

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาโครงสร้างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมที่มีความพรุน

4.1.1 สมบัติของผง

4.1.1.1 ขนาดผง

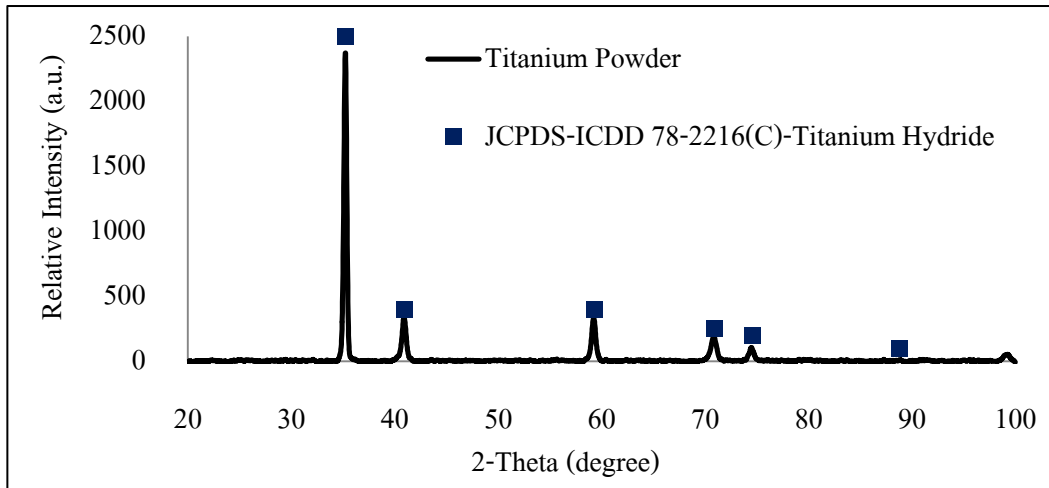
การวิเคราะห์การกระจายตัว และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 358.37 ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายตัวของผงแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต

ตัวอย่าง	การกระจายตัวของอนุภาค (ไมครอน) $[d_{10}-d_{90}]$	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน) $[d_{4,3}]$
ผงแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต	61.34-691.39	358.37

4.1.1.2 องค์ประกอบของผง

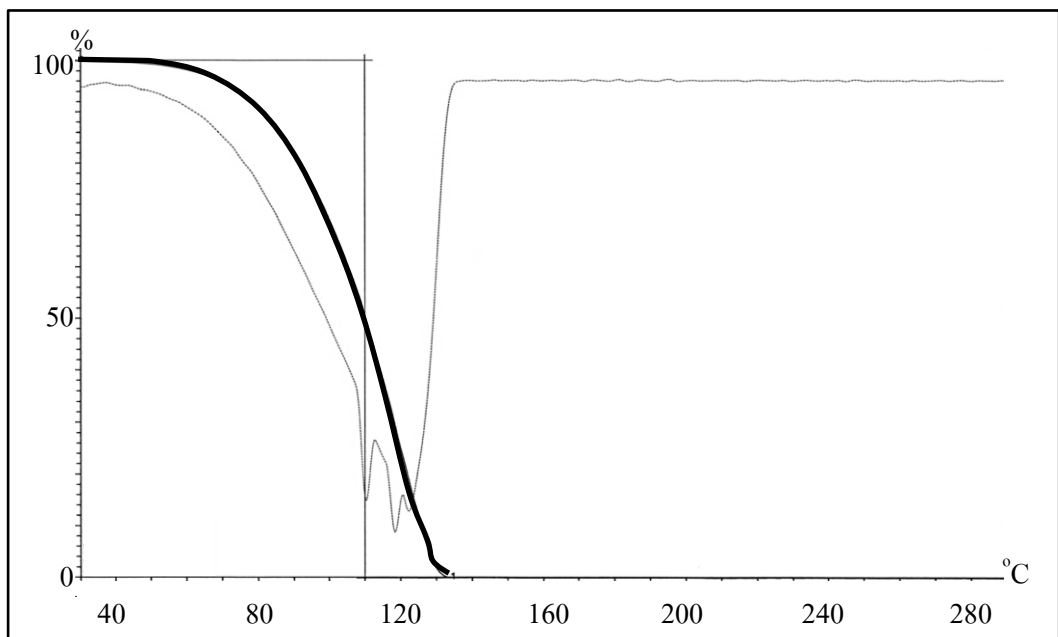
การวิเคราะห์องค์ประกอบของผงไทเทเนียมตั้งต้นที่ใช้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงไทเทเนียม ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งเลี้ยวเบน 2 θ ที่ 35, 41, 59, 71, 75 และ 89 ดีกรี ตำแหน่งเหล่านี้ตรงกับข้อมูลจาก JCPDS-ICDD 78-2216 (C) ของไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าผงไทเทเนียมนี้เป็นไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงไทเทเนียมไฮไดรด์

