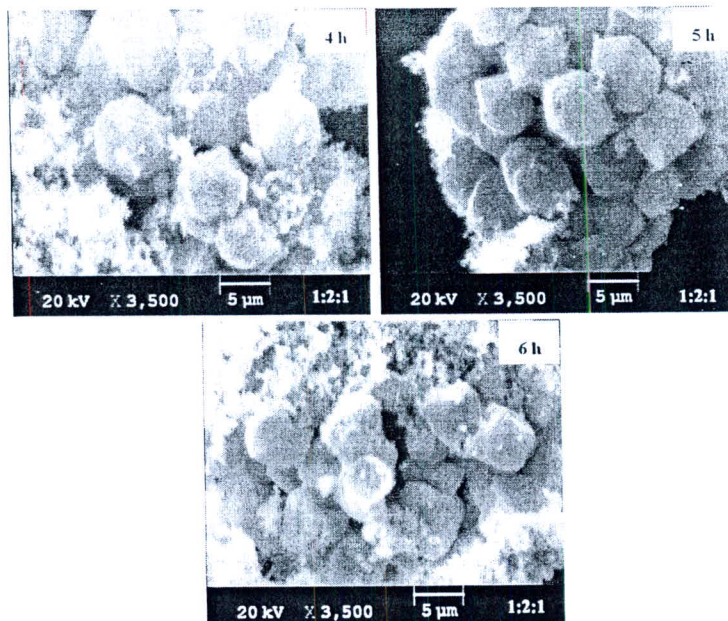


ภาพที่ 4.112 ภาพ SEM ของผงตัวอย่าง หลังเผาที่ 6 ชั่วโมง (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

จากภาพ SEM พบว่า การเตรียมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ที่ใช้ผงดินุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ เป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 400 °C เวลา 6 ชั่วโมง สามารถเตรียม nanoparticles และ microparticles ได้ โดยเฉพาะ microparticles จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของสารตั้งต้นจาก 1:1:0.5 เป็น 1:2:1 และ 1:3:1.5 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.112 นอกจากนั้นยังพบว่า การเตรียมที่อุณหภูมิ 400 °C ด้วยอัตราส่วน 1:2:1 เมื่อเพิ่มเวลาในการเผาจาก 4 ชั่วโมง เป็น 5 และ 6 ชั่วโมง จะเตรียมได้ microparticles ที่มีขนาดเล็กลงด้วย แสดงดังภาพที่ 4.113

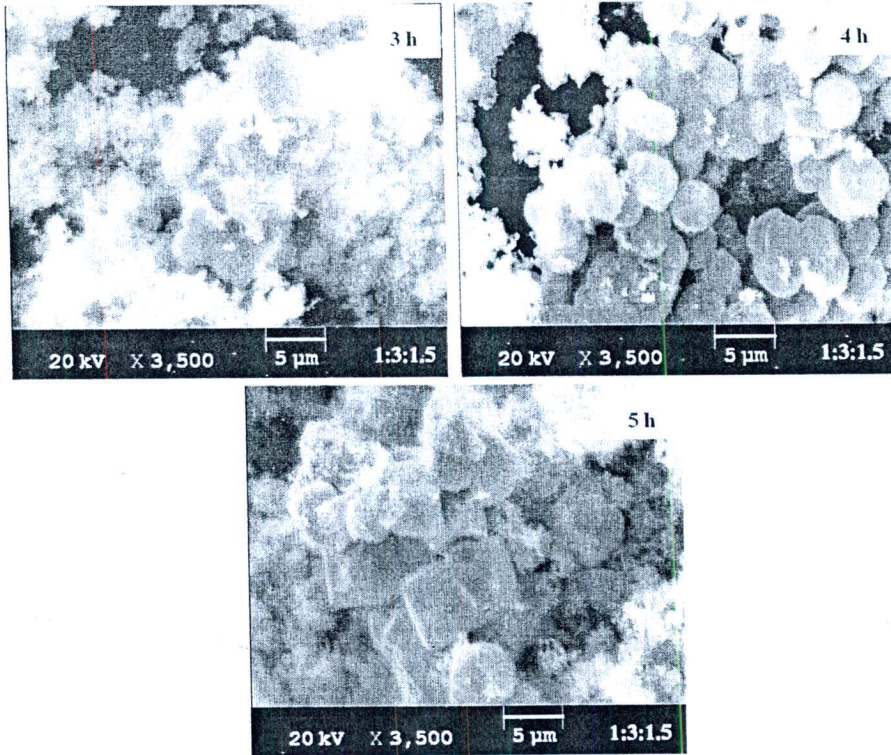


ภาพที่ 4.113 ขนาดของ microparticles เตรียมที่อุณหภูมิ 400 °C เวลา 6 ชั่วโมง ที่ใช้ Sn+S+NH₄Cl ในอัตราส่วน 1:1:0.5, 1:2:1 และ 1:3:1.5



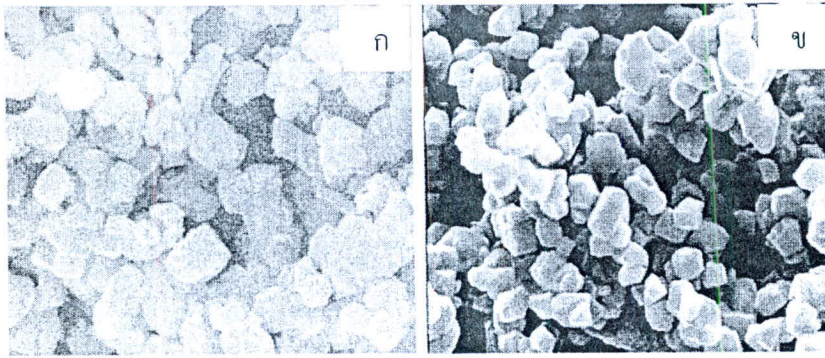
ภาพที่ 4.114 ขนาดของ microparticles เตรียมที่อุณหภูมิ 400 °C ที่ใช้ Sn+S+NH₄Cl ในอัตราส่วน 1:2:1 เวลา 4, 5 และ 6 ชั่วโมง

และ microparticles จะมีขนาดโตขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการเผาจาก 3 ชั่วโมง เป็น 4 และ 5 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิ 400 °C ด้วยอัตราส่วน 1:3:1.5 แสดงดังภาพที่ 4.114 นอกจากนี้ยังพบว่า การเตรียมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีนี้ จะเตรียมได้โครงสร้างนาโนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับการเตรียม



ภาพที่ 4.115 ขนาดของ microparticles เตรียมที่ อุณหภูมิ 400 °C ใช้ Sn+S+NH₄Cl ในอัตราส่วน 1:3:1.5 เวลา 3, 4 และ 5 ชั่วโมง

ของ Bai และคณะ ที่เตรียมด้วยวิธีการเดียวกัน แต่อัตราส่วนและเวลาในการเผาต่างกัน รูปร่างลักษณะทินไดออกไซด์ที่เตรียมได้ แสดงดังภาพที่ 4.116 (ก) เรายังพบอีกว่า การเตรียมโครงสร้าง



ภาพที่ 4.116 รูปร่างลักษณะ โครงสร้างทินไดออกไซด์แบบ (ก) nanocrystals (ข) nanoparticle ที่สังเคราะห์ได้ [27]

นาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีที่การของ Kim และคณะ[27] ก็สามารถเตรียมได้โครงสร้างนาโนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นเตรียม nanoparticles ในเตาท่อควอทซ์ที่อุณหภูมิ 850 °C ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง รูปร่างลักษณะของทินไดออกไซด์ที่เตรียมได้ แสดงดังภาพที่ 4.165 (ข) จะเห็นได้ว่า โครงสร้างนาโนที่มีรูปร่างลักษณะที่คล้ายคลึงกัน สามารถเตรียมได้ด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ nanoparticles และ microparticles ที่เตรียมได้ด้วยวิธีนี้เกิดจาก การทำปฏิกิริยาระหว่างผงดีบุกกับ ผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของสารตั้งต้น ไม่ว่าจะเป็นผงกำมะถัน หรือผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเป็น Sn, SnO, SnS₂, SnSO₄, SO₃ และ SnO₂ หรือ อื่น ๆ

4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF)

ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ด้วยการบวมการต่างๆ จะนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบ ด้วยเครื่อง XRF แสดงผลได้ในตารางที่ 4.5-4.8

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของสารประกอบทินไดออกไซด์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ คิดเป็น 100 % (Normalized to: 100%)

สารตัวอย่างที่	สารตั้งต้น (powder)	อัตราส่วน	อุณหภูมิ	เวลา	Concentrations (SnO ₂)
1	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:0.5	400 °C	3 hrs	95.35 %
2	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:0.5	400 °C	4 hrs	95.83 %
3	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:0.5	400 °C	5 hrs	94.86 %
4	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:0.5	400 °C	6 hrs	95.11 %
5	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:1	400 °C	3 hrs	95.18 %
6	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:1	400 °C	4 hrs	95.11 %
7	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:1	400 °C	5 hrs	95.02 %
8	Sn + S + NH ₄ Cl	1:1:1	400 °C	6 hrs	95.19 %
9	Sn + S + NH ₄ Cl	1:2:1	400 °C	3 hrs	94.35 %
10	Sn + S + NH ₄ Cl	1:2:1	400 °C	4 hrs	94.62 %
11	Sn + S + NH ₄ Cl	1:2:1	400 °C	5 hrs	95.57 %
12	Sn + S + NH ₄ Cl	1:2:1	400 °C	6 hrs	94.75 %
13	Sn + S + NH ₄ Cl	1:3:1.5	400 °C	3 hrs	94.23 %
14	Sn + S + NH ₄ Cl	1:3:1.5	400 °C	4 hrs	93.60 %
15	Sn + S + NH ₄ Cl	1:3:1.5	400 °C	5 hrs	93.89 %
16	Sn + S + NH ₄ Cl	1:3:1.5	400 °C	6 hrs	94.11 %

จากข้อมูลในตาราง แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของสารประกอบ (concentrations) ที่เตรียมได้ในแต่ละเงื่อนไขจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน และมีสารประกอบหลายชนิด สำหรับในส่วนของปริมาณสารประกอบทินไดออกไซด์

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง(1)ที่เตรียมได้จาก การเผาผงดีบุกผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ด้วยอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในเตาอบ ไปวิเคราะห์ด้วย XRF ผลการวิเคราะห์แสดง ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของสารประกอบที่เตรียมได้(1)

NO.	Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)	Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1	SnO ₂	95.02	0.4	Cl	0.2326	0.007
2	SO ₃	3.853	0.02	Si	<<	
3	P ₂ O ₅	0.8939	0.009	Mg	<<	
Normalized to: 100. %						

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง(2) ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ในอัตราส่วน 1:3:1.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาอบ ไปวิเคราะห์ด้วย XRF ผลการวิเคราะห์แสดง ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบของสารประกอบที่เตรียมได้จากตัวอย่าง(2)

NO.	Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)	Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1	SnO ₂	94.23	0.4	Nb ₂ O ₅	0.0000	
2	SO ₃	4.634	0.02	Si	<<	
3	P ₂ O ₅	0.8931	0.008	Mg	<<	
4	Cl	0.2465	0.007			
Normalized to: 100. %						

เมื่อนำวัสดุตัวอย่าง(3) ที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ในอัตราส่วน 1:3:1.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในเตาอบ ไปวิเคราะห์ด้วย XRF ผลการวิเคราะห์แสดง ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของสารประกอบที่เตรียมได้จากตัวอย่าง(3)

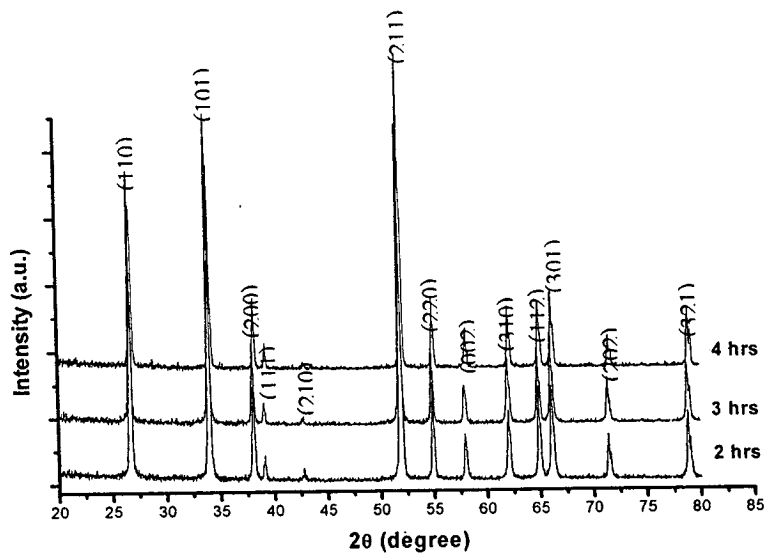
NO.	Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)	Compound Name	Conc. (%)	Absolute Error (%)
1	SnO ₂	93.60	0.4	Cl	0.3266	0.007
2	SO ₃	5.084	0.02	Nb ₂ O ₅	0.0000	
3	P ₂ O ₅	0.990	0.008			
Normalized to: 100. %						

จากข้อมูลในตาราง พบว่า การเผาสารตัวอย่างที่ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1:1:0.5 ที่อุณหภูมิ 400 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน ได้ปริมาณสารประกอบทินไดออกไซด์ เรียงจากมากไปน้อย คือ 95.83 %, 95.35 %, 95.11 % และ 94.86 % เวลาในการเผา 4, 3, 6 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่อัตราส่วน 1:1:1 มีปริมาณสารประกอบทินไดออกไซด์ เรียงจากมากไปน้อย คือ 95.19 %, 95.18 %, 95.11 % และ 95.02 % เวลาในการเผา 6, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ 95.57 %, 94.75 %, 94.62 % และ 94.35 % ที่เวลา 5, 6, 4 และ 3 ชั่วโมง สำหรับสารตัวอย่างที่ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1:2:1 โดยน้ำหนัก สารตัวอย่างที่ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1:3:1.5 ที่อุณหภูมิ 400 °C มีปริมาณสารประกอบทินไดออกไซด์ เรียงจากมากไปน้อย คือ 94.23 %, 94.11 %, 93.89 % และ 93.60 % ที่เวลา 3, 6, 5 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วยังพบว่า การเตรียมสารตัวอย่างด้วยอัตราส่วน 1:1:0.5 ใช้เวลาในการเผา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 400 °C ให้ปริมาณสารประกอบทินไดออกไซด์มากที่สุด คือ 95.83 % จะเห็นว่า ปริมาณสารประกอบทินไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียม ที่อุณหภูมิ 400 °C อัตราส่วนเดียวกัน ไม่ขึ้นกับเวลาในการเผาเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมระหว่างผงดินุกกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ อีกด้วย