4.1.1.3 อุณหภูมิในการสลายตัว

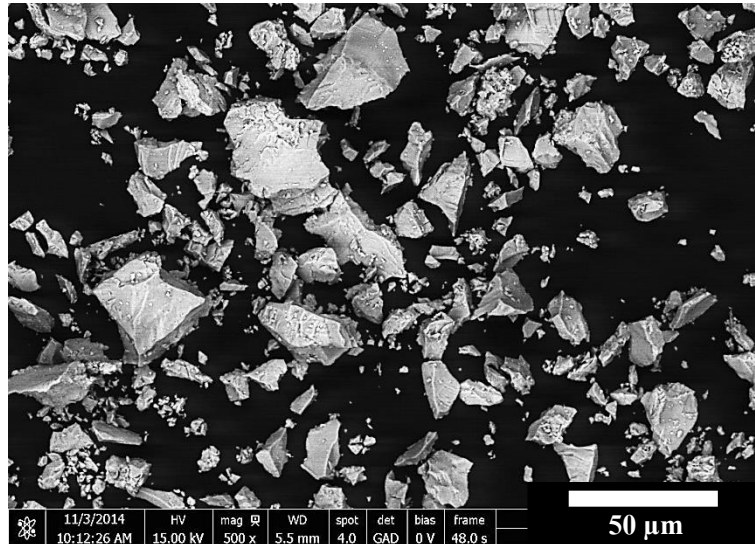
การวิเคราะห์การสลายตัวระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสารที่ทำให้เกิดความพรุน (แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต) พบว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 36-135 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ได้แก่ ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ คิดเป็นน้ำหนักที่สูญเสียไปร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิของผงแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน

4.1.1.4 ลักษณะของผงก่อนบดผสม

ลักษณะผงไทเทเนียมไฮไดรด์ก่อนทำการบดผสมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน ดังรูปที่ 4.3

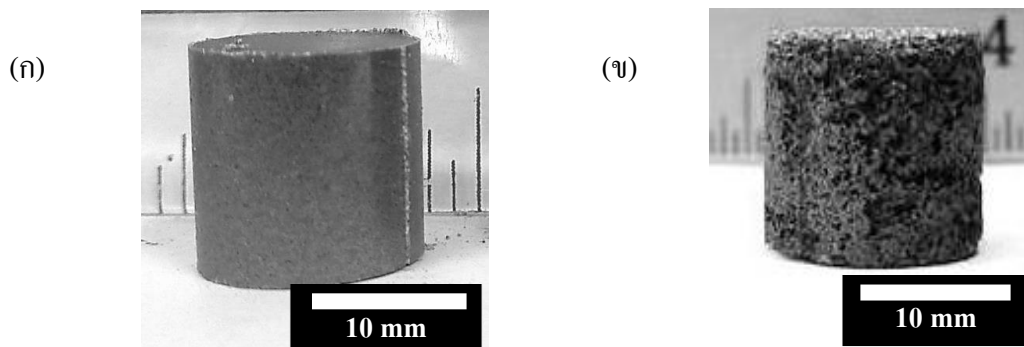


รูปที่ 4.3 ลักษณะผงไทเทเนียมไฮไดรด์

4.1.2 สมบัติของโครงสร้างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมที่มีความพรุน

4.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนหลังผ่านกระบวนการอบประสาน เมื่อพิจารณาเทียบกับชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการอบประสาน พบว่าชิ้นงานมีความพรุนเกิดขึ้น

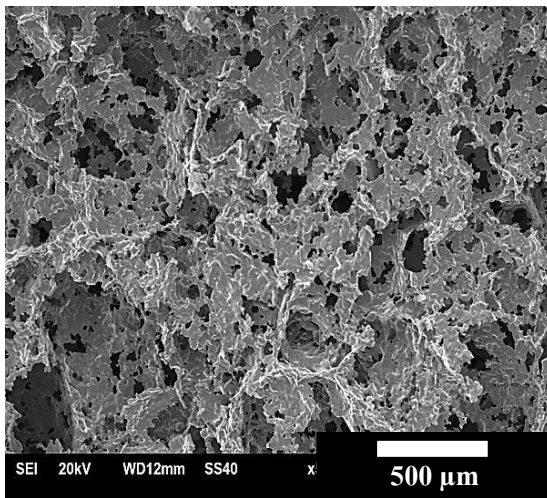


รูปที่ 4.4 ลักษณะชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน

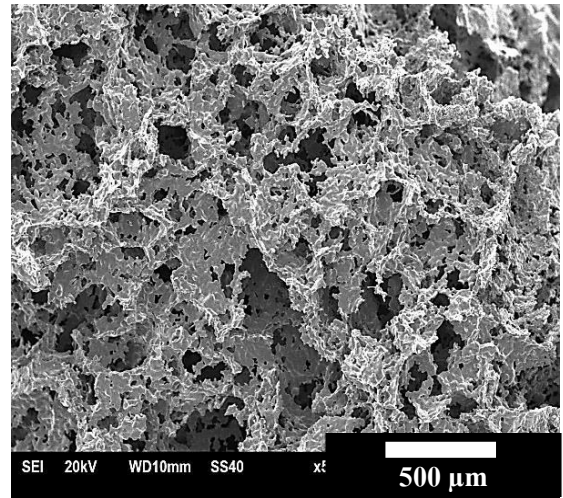
(ก) ก่อนผ่านกระบวนการอบประสาน

(ข) หลังผ่านกระบวนการอบประสาน

ลักษณะชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนหลังอบประสานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายต่ำ (รูปที่ 4.5 (ก และ ข)) และภาพถ่ายกำลังขยายสูง (รูปที่ 4.6 (ก และ ข)) ของชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 และ 70 โดยปริมาตร ที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรง 50 เมกะปาสคาล พบว่ามีลักษณะพื้นผิว ชนิดรูพรุน ขนาดรูพรุน และปริมาตรความพรุนคล้ายกัน และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายสูงชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 20 และ 50 เมกะปาสคาล พบว่าโครงสร้างที่ได้มีลักษณะพื้นผิว และขนาดรูพรุนคล้ายกัน (รูปที่ 4.6 (ก และ ข)) และเมื่อพิจารณาชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 และ 70 โดยปริมาตร ที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 20 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง พบว่าโครงสร้างที่ได้มีลักษณะพื้นผิว และขนาดรูพรุนคล้ายกัน (รูปที่ 4.6 (ง และ จ)) แต่เมื่อพิจารณาที่แรงดันอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง พบว่าโครงสร้างภายในชิ้นงานเกิดรอยแตกร้าว (วงรีสีดำ รูปที่ 4.6 (จ และ ช))



(ก)

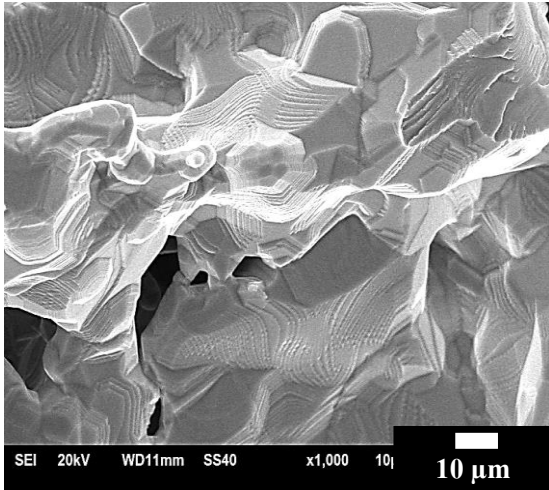


(ข)

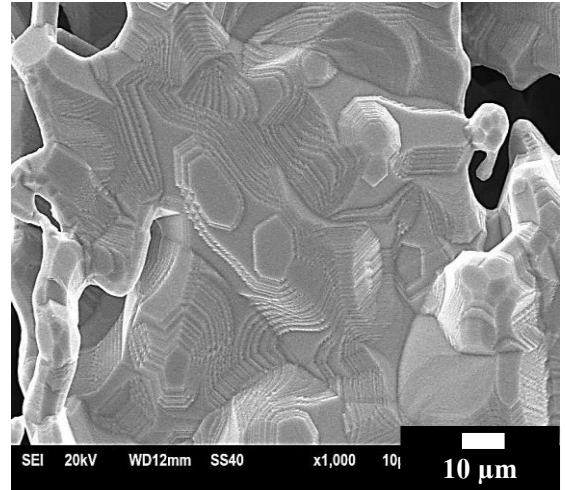
รูปที่ 4.5 ภาพกำลังขยายต่ำลักษณะบริเวณภายในชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน