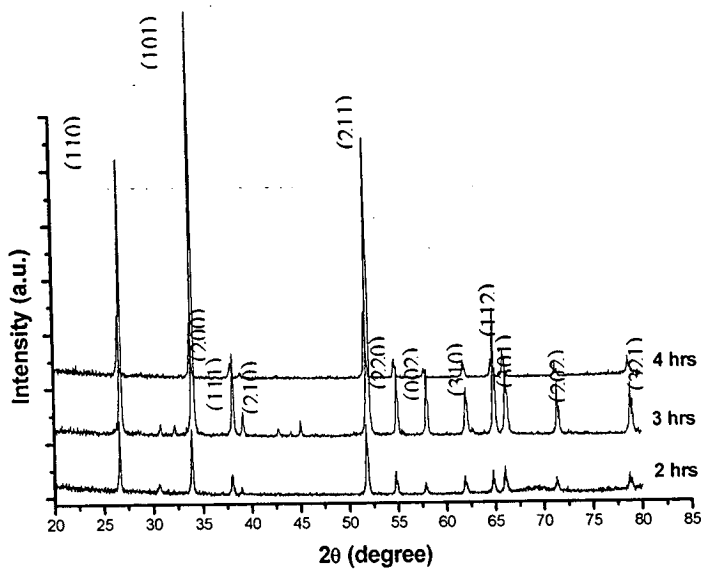
4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD)

4.4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้ในเตาท่อควอทซ์

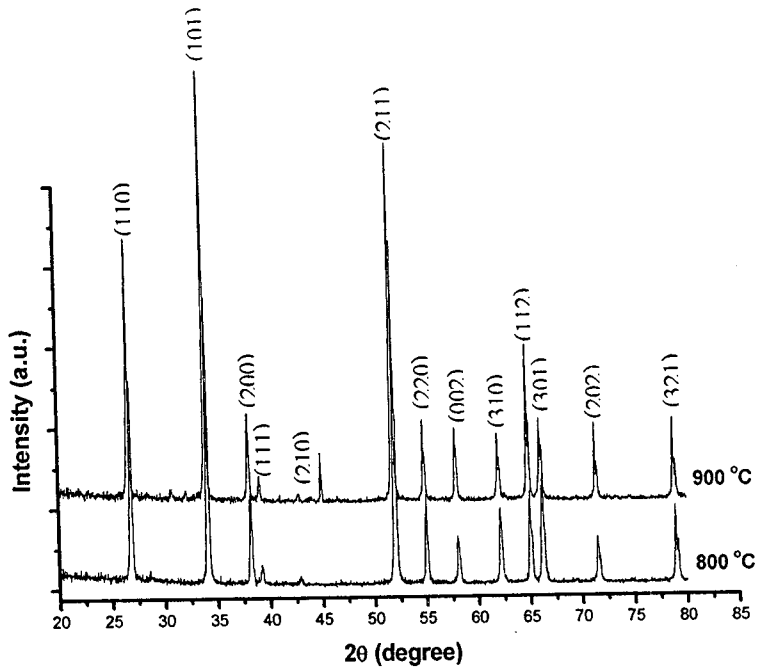
ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมในเตาท่อควอทซ์ ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้แสดงดังกราฟในภาพที่ 4.116-4.119



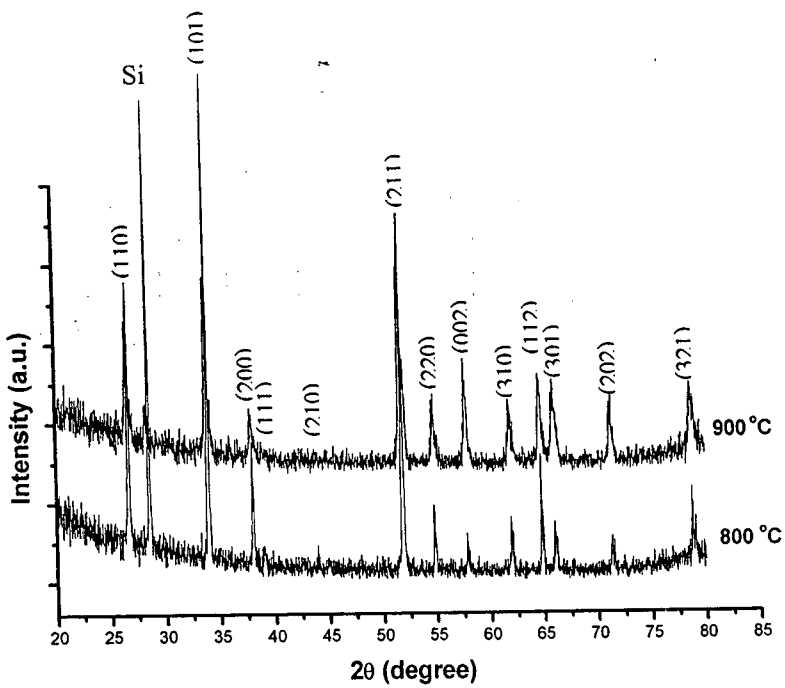
ภาพที่ 4.117 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุก ที่อุณหภูมิคงที่ 800°C เป็นเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N_2 และ O_2



ภาพที่ 4.118 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนจากการเผาผงดีบุกที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N_2 และ O_2



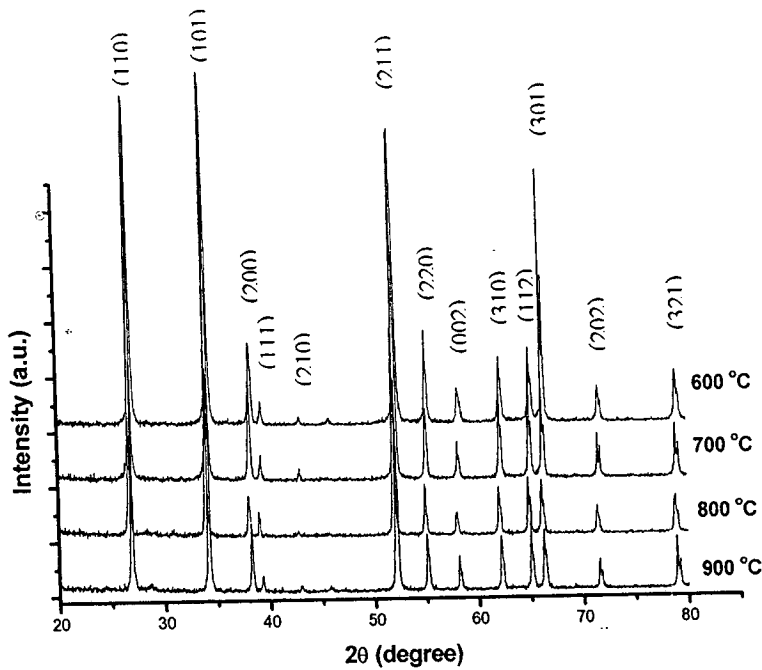
ภาพที่ 4.119 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงดิบที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ Ar และ O₂



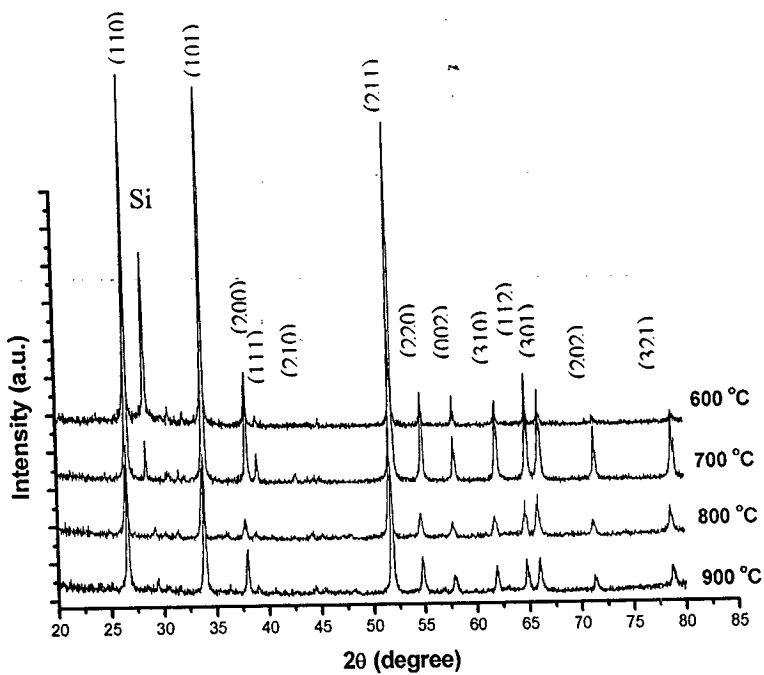
ภาพที่ 4.120 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนจากการเผาผงดิบที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ Ar และ O₂

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.116 ถึง 4.119 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิ 800 °C ถึง 900 °C ที่เวลาต่าง ๆ ในบรรยากาศที่แตกต่างกัน จะมีเฟสของ ทินไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม X' Pert line1.3b แล้วพบว่า ตรงกับ JCPDS file No. 41-1445 แสดงโครงสร้างแบบ tetragonal ด้วยระนาบ (110), (101), (200), (111), (210), (211), (220), (022), (310), (112), (301), (202) และ (321) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก คีบุกมีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดเฟสทินไดออกไซด์ เมื่อนำฐานรองซิลิกอนมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเดียวกัน จะมี peak เล็ก ๆ ของซิลิกอนออกไซด์เกิดขึ้น เนื่องจากฐานรองซิลิกอนได้รับความร้อนสูง ในบรรยากาศ อาร์กอน มี peak ของซิลิกอนขึ้น เนื่องจากเป็น peak ของฐานรองซิลิกอน เกิดจากที่สภาวะดังกล่าวมีผงของสารตัวอย่างเกาะบนฐานรองซิลิกอนน้อย และเมื่อทำการศึกษานขนาดของผลึกด้วยการคำนวณจากสมการ Scherrer พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขนาดของผลึกของสารตัวอย่างที่เตรียมได้บนผงตัวอย่างมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดจาก 32.8 นาโนเมตร เป็น 36.2 และ 37.5 นาโนเมตร ตามลำดับ เช่นเดียวกัน ที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดของผลึกก็มีขนาดโตขึ้นด้วย คือ 32.6, 37.3 และ 38.2 นาโนเมตร ตามลำดับ และบนฐานรองซิลิกอนพบว่า ขนาดของผลึกของสารตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิ 800 °C จะมีขนาดโตขึ้น คือ 32.8, 34.0 และ 42.6 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มเวลาในการเผาจาก 2 ชั่วโมง เป็น 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

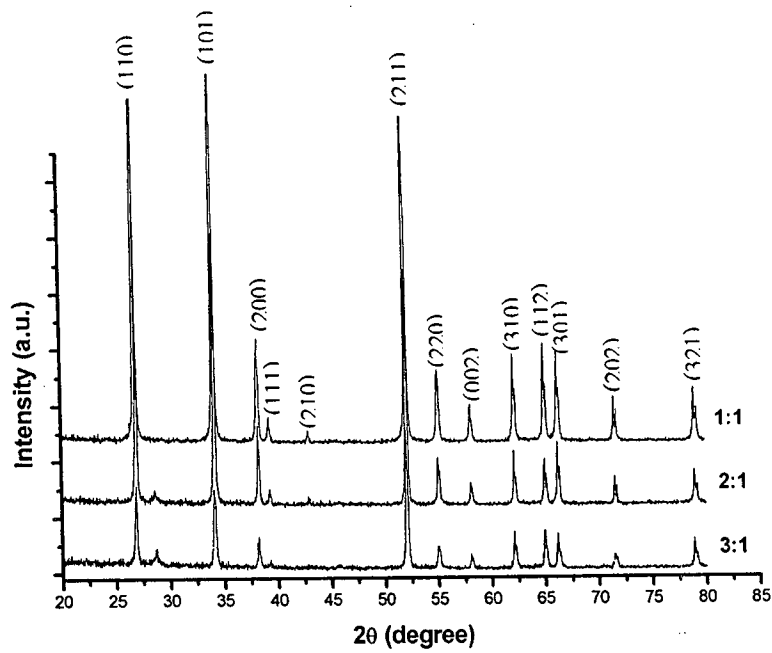
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากการเผาผงคีบุกผสมกับผงถ่านกะลา ซึ่งทำการเตรียมในเตาท่อควอทซ์มาศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.120 – 4.123



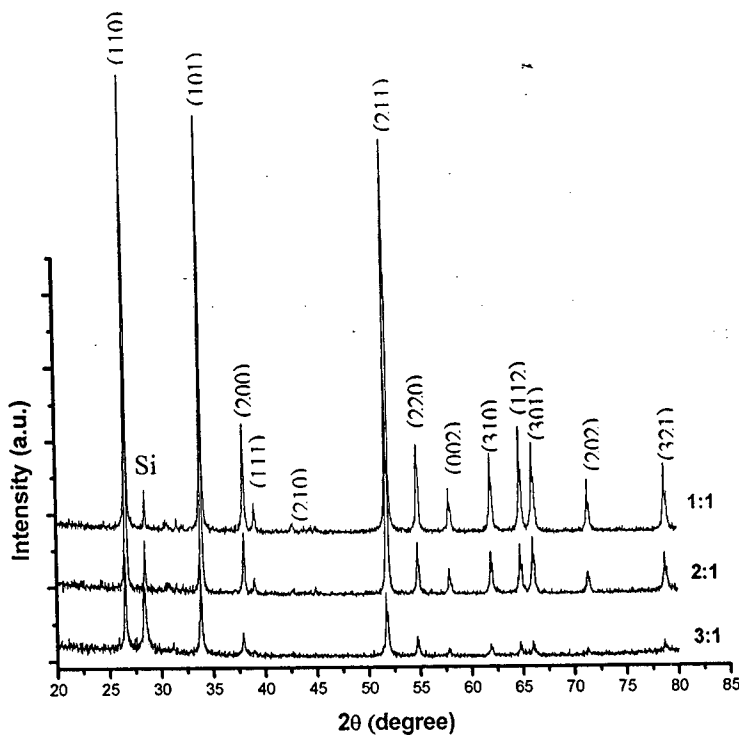
ภาพที่ 4.121 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลา (1:1) ที่อุณหภูมิ 600 °C, 700 °C, 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N₂ และ O₂



ภาพที่ 4.122 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนจากการเผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลา (1:1) ที่อุณหภูมิ 600 °C, 700 °C, 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N₂ และ O₂



ภาพที่ 4.123 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงคิบุค ผสมกับผงถ่านกะลา ในอัตราส่วน 1:1, 2:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N₂ และ O₂