(ก) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล

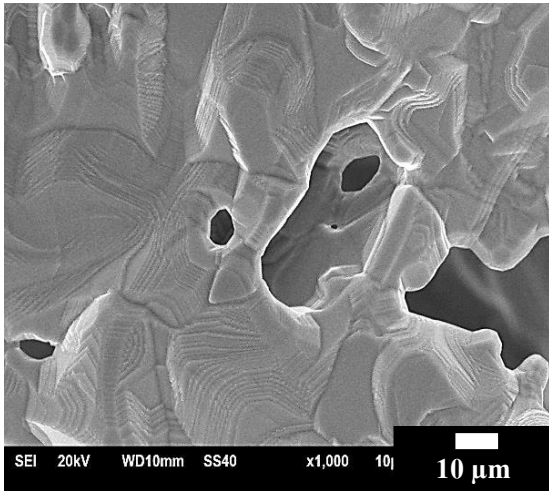
(ข) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล



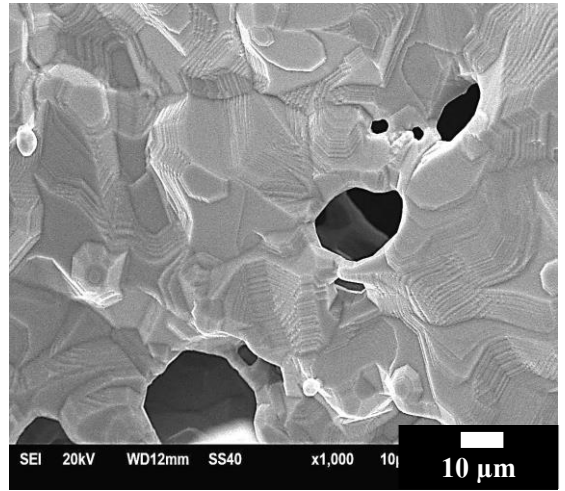
(f)



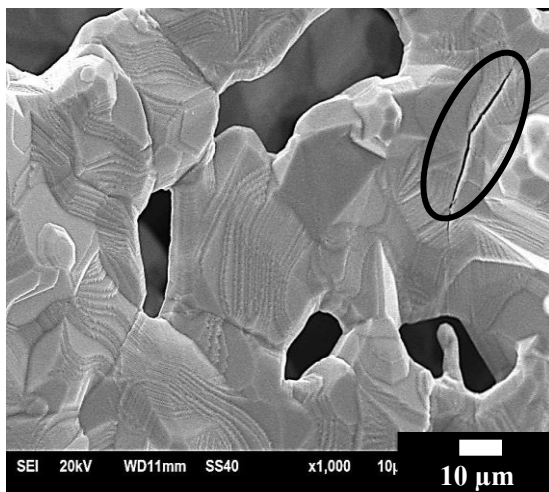
(g)



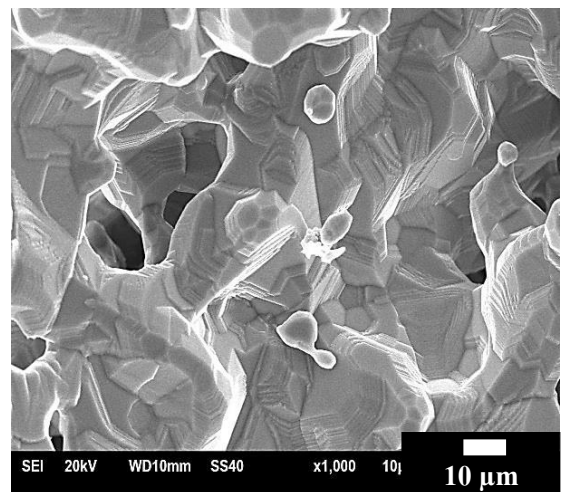
(h)



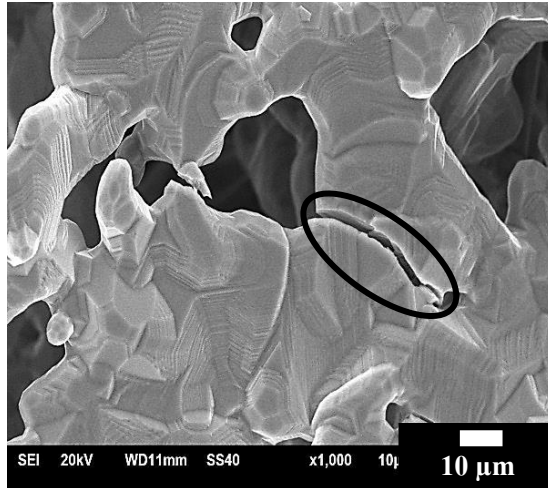
(i)



(j)



(k)

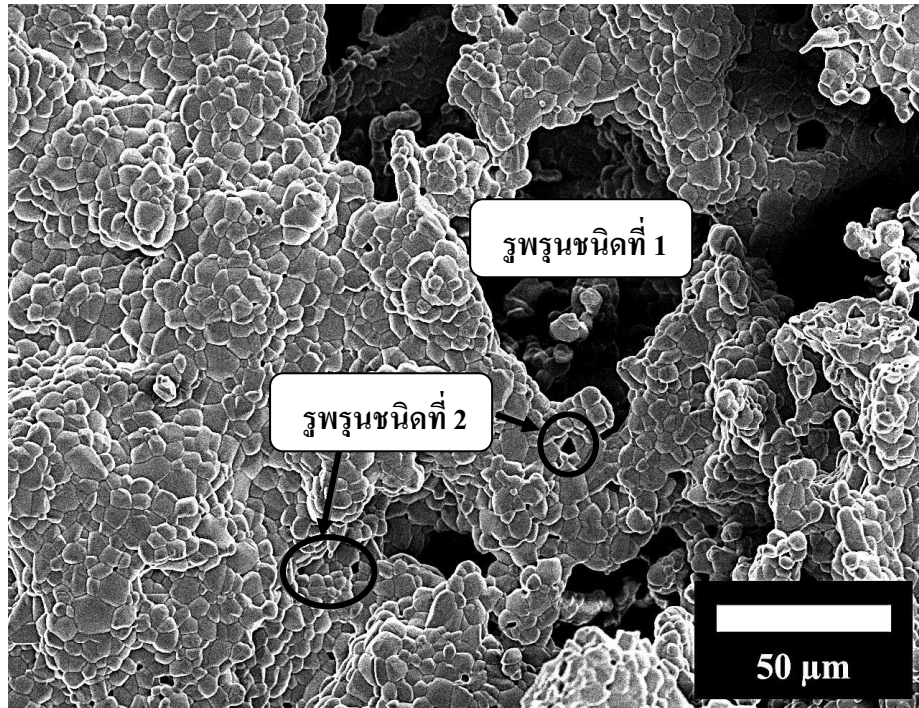


(ข)

รูปที่ 4.6 ภาพกำลังขยายสูงลักษณะบริเวณภายในชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน

- (ก) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 20 เมกะปาสคาล
- (ข) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล
- (ค) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล
- (ง) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 20 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง
- (จ) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง
- (ฉ) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 20 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง
- (ช) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร ที่แรงอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว 50 เมกะปาสคาล และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง