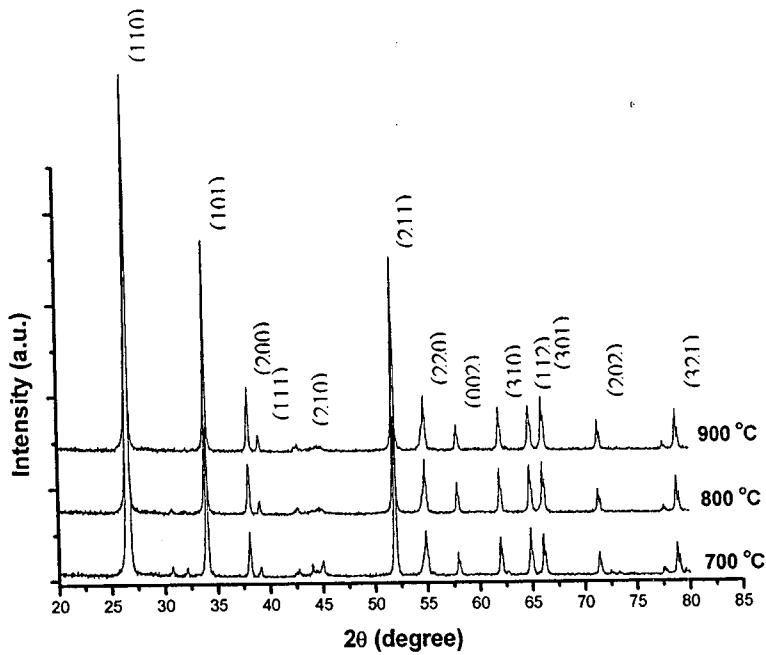


ภาพที่ 4.124 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนจากการ

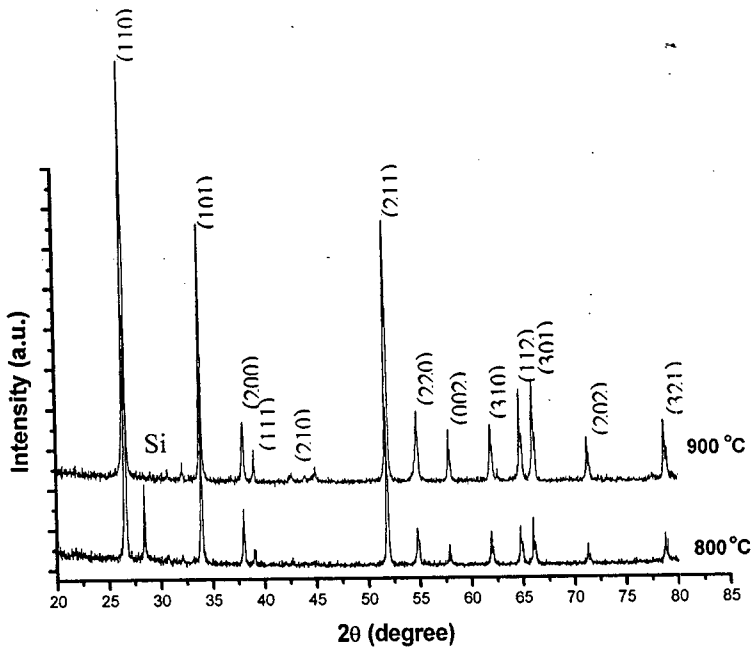
เผาผงดีบุกผสมกับผงถ่านกะลา ในอัตราส่วน 1:1, 2:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N₂ และ O₂

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.120 ถึง 4.123 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่าง ที่เตรียมได้บนผงวัสดุตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 600 °C ถึง 900 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน จะมีเฟสของทินไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม X' Pert line1.3b แล้วพบว่า ตรงกับ JCPDS file No. 41-1445 แสดงโครงสร้างแบบ tetragonal ด้วยระนาบ (110), (101), (200), (111), (210), (211), (220), (022), (310), (112), (301), (202) และ (321) ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ถึง 900 °C ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของดีบุก จึงทำให้ไอระเหยของดีบุก (Sn) รวมตัวกับอะตอมของออกซิเจน (O) เกิดเป็นทินไดออกไซด์ (SnO₂) เมื่อนำฐานรองซิลิกอนมาวิเคราะห์พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 °C ถึง 900 °C จะมี peak ขึ้นชัดเจนเช่นเดียวกัน บางเงื่อนไขเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เวลา 3 ชั่วโมง จะปรากฏ peak ของซิลิกอน เนื่องจากเป็น peak ของฐานรองซิลิกอน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวมีผงของสารตัวอย่างมาเกาะบนฐานรองซิลิกอนน้อย นอกจากนั้น ยังพบ peak เล็ก ๆ ของซิลิกอนออกไซด์เกิดขึ้นเมื่อเตรียมที่อุณหภูมิ 700 °C, 800 °C และ 900 °C ซึ่งเกิดจากฐานรองซิลิกอนได้รับความร้อนสูง และเมื่อทำการคำนวณหาขนาดของผลึก พบว่า ขนาดของผลึกของสารตัวอย่างที่เตรียมได้บนผงตัวอย่าง มีขนาดลดลง เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C, 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คือ 29.3, 29.1 และ 27.1 นาโนเมตร ตามลำดับ และยังพบอีกว่า บนฐานรองซิลิกอนที่ทำการสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน ขนาดของผลึกบนผงตัวอย่างมีขนาดลดลงอย่างเด่นชัด คือ 40.7, 34.9 และ 24.9 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C ใช้เวลาในการเผา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ขนาดของผลึกบนผงตัวอย่างมีขนาดโตขึ้น และบนฐานรองซิลิกอนมีขนาดเล็กลง แสดงให้เห็นว่า ขนาดของผลึกนอกจากจะขึ้นกับเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับบริเวณที่เกิดอีกด้วย

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของผงตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ในบรรยากาศ N₂ และไอน้ำ มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและองค์ประกอบ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.124 – 4.129

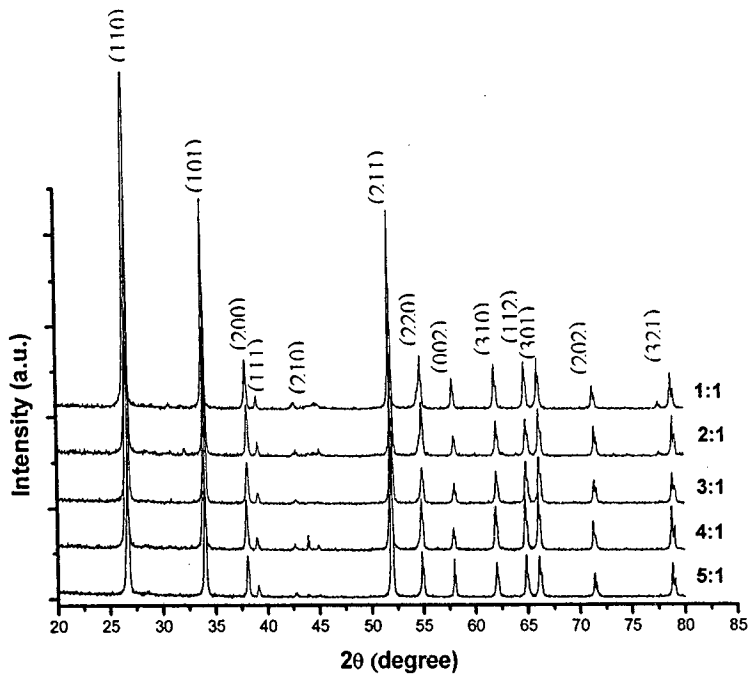


ภาพที่ 4.125 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ (1:1) ที่อุณหภูมิ 700 °C, 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N_2 และไอน้ำ

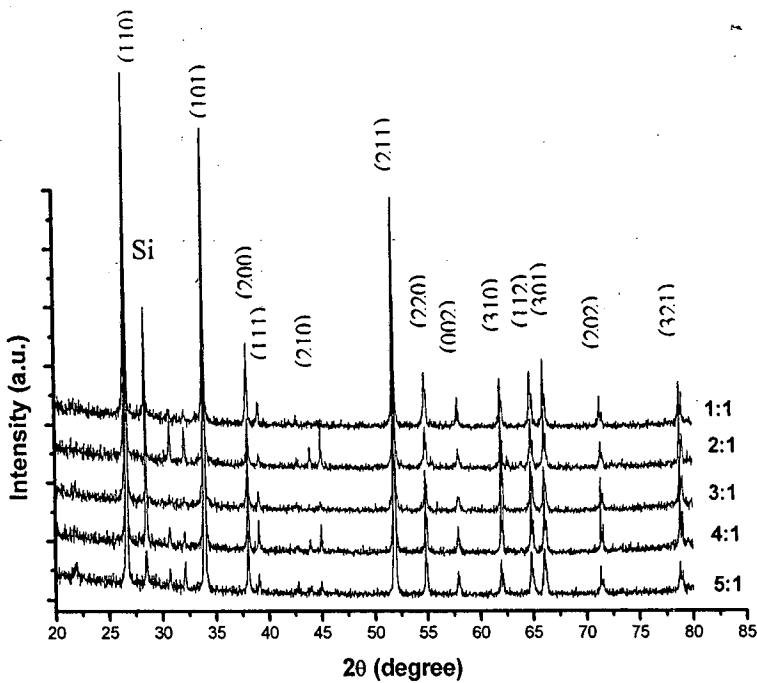


ภาพที่ 4.126 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนจากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ (1:1) ที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา

3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N_2 และไอน้ำ

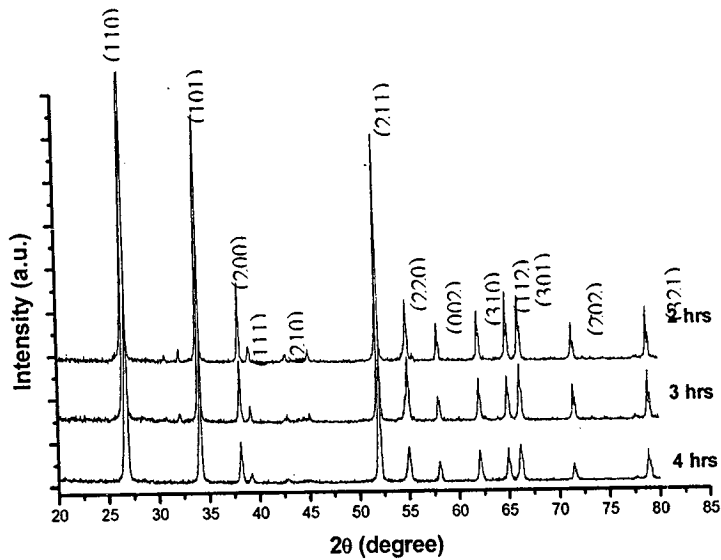


ภาพที่ 4.127 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ในอัตราส่วน 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N_2 และไอน้ำ

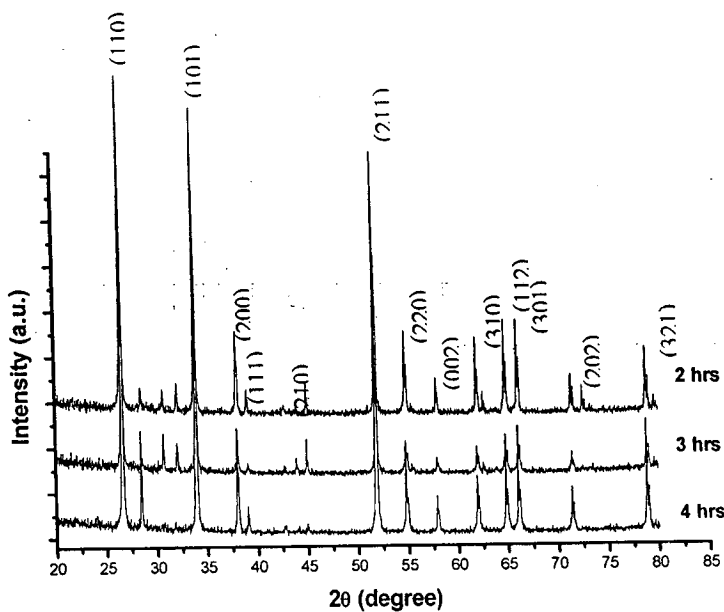


ภาพที่ 4.128 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนจากการ

เผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ในอัตราส่วน 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N₂ และไอน้ำ



ภาพที่ 4.129 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ในอัตราส่วน 2:1 ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N₂ และไอน้ำ

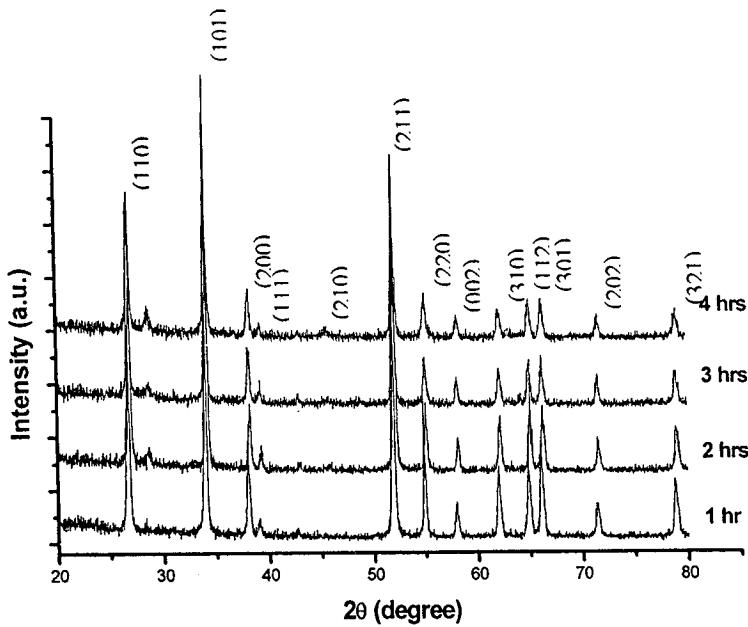


ภาพที่ 4.130 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซิลิกอนจากการเผาผงดีบุกผสมกับผงแกรไฟท์ ในอัตราส่วน 2:1 ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ N₂ และไอน้ำ

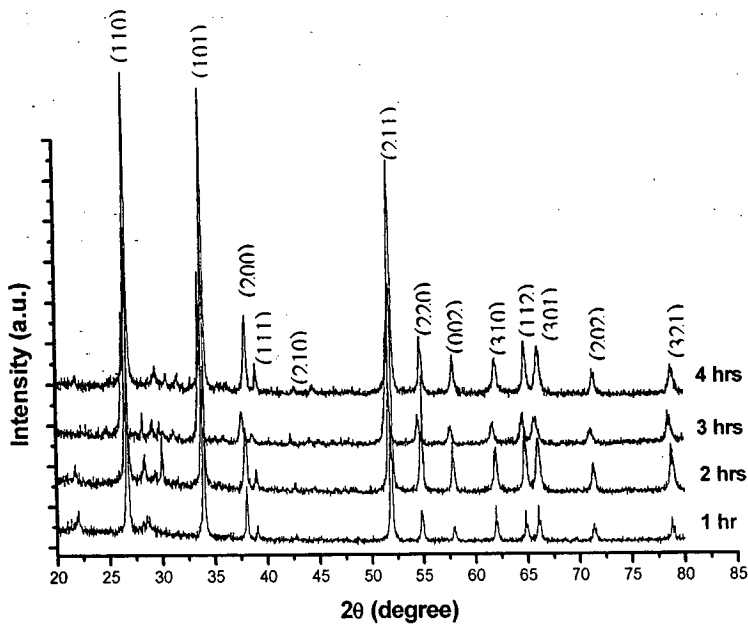
ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้แสดงดังภาพ ที่ 4.124 ถึง 4.129 พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนผงตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 700 °C ถึง 900 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน ในบรรยากาศไนโตรเจน และไอน้ำ จะมีเฟสของทินไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ตรงกับ JCPDS file No. 41-1445 แสดงโครงสร้างแบบ tetragonal ด้วยระนาบ (110), (101), (200), (111), (210), (211), (220), (022), (310), (112), (301), (202) และ (321) ตามลำดับ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 700 °C เวลา 3 ชั่วโมง จะเกิด peak ของซลิคอน อย่างเด่นชัด เนื่องจากมีผงตัวอย่างมาเกาะบนฐานรองซลิคอนน้อยมาก และยังพบ peak เล็ก ๆ ของซลิคอนออกไซด์เกิดขึ้นเมื่อเผาที่ 700 °C, 800 °C, 900 °C เนื่องจากฐานรองซลิคอนได้รับความร้อนสูง นอกจากนั้น เมื่อทำการศึกษานาโนของผลึกด้วยการคำนวณจากสมการ Scherrer ผลที่ได้ พบว่า เมื่อนำสารตัวอย่างอัตราส่วน 1:1 เผาที่อุณหภูมิ 700 °C, 800 °C และ 900 °C เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดของผลึกของสารตัวอย่างที่เตรียมได้บนผงตัวอย่างจะมีขนาดลดลง คือ 54.3, 49.1 และ 36.7 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 800 °C ใช้เวลาในการเผา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ของสารตัวอย่างอัตราส่วน 2:1 ขนาดของผลึกมีขนาดลดลงอย่างเด่นชัด คือ 40.0, 34.6 และ 29.0 นาโนเมตร บนผงวัสดุตัวอย่าง มีขนาด 58.8, 45.5 และ 41.9 นาโนเมตร บนฐานรองซลิคอน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ขนาดของผลึกนอกจากจะขึ้นกับอุณหภูมิแล้ว ยังขึ้นกับเวลาในการเตรียมอีกด้วย