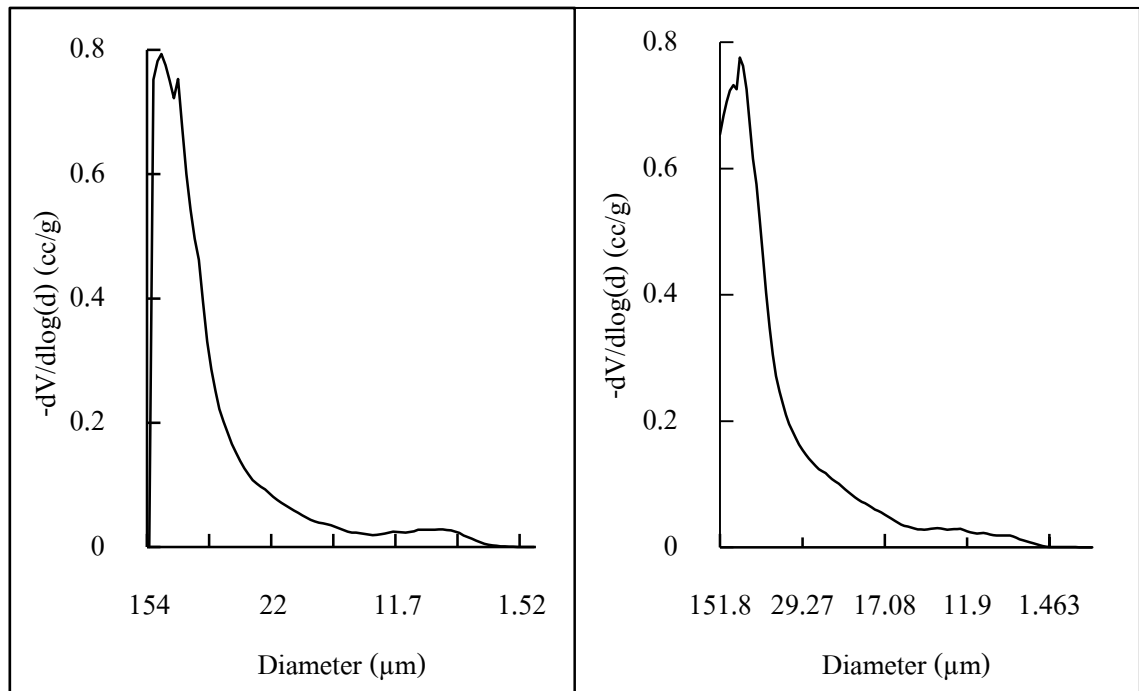
ลักษณะชิ้นงานไทเทเนียมที่ความพรุนที่ผ่านกระบวนการอบประสาน เมื่อพิจารณาภาพโดยรวมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบรูพรุน 2 ชนิด โดยชนิดแรกเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ และชนิดที่สองเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะรูพรุนที่พบในชิ้นงานไทเทเนียมหลังอบประสาน

4.1.2.2 ปริมาตรความพรุน

การวัดการกระจายขนาดรูพรุนของชิ้นงานไทเทเนียมหลังอบประสานที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน พบว่าชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 1.09-154 ไมครอน โดยมีรูพรุนส่วนใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 108 ไมครอน ซึ่งมีความใหญ่มากกว่าชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งมีความเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 0.1-151.8 ไมครอน โดยมีรูพรุนส่วนใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 73.8 ไมครอน ดังรูปที่ 4.8



(ก)

(ข)

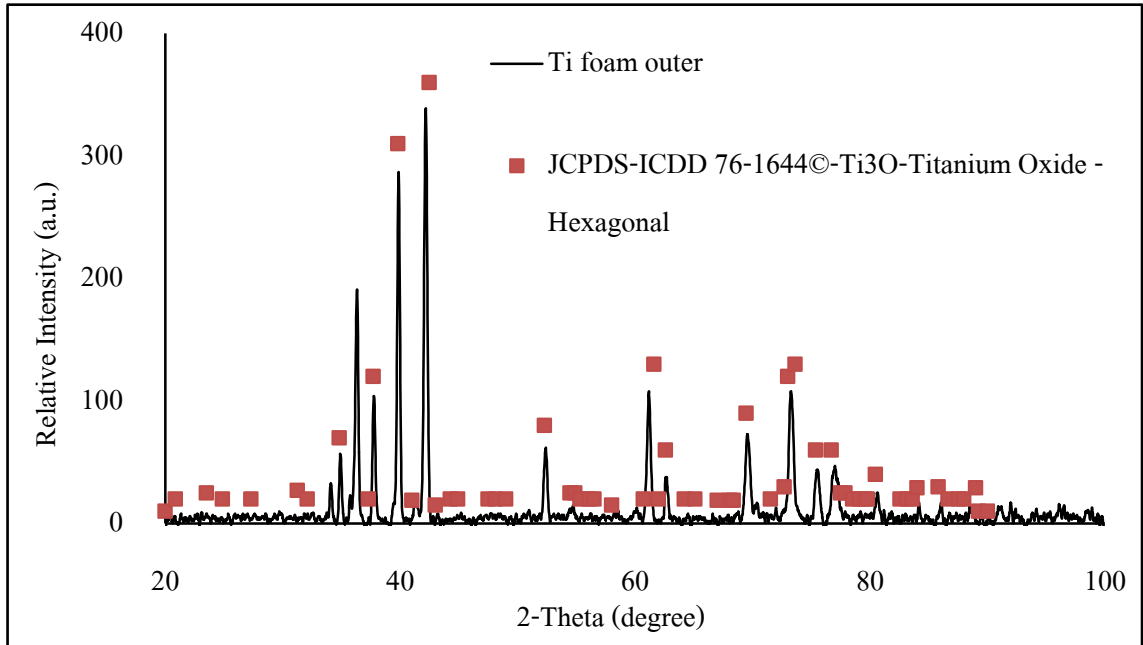
รูปที่ 4.8 ปริมาณขนาดอนุภาคของขี้เถ้าไทเทเนียมที่มีความพรุนหลังอบประสาน