4.4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้ในเตาสีเหลือง

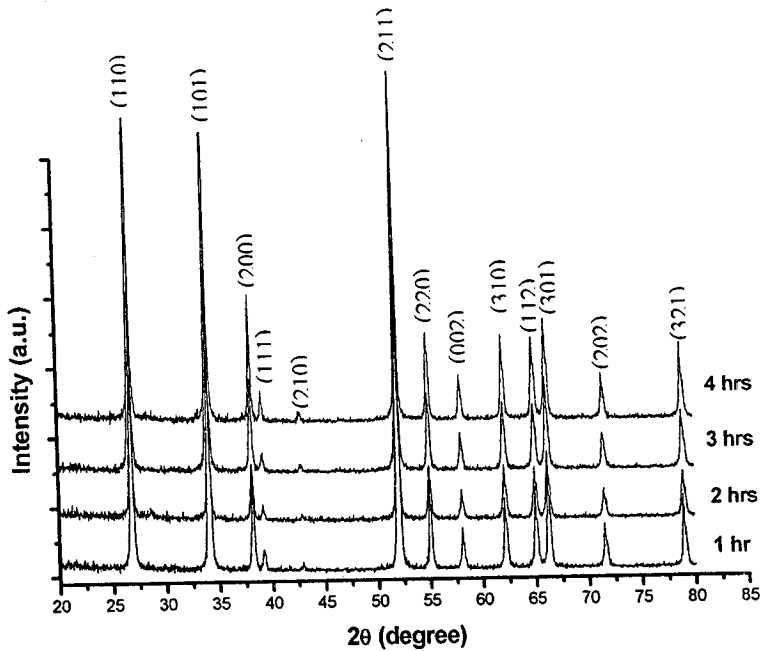
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้ในเตาสีเหลือง โดยใช้ผงทินไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลาด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ในบรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเวลาที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และองค์ประกอบ แสดงดังภาพที่ 4.130 ถึง 4.132



ภาพที่ 4.131 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงทินไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลา (1:1) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศ Ar



ภาพที่ 4.132 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้บนฐานรองซีลีคอน จากการเผาผงทินไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลา (1:1) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศ Ar

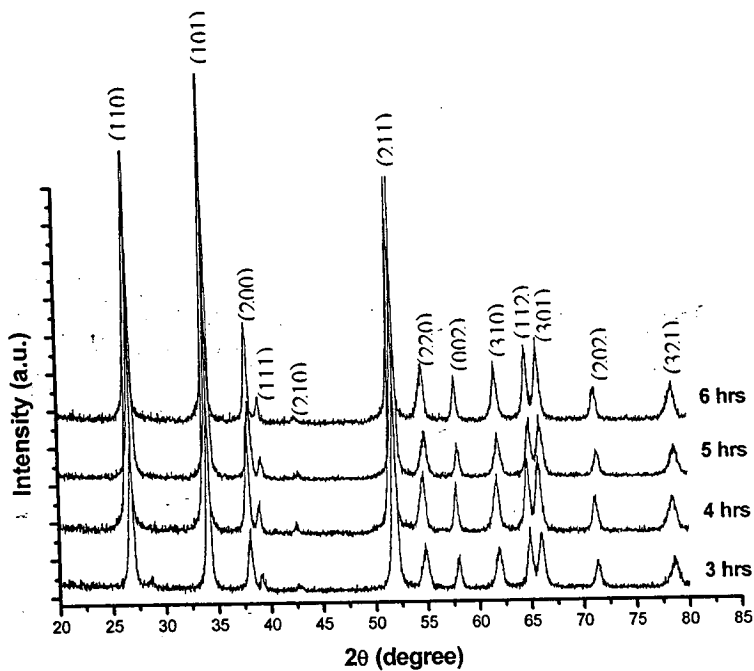


ภาพที่ 4.133 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผงทินไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกะลา (1:1) ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศ Ar

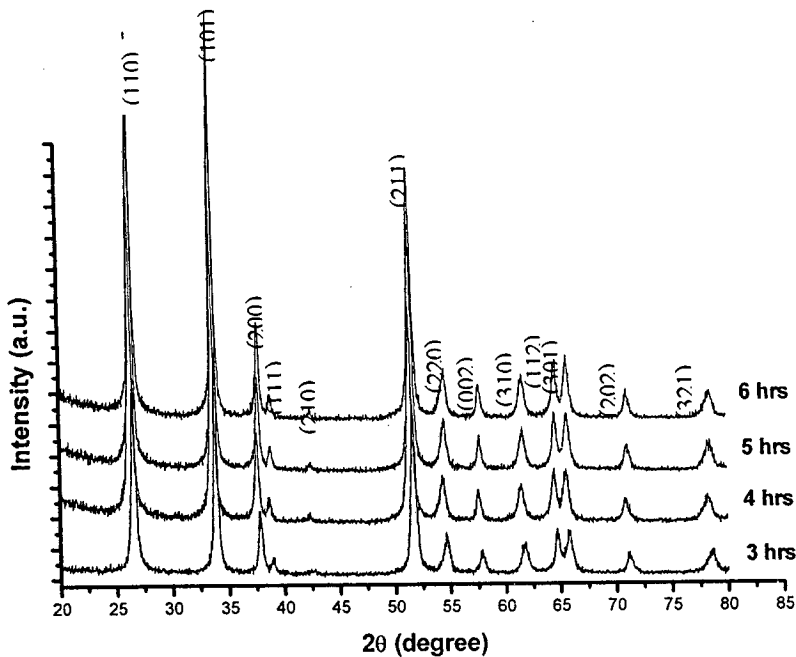
ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.130 ถึง 4.132 พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุตัวอย่างที่เตรียมได้บนผงตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 700 °C ถึง 900 °C เวลาต่าง ๆ ในบรรยากาศอาร์กอน จะมีเฟสของทินไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างเด่นชัด เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ตรงกับ JCPDS file No. 41-1445 แสดงโครงสร้างแบบ tetragonal ด้วยระนาบ (110), (101), (200), (111), (210), (211), (220), (022), (310), (112), (301), (202) และ (321) ตามลำดับ เมื่อนำฐานรองซิลิกอนมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเดียวกันพบว่า ที่อุณหภูมิ 700 °C จะสังเกตเห็น peak ของซิลิกอน เนื่องจากมีผงตัวอย่างมาเกาะบนฐานรองซิลิกอนน้อย และยังพบ peak เล็ก ๆ ของซิลิกอนออกไซด์ เนื่องจากฐานรองซิลิกอนได้รับความร้อนสูง นอกจากนั้น เมื่อทำการศึกษานาโนของผลึกด้วยการคำนวณจากสมการ Scherrer ผลที่ได้ พบว่า เมื่อนำสารตัวอย่างอัตราส่วน 1:1 เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ขนาดของผลึกของวัสดุตัวอย่างที่เตรียมได้บนผงตัวอย่างจะมีขนาดลดลง คือ 31.9, 31.6 และ 28.6 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบอีกว่า ที่อุณหภูมิ 800 °C ใช้เวลาในการเผา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ของสารตัวอย่างอัตราส่วน 1:1 ขนาดผลึก จะมีขนาดลดลงอย่างเด่นชัด คือ 34.3, 26.7 และ 23.7 นาโนเมตร บนฐานรองซิลิกอน ตามลำดับ ส่วนที่เงื่อนไขอื่นมีการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด จะเห็นได้ว่า ขนาดของผลึกที่ได้จากการเตรียมด้วยเงื่อนไขนี้ มีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 700 °C และ 800 °C และยิ่งขึ้นกับเวลาในการเตรียม อีกด้วย

4.4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้ในเตาอบ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้ในเตาอบ โดยใช้ผงคัลคินผสมกับผงกำมะถัน และผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ด้วยอัตราส่วน ต่าง ๆ เเผาที่อุณหภูมิ 400 °C ในบรรยากาศอากาศปกติ ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.133 ถึง 4.134



ภาพที่ 4.134 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผง Sn+S+NH₄Cl (1:1:1) ที่อุณหภูมิ 400 °C ด้วยเวลา 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.135 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่าง ที่เตรียมได้จากการเผาผง Sn+S+NH₄Cl (1:3:1.5) ที่อุณหภูมิ 400 °C ด้วยเวลา 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างที่เตรียมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.132 ถึง 4.135 พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 400 °C ที่เวลาต่างกัน อัตราส่วน ต่าง ๆ กัน ในบรรยากาศอากาศปกติ วัสดุตัวอย่างทั้งหมดมีเฟสของทินไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างเด่นชัด เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ตรงกับ JCPDS file No. 41-1445 แสดงโครงสร้างแบบ tetragonal ด้วยระนาบ (110), (101), (200), (111), (210), (211), (220), (002), (310), (112), (301), (202) และ (321) ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อทำการคำนวณหาขนาดของผลึก พบว่า เมื่อนำสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้เวลาในการเผา 3 ชั่วโมง ขนาดของผลึกมีแนวโน้มลดลง คือ 18.8, 17.3 และ 17.3 นาโนเมตร ที่อัตราส่วน 1:1:0.5, 1:1:1 และ 1:2:1 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าใช้เวลาในการเผา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเดียวกัน ขนาดของผลึก มีขนาดโตขึ้น คือ 19.0, 21.0 และ 21.2 นาโนเมตร ที่อัตราส่วน 1:1:1, 1:2:1 และ 1:3:1.5 ตามลำดับ ส่วนที่ เงื่อนไขอื่น ๆ ขนาดของผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และอัตราส่วนของสารตั้งต้น

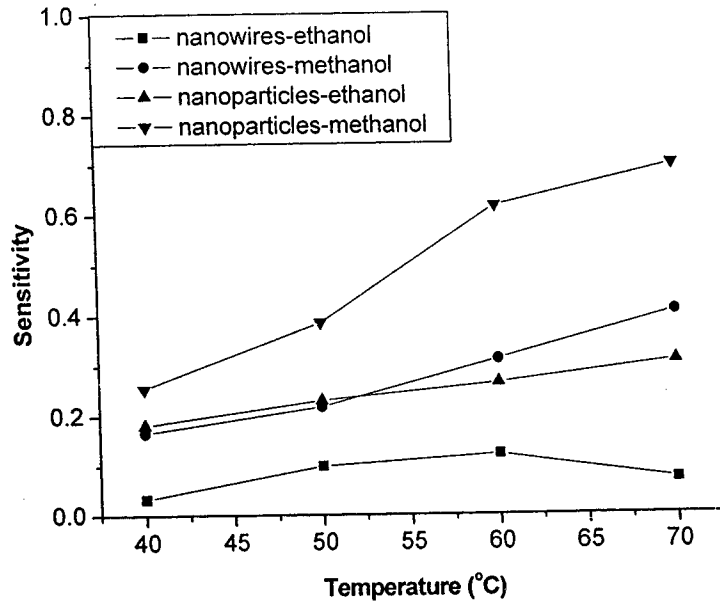
4.5 สมบัติการตอบสนองต่อแก๊สแอลกอฮอล์

เราพิจารณาพบว่าโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบเป็น nanowires และ nanoparticles จากวัสดุตัวอย่างที่เตรียมได้ที่ 800 °C ใช้เวลา ในการเผา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน ในเตาท่อควอทซ์ โดยใช้ผงดินบุกผสมกับผงถ่านกะลา ในอัตราส่วน 1:1 เป็นสารตั้งต้น มีความหนาแน่นสม่ำเสมอจึงนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) และทำการติดตั้งในระบบที่แสดงในภาพที่ 3.5 ทำการเพิ่มปริมาณแก๊สแอลกอฮอล์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิเอทานอล และเมทานอล ในช่วงอุณหภูมิ 40 °C, 50 °C, 60 °C และ 70 °C ด้วย heater เมื่อผิวหน้าของ sensor สัมผัสกับแก๊สแอลกอฮอล์จะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ (signal voltage) และคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สของ sensor แสดงดังตารางที่ 4.9 และกราฟในภาพที่ 4.135

ตารางที่ 4.9 ความไวต่อแก๊สเอทานอล และแก๊สเมทานอลของ nanowires และ nanoparticles ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้(1)

Temperatures (alcohol)	Sensitivity			
	Nanowires		Nanoparticles	
	Ethanol gas	Methanol gas	Ethanol gas	Methanol gas
40 °C	0.032	0.166	0.181	0.255
50 °C	0.099	0.218	0.230	0.385
60 °C	0.122	0.312	0.264	0.615
70 °C	0.071	0.406	0.307	0.697

จากข้อมูลที่ได้ในตาราง สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไว ในการตอบสนองต่อแก๊สแอลกอฮอล์กับอุณหภูมิของแอลกอฮอล์ ได้ดังภาพที่ 4.135



ภาพที่ 4.136 ความไวต่อ alcohol gas ของ nanowires และ nanoparticles ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้

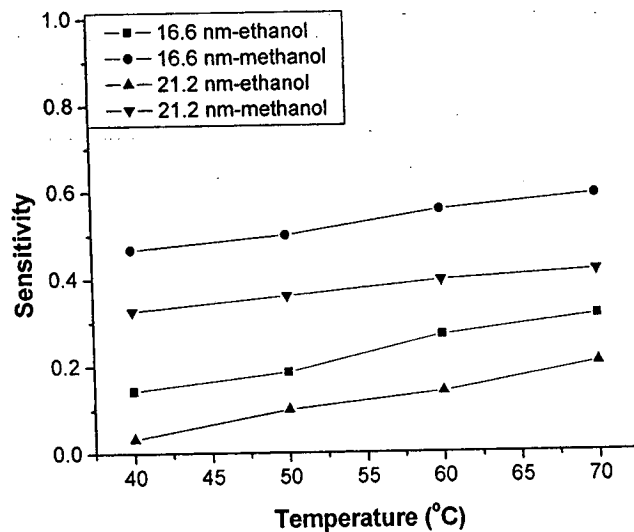
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในตาราง และกราฟ พบว่าทั้ง sensor ที่ทำด้วย nanoparticles และ nanowires มีการตอบสนองต่อ methanol gas และ ethanol gas และจะให้ค่า sensitivity สูงต่อ methanol gas และยังพบอีกว่า sensor ที่ทำด้วย nanoparticles จะให้ค่า sensitivity สูงกว่า nanowires ไม่ว่าจะอยู่ในบรรยากาศของ methanol gas หรือ ethanol gas เนื่องจากบนผิวของ sensor ที่ทำด้วย nanoparticles มีการกระจายตัว และหนาแน่นกว่า sensor ที่ทำขึ้นด้วย nanowires จึงมีผลต่อการกระจายตัวของโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของ SnO_2 และทำให้เกิด interaction ต่อกันระหว่างพื้นผิว SnO_2 และโมเลกุลของแก๊สได้มากกว่า จึงทำให้เกิดสัญญาณที่สูงกว่า nanowires นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ค่า sensitivity ต่อ methanol gas ของ nanowires มีแนวโน้มสูงกว่า ethanol gas อาจเป็นไปได้ว่า methanol มีจุดเดือด ต่ำกว่า ethanol เมื่อได้รับความร้อน อัตราการระเหยของ methanol จะมากกว่า จึงทำให้มีปริมาณของ methanol เข้าไปในระบบปริมาณที่มากกว่า ethanol ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาป้อนอากาศเท่า ๆ กันก็ตาม และทำให้ได้สัญญาณที่เกิดจาก methanol gas สูงกว่า ethanol gas

เมื่อนำผงอนุภาคของผลิตภัณฑ์ จากวัสดุตัวอย่างที่เตรียมได้จากการเผาผง $\text{Sn+S+NH}_4\text{Cl}$ อัตราส่วน 1:1:1 ที่อุณหภูมิ 400 °C นาน 5 ชั่วโมง และอัตราส่วน 1:3:1.5 ที่อุณหภูมิ 400 °C นาน 4 ชั่วโมง ในเตาอบ มาทำเป็น sensor ทำการติดตั้งในระบบ และทำการทดสอบ ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อผิวหน้าของ sensor สัมผัสกับ alcohol gas จะมีการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ และนำไปคำนวณหาค่า sensitivity แสดงดังตารางที่ 4.10 และกราฟ ในภาพที่ 4.136

ตารางที่ 4.10 ความไวต่อแก๊สเอทานอล และแก๊สเมทานอลของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่เตรียมได้(2)

Temperatures (alcohol)	Sensitivity			
	Crystallite size 16.6 nm (E07)		Crystallite size 21.2 nm(E14)	
	Ethanol gas	Methanol gas	Ethanol gas	Methanol gas
40 °C	0.144	0.467	0.033	0.327
50 °C	0.186	0.499	0.100	0.360
60 °C	0.269	0.556	0.140	0.395
70 °C	0.313	0.589	0.205	0.416

จากตาราง สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า sensitivity ของการตอบสนองต่อ alcohol gas กับอุณหภูมิของ alcohol ได้ดังภาพที่ 4.154



ภาพที่ 4.137 ความไวต่อ alcohol gas ของตัวอย่าง (16.6 nm) และ (21.2 nm)

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในตาราง และกราฟพบว่าค่า sensitivity มีแนวโน้มสูงขึ้นทั้งในบรรยากาศของ methanol gas และ ethanol gas และยิ่งพบอีกว่า sensor ที่ทำด้วย nanoparticles ที่มีขนาดผลึก เล็กกว่า จะมีค่า sensitivity สูงกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของโมเลกุลของแก๊สมากกว่า เป็นผลทำให้เกิดสัญญาณที่สูงกว่า ทั้งนี้การทดสอบการตอบสนองต่อ alcohol gas ของ sensor ที่ทำด้วยทินไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ยังทำให้ได้ค่า sensitivity ที่ต่ำกว่าการศึกษาที่อุณหภูมิสูง

4.6 ผลการสังเคราะห์วัสดุผสม SnO₂ และ CuO

เราทำการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนของวัสดุผสมทินไดออกไซด์/คอปเปอร์ออกไซด์ 6 การทดลอง โดยเตรียมจาก 2 กระบวนการ

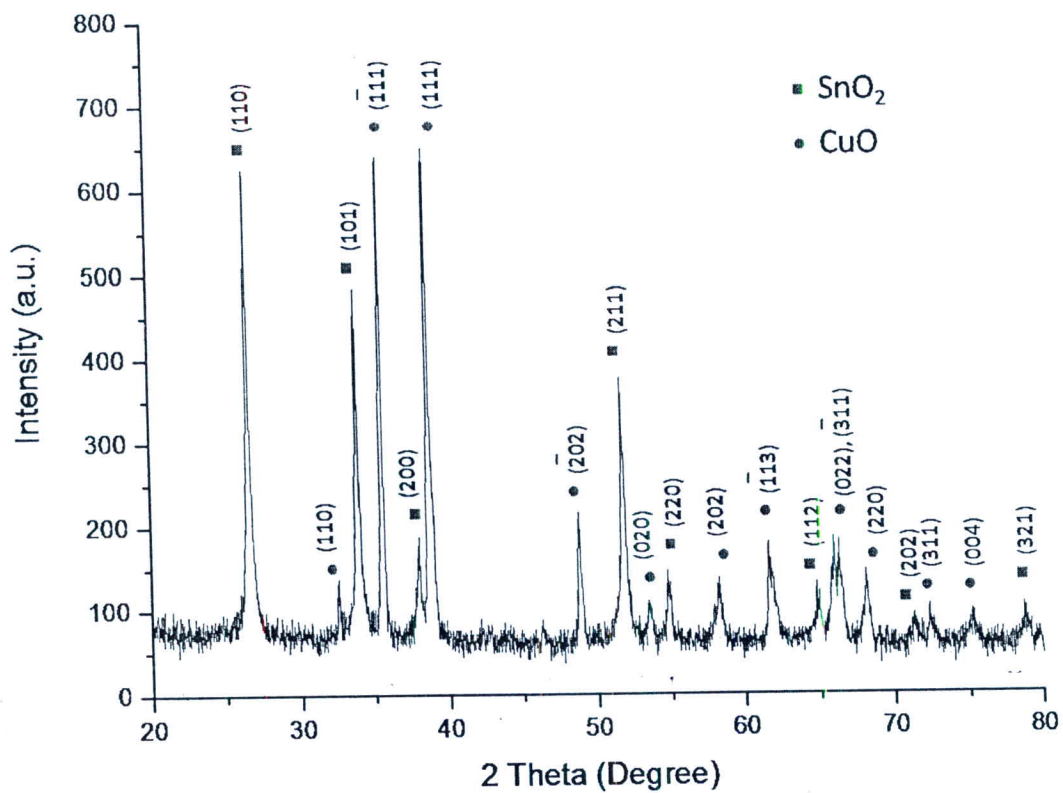
กระบวนการที่ 1 โดยการผสมคอปเปอร์ออกไซด์โครงสร้างนาโน ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (thermal decomposition) ของสารตั้งต้น CuC₂O₄ ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีของ copper acetate 4 g (Cu(CH₃COO)₂·H₂O) + 5g oxalic acid (H₂C₂O₄·2H₂O), + 10 ml ether นำไปอบที่ 60 °C 6 ชั่วโมง แล้วทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและอบให้แห้ง 70-80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาพร้อมกับ NaCl 8 กรัม ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นลง จะได้โครงสร้างของ CuO nanoparticles จากนั้นนำไปผสมกับผง SnO ในอัตราส่วนที่เท่ากัน จากนั้นใส่ลงในบีกเกอร์เติมน้ำกลั่นผสม NH₃·H₂O ชั่วโมง โดยวัดค่า pH ประมาณ 8-9 ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล อบให้แห้งที่ 105 °C 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศปกติ ทิ้งให้เย็นลงตามธรรมชาติจะสังเคราะห์ได้โครงสร้างนาโนของวัสดุผสมทินไดออกไซด์/คอปเปอร์ออกไซด์ นำไปศึกษาวิเคราะห์ด้วย SEM, XRD และการตอบสนองต่อแก๊ส

กระบวนการที่ 2 โดยการผสมผงดีบุก (Sn) และผงทองแดง (Cu) ในอัตราส่วนที่เท่ากัน จากนั้นใส่ลงในบีกเกอร์เติมน้ำกลั่นผสม NH₃·H₂O โดยวัดค่า pH ประมาณ 8-9 ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล อบให้แห้งที่ 105 °C 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศปกติ ทิ้งให้เย็นลงตามธรรมชาติจะสังเคราะห์ได้โครงสร้างนาโนของวัสดุผสมทินไดออกไซด์/คอปเปอร์ออกไซด์ นำไปศึกษาวิเคราะห์ด้วย SEM, XRD และการตอบสนองต่อแก๊ส

ตารางที่ 4.11 แสดงการทดลองการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนของวัสดุผสม
ทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์

การทดลองที่	ชื่อสาร	อัตราส่วน	อุณหภูมิ(°C)	เวลา(hr.)	บรรยากาศ
1	Sn+Cu	1:1	600	2	ปกติ
2	SnO+CuO nanoparticle	1:1	600	3	ปกติ
3	SnO+ CuO nanoparticle	1:1	900	24	ปกติ
4	Sn+Cu	1:1	700	2	ปกติ
5	Sn+Cu	1:0.1	700	2	ปกติ
6	Sn+CuO	1:0.1	700	2	ปกติ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผสมทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของการทดลองที่ 1



ภาพที่ 4.138 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.12 บันทึกผลการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล (Ethanol) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 1
($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	1.992	2.046	2.019	7.981	2.019	3.952947	2.500	1.581179
10	2.070	2.091	2.081	7.9195	2.081	3.806537	2.500	1.522615
15	2.119	2.153	2.136	7.864	2.136	3.681648	2.500	1.472659
20	2.135	2.218	2.177	7.8235	2.177	3.594533	2.500	1.437813
25	2.159	2.251	2.205	7.795	2.205	3.535147	2.500	1.414059
30	2.174	2.283	2.229	7.7715	2.229	3.487323	2.500	1.394929
35	2.191	2.295	2.243	7.757	2.243	3.458315	2.500	1.383326

ตารางที่ 4.13 บันทึกผลการตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการ
ทดลองที่ 1 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

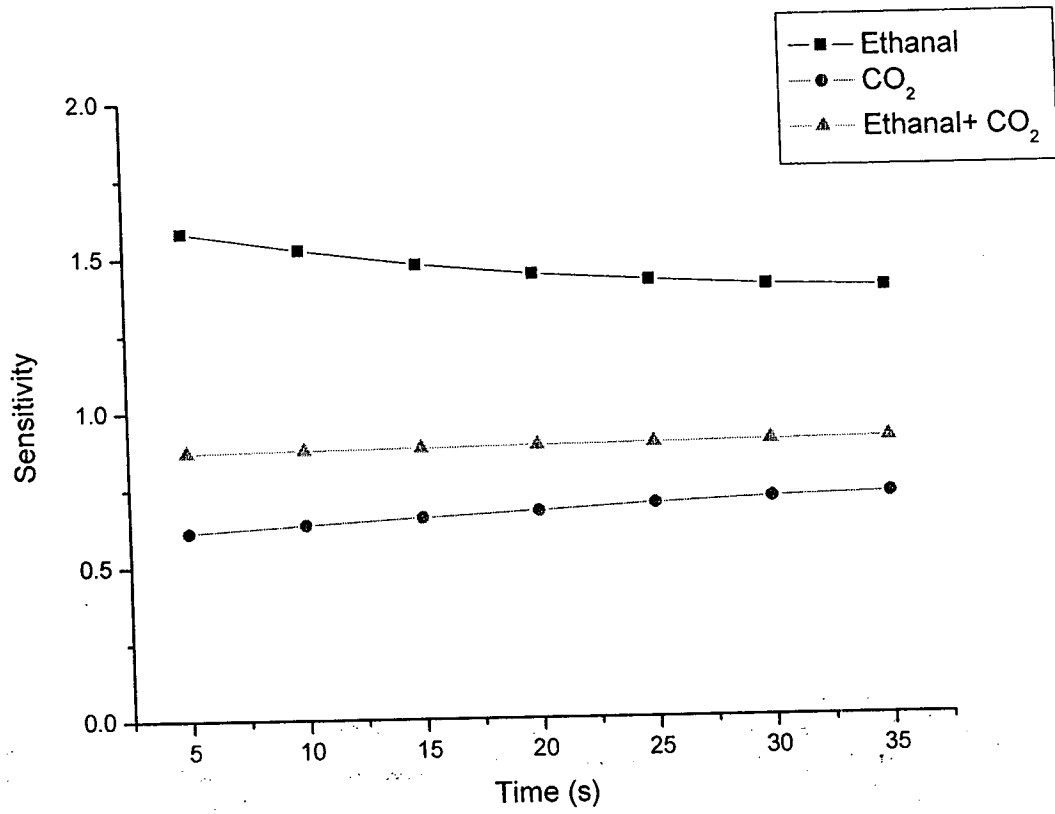
เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	1.515	2.098	1.807	8.194	1.807	4.536	7.415	0.612
10	1.481	2.024	1.753	8.248	1.753	4.706	7.415	0.635
15	1.444	1.970	1.707	8.293	1.707	4.858	7.415	0.655
20	1.411	1.927	1.669	8.331	1.669	4.992	7.415	0.673
25	1.388	1.868	1.628	8.372	1.628	5.143	7.415	0.694
30	1.365	1.831	1.598	8.402	1.598	5.258	7.415	0.709
35	1.345	1.815	1.580	8.420	1.580	5.329	7.415	0.719

ตารางที่ 4.14 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และแก๊สเอทานอล (Ethanal) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 1

(V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

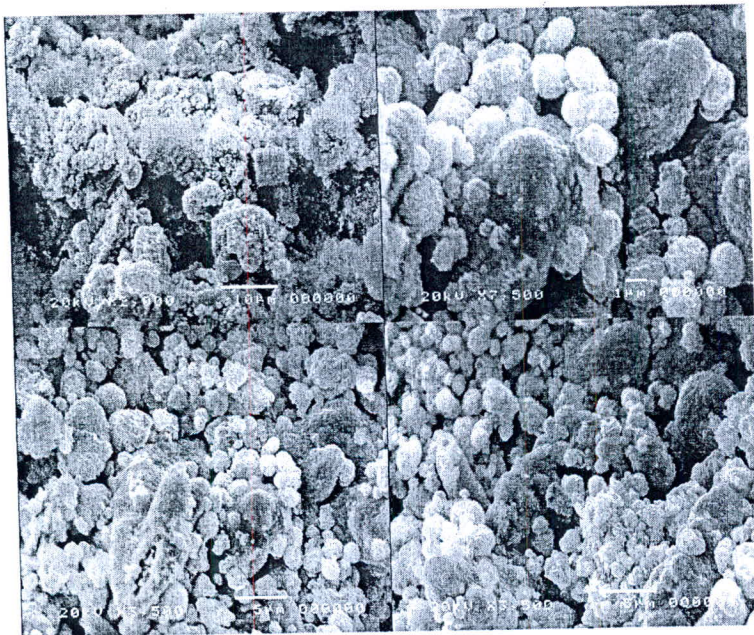
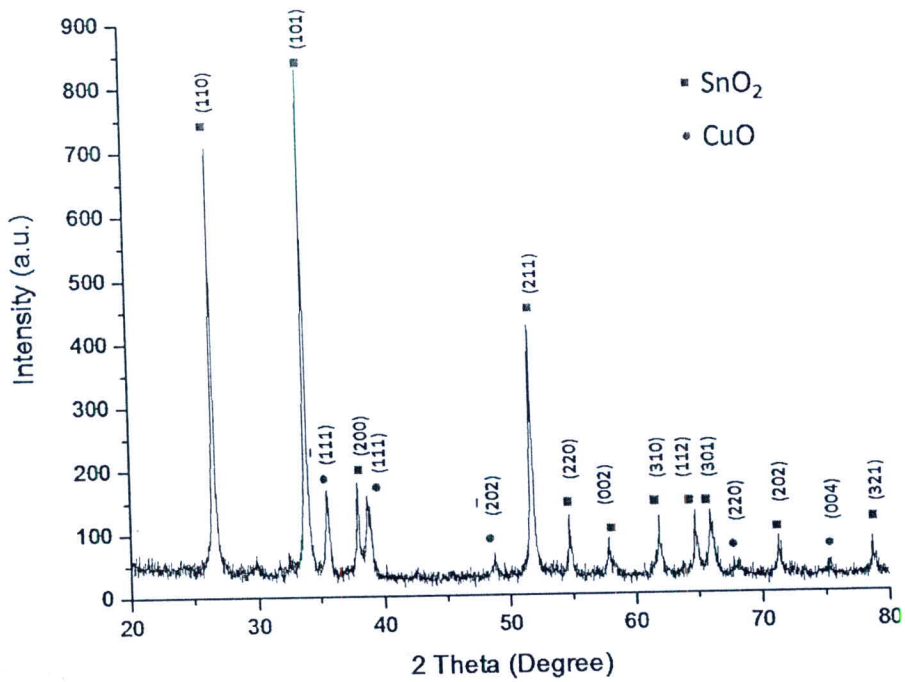
เวลา (s.)	V _{L1} (Volt)	V _{L2} (Volt)	V _{Lav} (Volt)	V _s (Volt)	I(μA)	R _{sensor} (M Ω)	R _{air} (M Ω)	Sensitivity
5	1.798	1.577	1.688	8.3125	1.688	4.926	5.66	0.870
10	1.791	1.569	1.680	8.32	1.680	4.952	5.66	0.875
15	1.782	1.561	1.672	8.3285	1.672	4.983	5.66	0.880
20	1.776	1.554	1.665	8.335	1.665	5.006	5.66	0.884
25	1.767	1.549	1.658	8.342	1.658	5.031	5.66	0.889
30	1.762	1.54	1.651	8.349	1.651	5.057	5.66	0.893
35	1.755	1.535	1.645	8.355	1.645	5.079	5.66	0.897

จากตารางที่ 4.12-4.14 เรานำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สแสดงดังภาพที่ 4.139



ภาพที่ 4.139 กราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สของวัสดุผสมเตรียมจากการทดลองที่ 1

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผสมทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของการทดลองที่ 2



ภาพที่ 4.140 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.15 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สเอทานอล (Ethanol) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 2 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{\text{load}} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	9.120	7.800	8.460	1.540	8.460	0.182	0.140	1.30
10	9.080	7.770	8.425	1.575	8.425	0.187	0.140	1.335
15	9.030	7.730	8.380	1.620	8.380	0.193	0.140	1.381
20	9.000	7.700	8.350	1.650	8.350	0.198	0.140	1.411
25	8.940	7.660	8.300	1.700	8.300	0.205	0.140	1.463
30	8.890	7.630	8.260	1.740	8.260	0.210	0.140	1.505
35	8.830	7.600	8.215	1.785	8.215	0.217	0.140	1.552

ตารางที่ 4.16 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 2 (V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

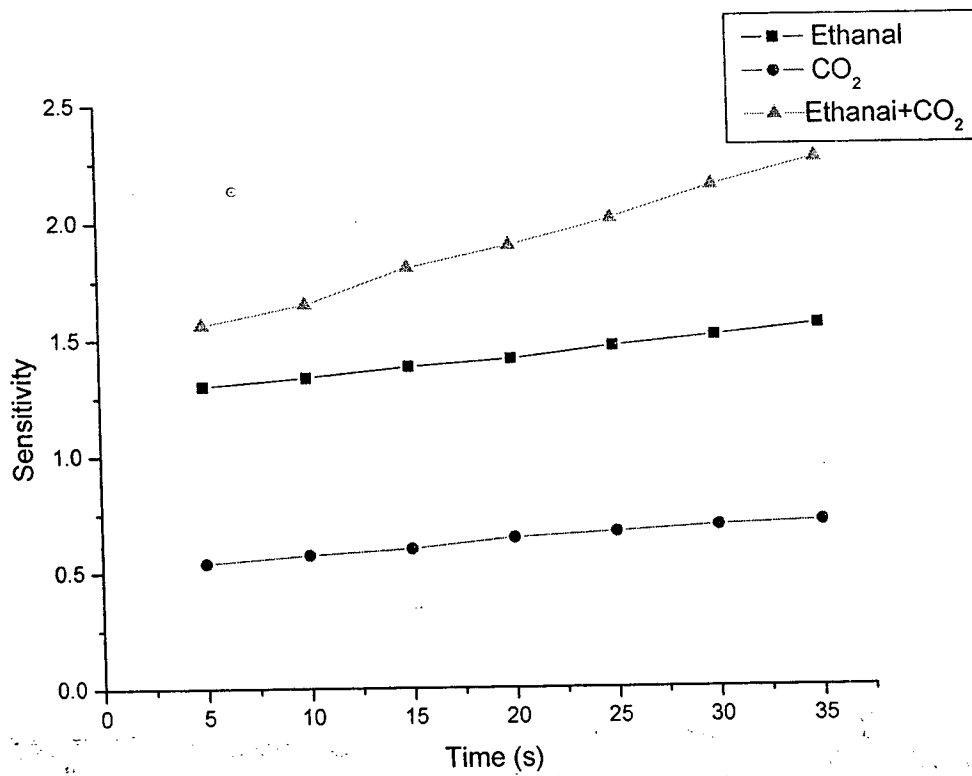
เวลา (s.)	V _{L1} (V.)	V _{L2} (V.)	V _{Lav} (V.)	V _s (V.)	I(μA)	R _{sensor} (MΩ)	R _{air} (MΩ)	Sensitivity
5	8.150	7.820	7.985	2.015	7.985	0.252	0.468	0.539
10	8.120	7.650	7.885	2.115	7.885	0.268	0.468	0.573
15	8.090	7.530	7.810	2.190	7.810	0.280	0.468	0.599
20	7.970	7.400	7.685	2.315	7.685	0.301	0.468	0.644
25	7.900	7.350	7.625	2.375	7.625	0.311	0.468	0.666
30	7.850	7.260	7.555	2.445	7.555	0.324	0.468	0.691
35	7.810	7.220	7.515	2.485	7.515	0.331	0.468	0.707

ตารางที่ 4.17 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และแก๊สเอทานอล (Ethanal) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 2

(V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

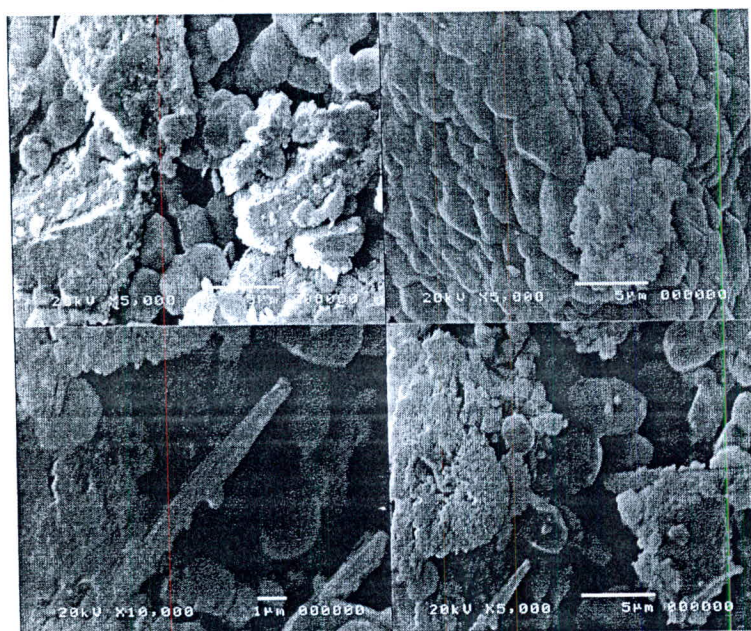
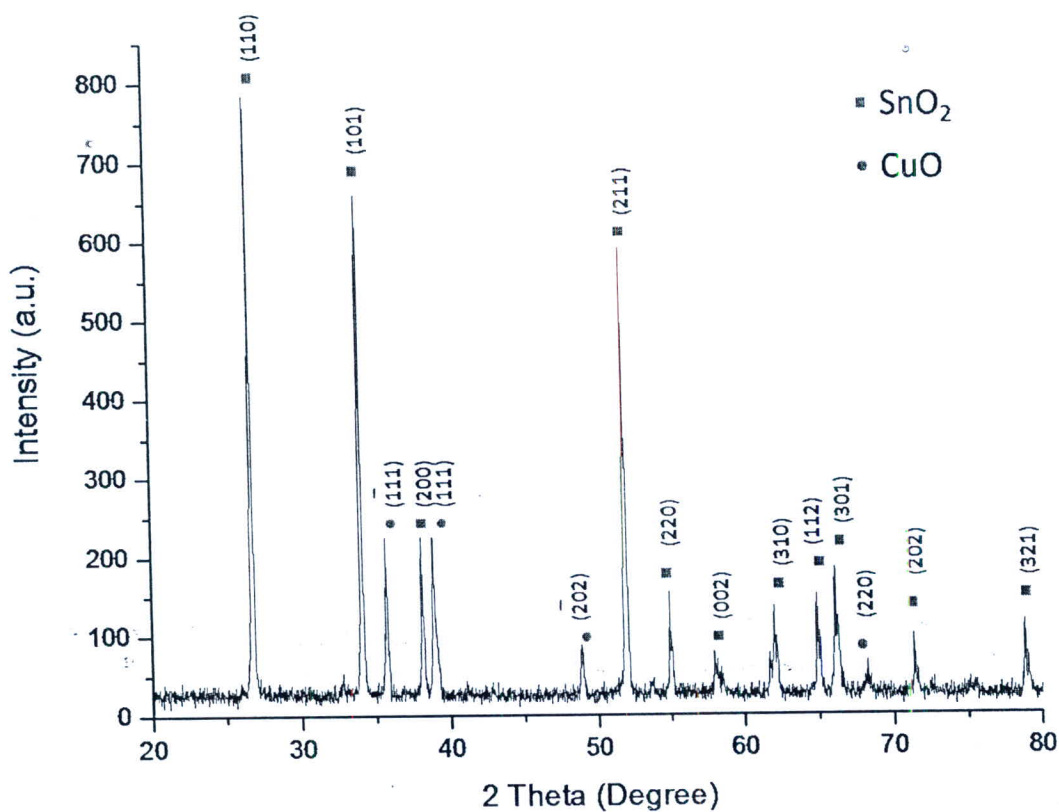
เวลา (s.)	V _{L1} (V.)	V _{L2} (V.)	V _{Lav} (V.)	V _s (V.)	I(μA)	R _{sensor} (MΩ)	R _{air} (MΩ)	Sensitivity
5	6.590	7.000	6.795	3.205	6.795	0.471	0.302	1.562
10	6.430	6.920	6.675	3.325	6.675	0.498	0.302	1.649
15	6.210	6.740	6.475	3.525	6.475	0.544	0.302	1.803
20	6.110	6.610	6.360	3.640	6.360	0.572	0.302	1.895
25	5.950	6.500	6.225	3.775	6.225	0.606	0.302	2.008
30	5.760	6.380	6.070	3.930	6.070	0.647	0.302	2.144
35	5.640	6.260	5.950	4.050	5.950	0.681	0.302	2.254

จากตารางที่ 4.15-4.17 เรานำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊ส แสดงดังภาพที่ 4.141



ภาพที่ 4.141 กราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สของวัสดุผสมเตรียมจากการทดลองที่ 2

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผสมทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของการทดลองที่ 3



ภาพที่ 4.142 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 3

ตารางที่ 4.18 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สเอทานอล (Ethanol) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 3 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	0.510	0.575	0.542	9.458	0.543	17.433	20.44	0.853
10	0.521	0.587	0.554	9.446	0.554	17.050	20.44	0.834
15	0.538	0.599	0.569	9.432	0.569	16.590	20.44	0.812
20	0.540	0.609	0.575	9.426	0.575	16.406	20.44	0.803
25	0.542	0.612	0.577	9.423	0.577	16.331	20.44	0.799
30	0.564	0.618	0.591	9.409	0.591	15.920	20.44	0.779
35	0.656	0.623	0.640	9.361	0.640	14.637	20.44	0.716

ตารางที่ 4.19 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 3 (V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

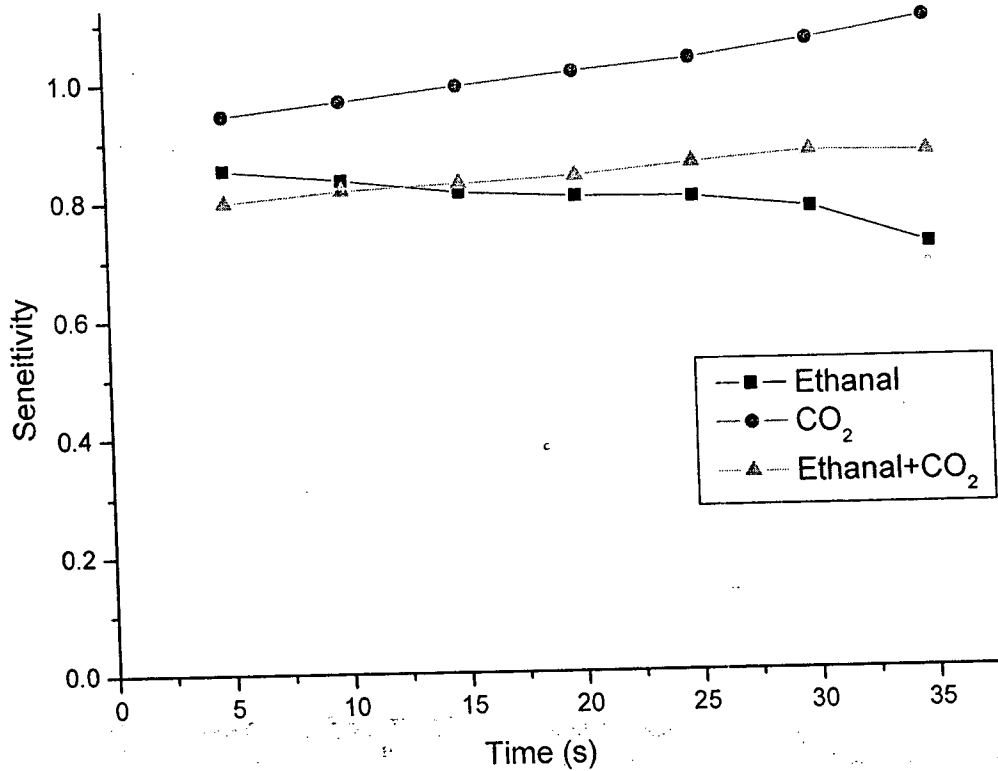
เวลา (s.)	V _{L1} (V.)	V _{L2} (V.)	V _{Lav} (V.)	V _s (V.)	I(μA)	R _{sensor} (MΩ)	R _{air} (MΩ)	Sensitivity
5	0.511	0.563	0.537	9.463	0.537	17.622	18.65	0.945
10	0.507	0.543	0.525	9.475	0.525	18.048	18.65	0.968
15	0.501	0.525	0.513	9.487	0.513	18.493	18.65	0.992
20	0.494	0.511	0.503	9.498	0.503	18.901	18.65	1.013
25	0.486	0.501	0.494	9.507	0.494	19.263	18.65	1.033
30	0.472	0.489	0.481	9.520	0.481	19.812	18.65	1.062
35	0.464	0.468	0.466	9.534	0.466	20.459	18.65	1.097

ตารางที่ 4.20 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และแก๊สเอทานอล (Ethanal) ของวัสดุผสมจากการทดลองที่ 3

(V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

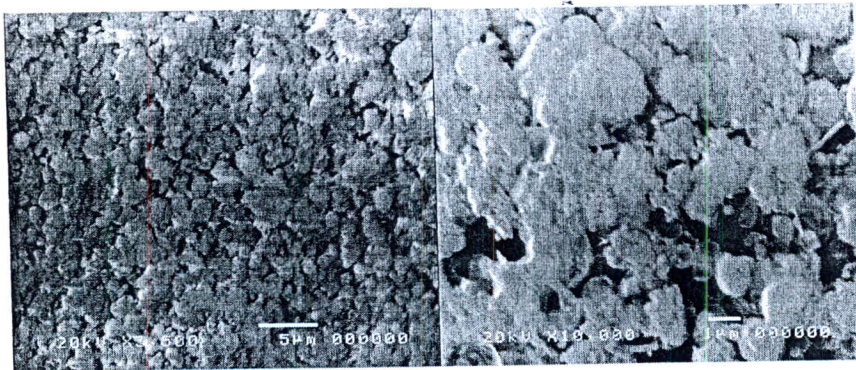
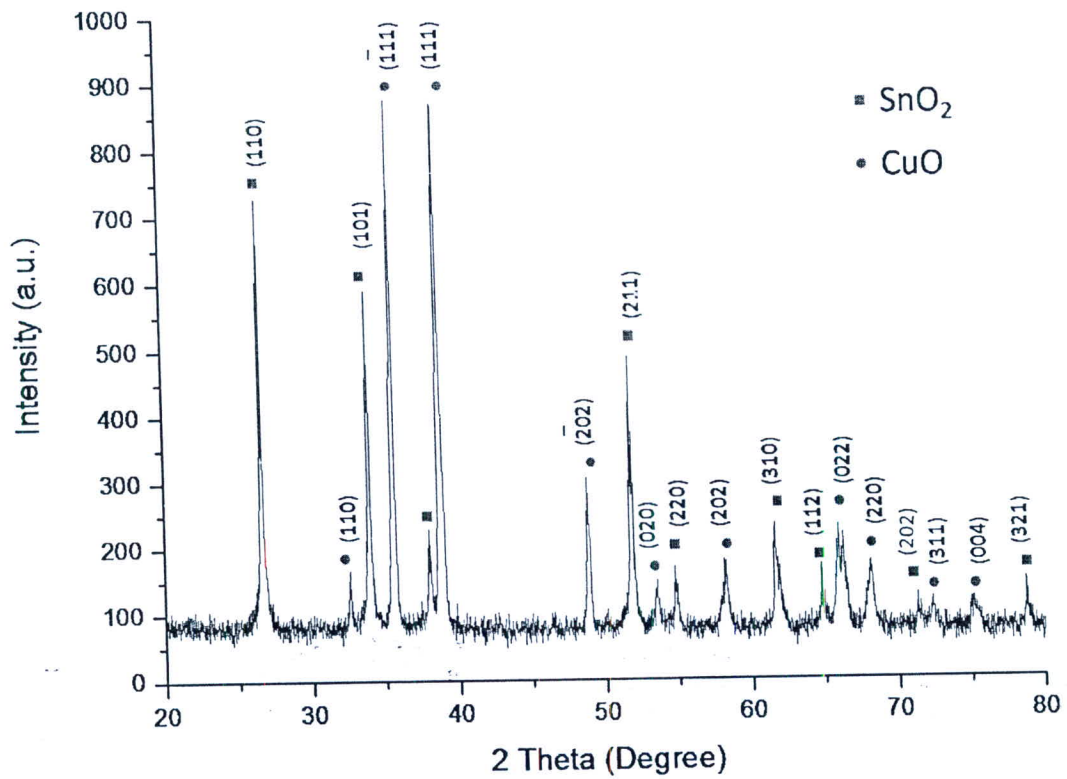
เวลา (s.)	V _{L1} (V.)	V _{L2} (V.)	V _{Lav} (V.)	V _s (V.)	I(μA)	R _{sensor} (MΩ)	R _{air} (MΩ)	Sensitivity
5	0.423	0.498	0.461	9.540	0.461	20.716	25.95	0.798
10	0.416	0.485	0.451	9.550	0.451	21.198	25.95	0.817
15	0.409	0.481	0.445	9.555	0.445	21.472	25.95	0.827
20	0.404	0.476	0.440	9.560	0.440	21.728	25.95	0.837
25	0.393	0.468	0.431	9.570	0.431	22.229	25.95	0.857
30	0.383	0.462	0.423	9.578	0.423	22.669	25.95	0.873
35	0.380	0.468	0.424	9.576	0.424	22.585	25.95	0.870

จากตารางที่ 4.18-4.20 เรานำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงการตอบสนอง (Sensitivity) ต่อแก๊สแสดงดังภาพที่ 4.143



ภาพที่ 4.143 กราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สของวัสดุผสมเตรียมจากการทดลองที่ 3

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผสมทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของการทดลองที่ 4



ภาพที่ 4.144 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 4

ตารางที่ 4.21 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สเอทานอล (Ethanal) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 4 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	2.576	2.075	2.326	7.6745	2.326	3.300151	7.15	0.46156
10	2.616	2.087	2.352	7.6485	2.352	3.252605	7.15	0.45491
15	2.682	2.101	2.391	7.6085	2.391	3.181476	7.15	0.444962
20	2.726	2.107	2.417	7.5835	2.417	3.138216	7.15	0.438911
25	2.738	2.112	2.425	7.575	2.425	3.123711	7.15	0.436883
30	2.758	2.125	2.442	7.5585	2.442	3.095843	7.15	0.432985
35	2.788	2.129	2.459	7.5415	2.459	3.067521	7.15	0.429024

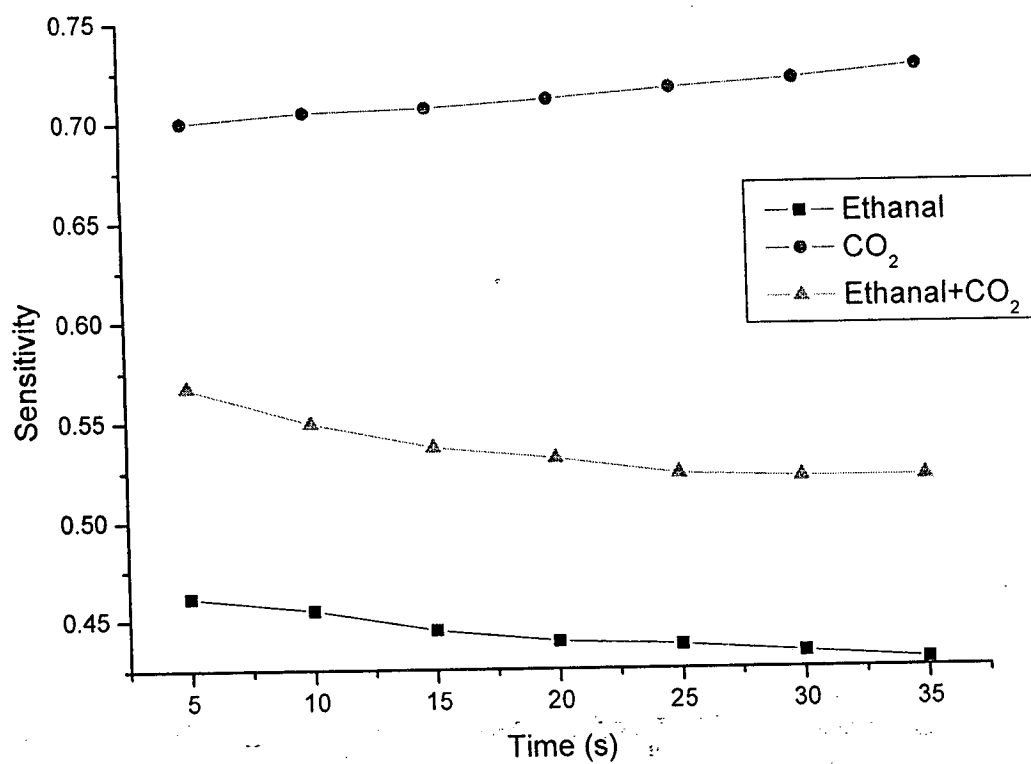
ตารางที่ 4.22 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 4 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	1.604	0.998	1.301	8.699	1.301	6.686	9.54	0.700
10	1.598	0.991	1.295	8.706	1.295	6.725	9.54	0.705
15	1.593	0.989	1.291	8.709	1.291	6.746	9.54	0.707
20	1.588	0.980	1.284	8.716	1.284	6.788	9.54	0.711
25	1.581	0.972	1.277	8.724	1.277	6.833	9.54	0.716
30	1.573	0.968	1.271	8.730	1.271	6.871	9.54	0.720
35	1.563	0.961	1.262	8.738	1.262	6.924	9.54	0.726

ตารางที่ 4.23 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และแก๊สเอทานอล (Ethanal) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 4 (V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

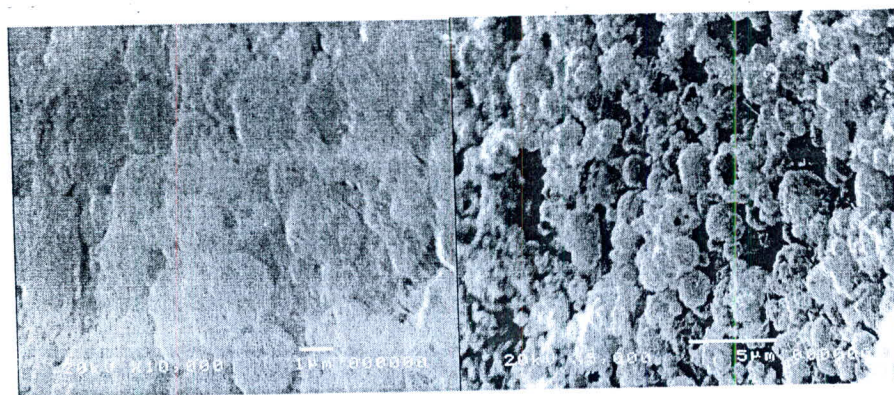
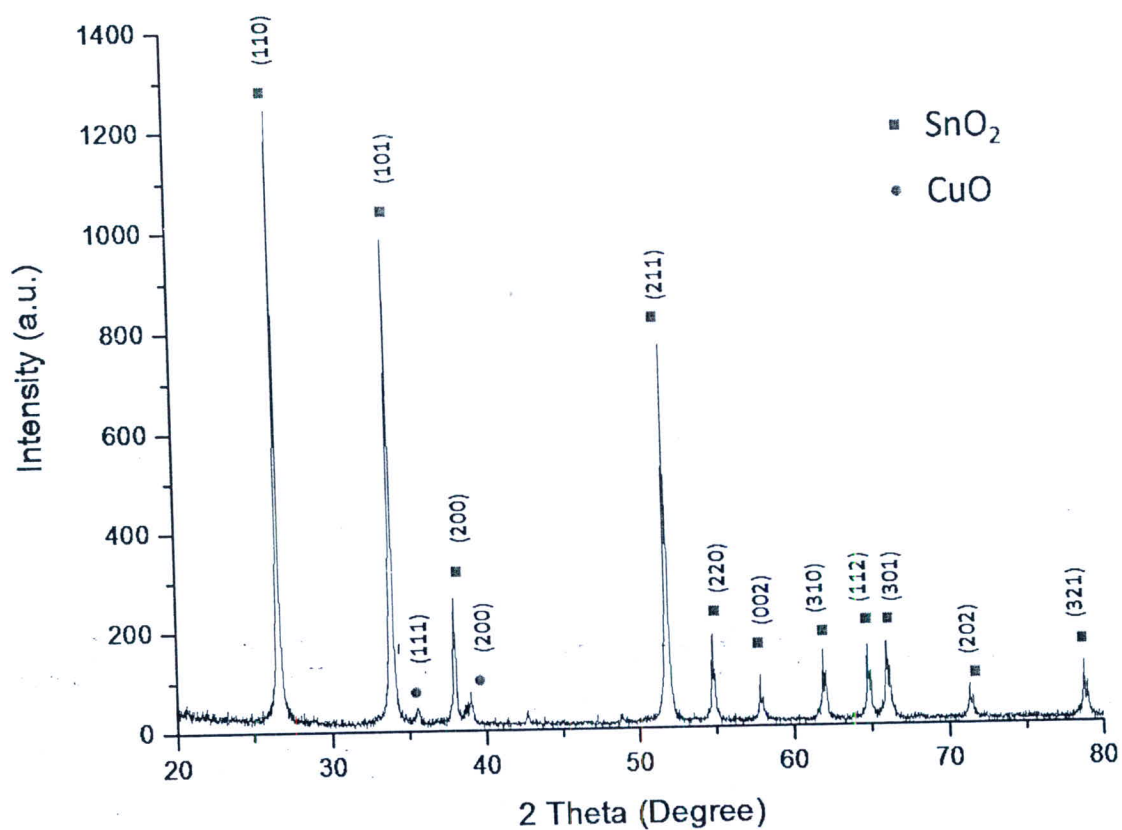
เวลา (s.)	V _{L1} (V.)	V _{L2} (V.)	V _{Lav} (V.)	V _s (V.)	I(μA)	R _{sensor} (MΩ)	R _{air} (MΩ)	Sensitivity
5	1.231	1.063	1.147	8.853	1.147	7.718	13.61	0.567
10	1.255	1.104	1.180	8.821	1.180	7.478	13.61	0.549
15	1.279	1.103	1.205	8.796	1.205	7.302	13.61	0.537
20	1.299	1.134	1.217	8.784	1.217	7.220	13.61	0.531
25	1.320	1.142	1.231	8.769	1.231	7.123	13.61	0.523
30	1.326	1.145	1.236	8.765	1.236	7.094	13.61	0.521
35	1.328	1.145	1.237	8.764	1.237	7.087	13.61	0.521

จากตารางที่ 4.21-4.23 เรานำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สแสดงดังภาพที่ 4.145



ภาพที่ 4.145 กราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สของวัสดุผสมเตรียมจากการทดลองที่ 4

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผสมทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของการทดลองที่ 5



ภาพที่ 4.146 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 5

ตารางที่ 4.24 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สเอทานอล (Ethanol) ของวัสดุผสมจากการทดลองที่ 5 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	1.026	0.582	0.804	9.196	0.804	11.438	9.50	1.204
10	1.084	0.603	0.844	9.157	0.844	10.855	9.50	1.145
15	1.127	0.618	0.873	9.128	0.873	10.461	9.50	1.101
20	1.155	0.622	0.889	9.112	0.886	10.255	9.50	1.079
25	1.166	0.628	0.897	9.103	0.897	10.148	9.50	1.068
30	1.169	0.625	0.897	9.103	0.897	10.148	9.50	1.068
35	1.175	0.623	0.899	9.101	0.899	10.123	9.50	1.066

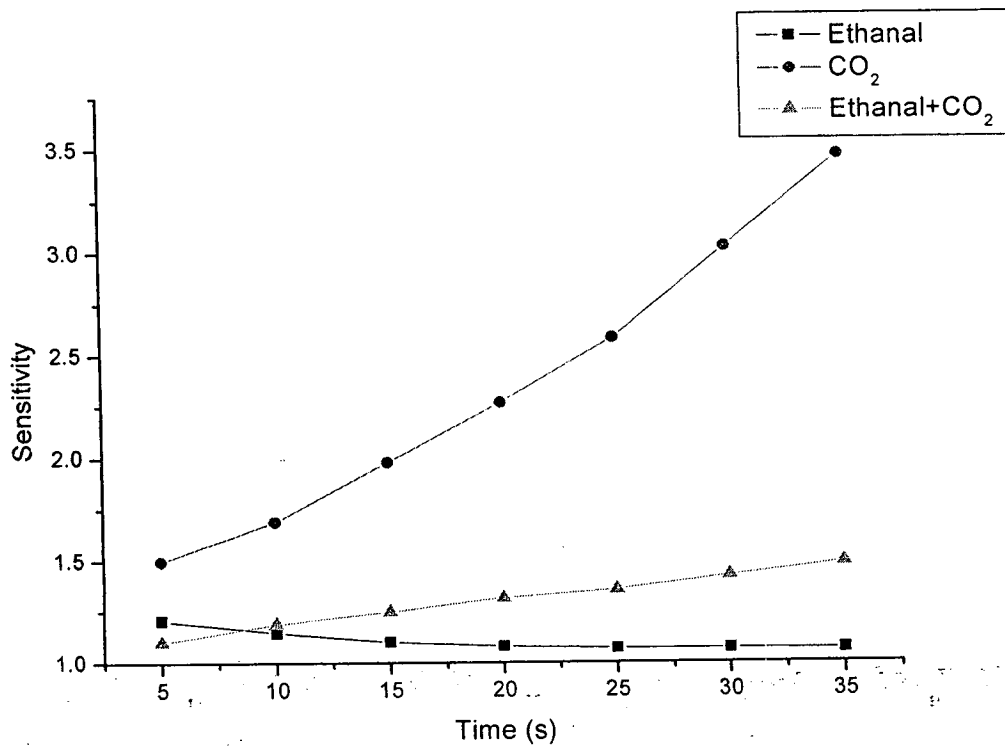
ตารางที่ 4.25 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของวัสดุผสมจากการทดลองที่ 5 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	0.333	0.380	0.357	9.644	0.357	27.050	18.10	1.495
10	0.314	0.320	0.317	9.683	0.317	30.546	18.10	1.688
15	0.288	0.255	0.272	9.729	0.272	35.832	18.10	1.979
20	0.266	0.210	0.238	9.762	0.238	41.017	18.10	2.266
25	0.244	0.175	0.210	9.791	0.210	46.732	18.10	2.582
30	0.211	0.148	0.180	9.821	0.180	54.710	18.10	3.023
35	0.190	0.124	0.157	9.843	0.157	62.694	18.10	3.464

ตารางที่ 4.26 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และแก๊สเอทานอล (Ethanol) ของวัสดุผสมจากการทดลองที่ 5 (V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

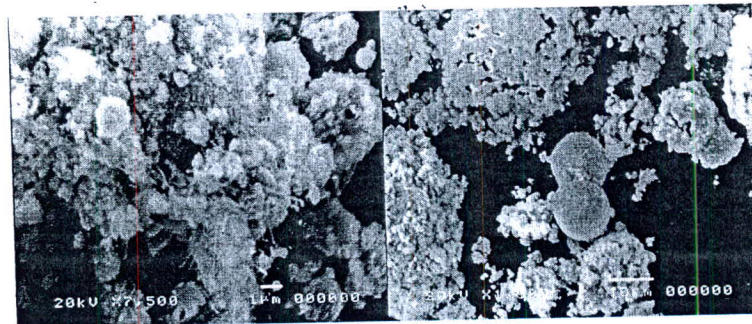
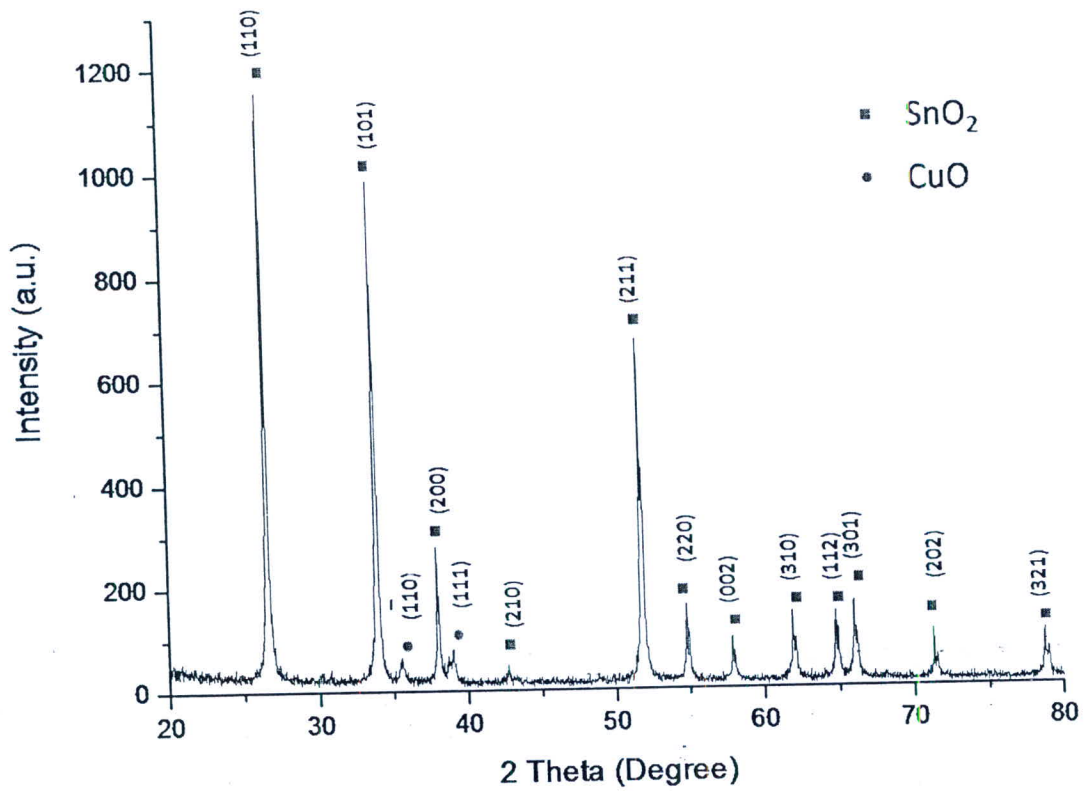
เวลา (s.)	V _{L1} (V.)	V _{L2} (V.)	V _{Lav} (V.)	V _s (V.)	I(μA)	R _{sensor} (MΩ)	R _{air} (MΩ)	Sensitivity
5	0.304	0.314	0.309	9.691	0.309	31.362	28.51	1.100
10	0.296	0.279	0.288	9.7125	0.288	33.782	28.51	1.185
15	0.285	0.263	0.274	9.726	0.274	35.496	28.51	1.245
20	0.271	0.250	0.261	9.7395	0.261	37.388	28.51	1.311
25	0.262	0.243	0.253	9.7475	0.253	38.604	28.51	1.354
30	0.250	0.231	0.241	9.7595	0.241	40.580	28.51	1.423
35	0.240	0.221	0.231	9.7695	0.231	42.384	28.51	1.487

จากตารางที่ 4.24-4.26 เรานำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สแสดงดังภาพที่ 4.147



ภาพที่ 4.147 กราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สของวัสดุผสมเตรียมจากการทดลองที่ 5

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผสมทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของการทดลองที่ 6



ภาพที่ 4.148 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 6

ตารางที่ 4.27 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สเอทานอล (Ethanol) ของวัสดุผสมจากการทดลองที่ 6 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	1.800	2.605	2.203	7.798	2.203	3.540	3.65	0.970
10	2.088	2.683	2.386	7.615	2.386	3.192	3.65	0.875
15	2.226	2.716	2.471	7.529	2.471	3.047	3.65	0.835
20	2.280	2.723	2.502	7.499	2.502	2.998	3.65	0.821
25	2.311	2.694	2.503	7.498	2.503	2.996	3.65	0.821
30	2.324	2.673	2.499	7.502	2.499	3.002	3.65	0.822
35	2.353	2.662	2.508	7.493	2.508	2.988	3.65	0.818

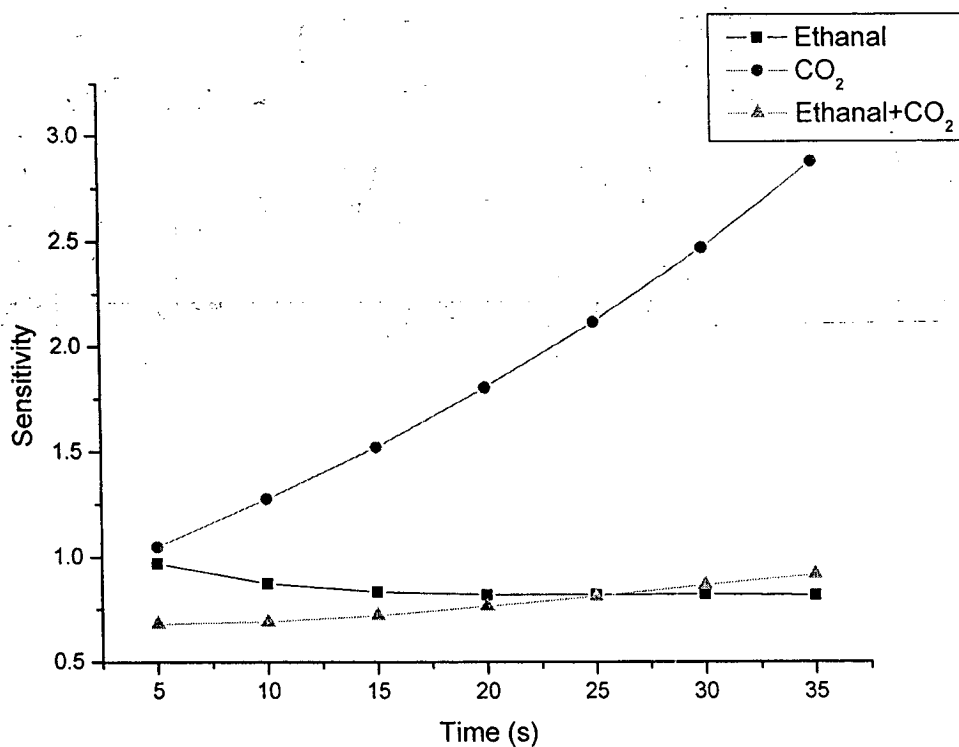
ตารางที่ 4.28 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของวัสดุผสมจากการทดลองที่ 6 ($V_c = 10 \text{ Volt.}$, $R_{load} = 1 \text{ M}\Omega$.)

เวลา (s.)	V_{L1} (V.)	V_{L2} (V.)	$V_{L\text{av}}$ (V.)	V_s (V.)	$I(\mu\text{A})$	$R_{\text{sensor}}(\text{M}\Omega)$	$R_{\text{air}}(\text{M}\Omega)$	Sensitivity
5	0.51	0.312	0.411	9.589	0.411	23.330	22.24	1.049
10	0.441	0.24	0.341	9.6595	0.341	28.368	22.24	1.276
15	0.376	0.198	0.287	9.713	0.287	33.843	22.24	1.522
20	0.321	0.166	0.244	9.7565	0.244	40.068	22.24	1.802
25	0.277	0.139	0.208	9.792	0.208	47.077	22.24	2.117
30	0.244	0.114	0.179	9.821	0.179	54.866	22.24	2.467
35	0.212	0.096	0.154	9.846	0.154	63.935	22.24	2.875

ตารางที่ 4.29 บันทึกผลการตอบสนองของวัสดุผสม ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และแก๊สเอทานอล (Ethanal) ของวัสดุผสมที่เตรียมจากการทดลองที่ 6 (V_c = 10 Volt., R_{load} = 1 MΩ.)

เวลา (s.)	V _{L1} (V.)	V _{L2} (V.)	V _{Lav} (V.)	V _s (V.)	I(μA)	R _{sensor} (MΩ)	R _{air} (MΩ)	Sensitivity
5	0.417	0.395	0.406	9.594	0.406	23.630	34.77	0.680
10	0.423	0.377	0.400	9.600	0.400	24.000	34.77	0.690
15	0.413	0.354	0.384	9.617	0.384	25.076	34.77	0.721
20	0.391	0.333	0.362	9.638	0.362	26.624	34.77	0.766
25	0.368	0.316	0.342	9.658	0.342	28.240	34.77	0.812
30	0.344	0.299	0.322	9.679	0.322	30.104	34.77	0.866
35	0.324	0.285	0.305	9.696	0.305	31.841	34.77	0.916

จากตารางที่ 4.27-4.29 เรานำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สแสดงดังภาพที่ 4.149



ภาพที่ 4.149 กราฟแสดงการตอบสนอง(Sensitivity)ต่อแก๊สของวัสดุผสมเตรียมจากการทดลองที่ 6

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบจากวัสดุผสมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์(XRD)

การทดลองที่ 1 ปริมาณ CuO Weight fraction/ % = 66.5 ; SnO₂ Weight fraction/ % = 33.5

การทดลองที่ 2 ปริมาณ CuO Weight fraction/ % = 38.3 ; SnO₂ Weight fraction/ % = 61.7

การทดลองที่ 3 ปริมาณ CuO Weight fraction/ % = 70.3 ; SnO₂ Weight fraction/ % = 29.7

การทดลองที่ 4 ปริมาณ CuO Weight fraction/ % = 77.2 ; SnO₂ Weight fraction/ % = 22.8

การทดลองที่ 5 ปริมาณ CuO Weight fraction/ % = 5.00 ; SnO₂ Weight fraction/ % = 95.0

การทดลองที่ 6 ปริมาณ CuO Weight fraction/ % = 11.7 ; SnO₂ Weight fraction/ % = 88.3

จากข้อมูลที่ปรากฏในตารางที่ 4.12 - 4.29 ภาพที่ 4.136 - 4.149 แสดงให้เห็นว่าเราสามารถดำเนินการสังเคราะห์วัสดุผสมโครงสร้างนาโนทินไดออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ และจากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงพบว่า มีการตอบสนองต่อแสงเอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สผสมทั้งสอง สำหรับการตอบสนองต่อแสงเดี่ยวจะมีปฏิกิริยาที่ไวกว่าแก๊สผสม