(ก) อัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียว

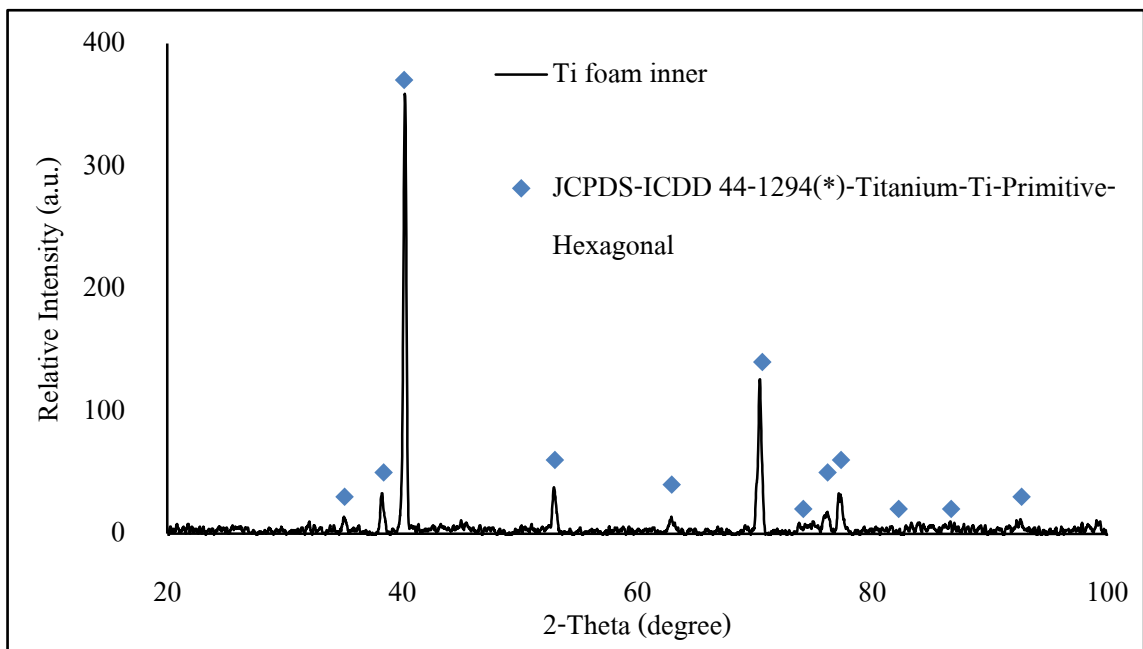
(ข) อัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง

4.1.2.3 องค์ประกอบของขี้เถ้า

การวิเคราะห์องค์ประกอบของขี้เถ้าไทเทเนียมที่มีความพรุนหลังอบประสานด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เมื่อพิจารณาบริเวณภายนอกขี้เถ้าพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งเลี้ยวเบน 2θ ที่ 35, 38, 40, 43, 52, 62, 63, 70, 73, 75, 77 และ 80 องศาตำแหน่งเหล่านี้ตรงกับข้อมูลจาก JCPDS-ICDD 76-1644 (C) ของไทเทเนียมออกไซด์ส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าบริเวณภายนอกขี้เถ้านี้เป็นไทเทเนียมออกไซด์ ดังรูปที่ 4.9 (ก) และเมื่อพิจารณาบริเวณภายในประกอบด้วยตำแหน่งเลี้ยวเบน 2θ ที่ 35, 39, 40, 54, 63, 71, 74, 76, 77, 82, 87 และ 93 องศาตำแหน่งเหล่านี้ตรงกับข้อมูลจาก JCPDS-ICDD 44-1294 (*) ของไทเทเนียมส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าบริเวณภายนอกขี้เถ้านี้เป็นไทเทเนียม ดังรูปที่ 4.9 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนหลังอบประสาน

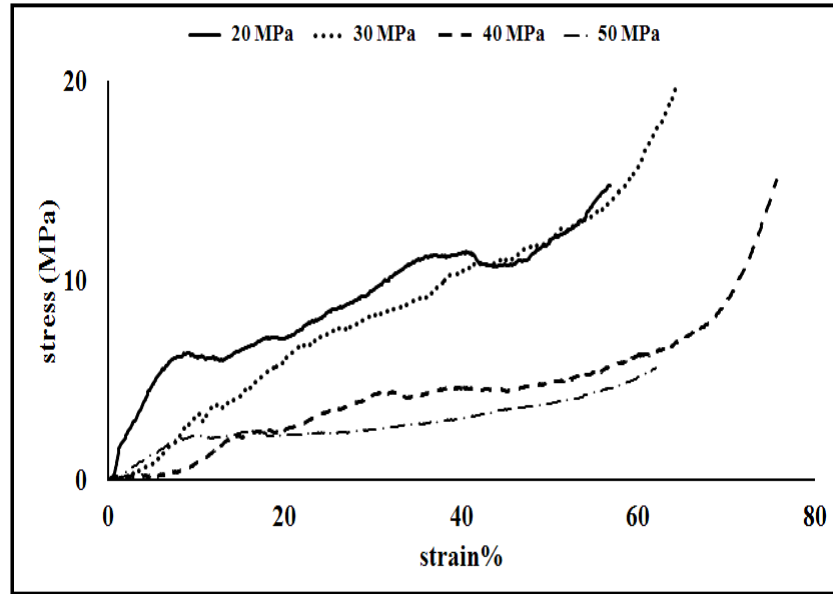
(ก) ภายนอกชิ้นงาน

(ข) ภายในชิ้นงาน

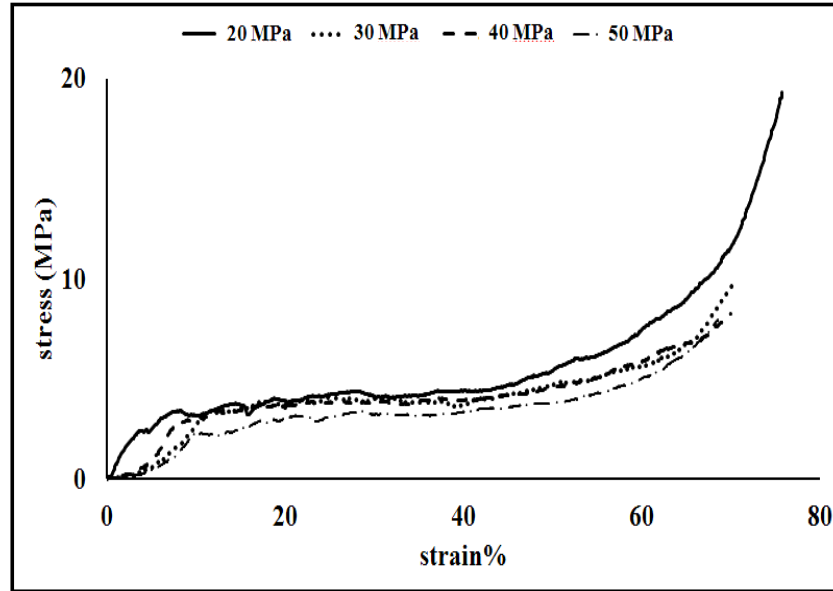
4.1.2.4 การทดสอบความต้านทานแรงกด

โครงสร้างทดแทนกระดูกที่มีความพรุนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานนั้น ต้องมีสมบัติความต้านทานแรงกดที่ใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติ [8, 9] โดยพิจารณาจากค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ (Plateau stresses) เป็นค่าชี้วัดความเหมาะสมของชิ้นงาน จากการทดสอบความต้านทานแรงกดของชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน เมื่อพิจารณาลักษณะกราฟความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร อัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรงดันอัดต่างกัน พบว่าค่าช่วงที่ความเค้นคงที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ไม่ราบเรียบ และมีค่าลดลงเมื่อแรงดันอัดในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.10 (ก) เช่นเดียวกับลักษณะกราฟความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่อัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรงดันอัดต่างกัน พบว่าค่าช่วงที่ความเค้นคงที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ไม่ราบเรียบ และมีค่าลดลงเมื่อแรงดันอัดในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.10 (ค) แต่เมื่อพิจารณาลักษณะกราฟความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตรที่อัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรงดันอัดต่างกัน และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง พบว่าค่าช่วงที่ความเค้นคงที่มีรูปแบบไปในทิศทางเดียวกัน ราบเรียบ เกาะกลุ่มกัน และมีค่าลดลงเมื่อแรงดันอัดในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.10 (ข) เช่นเดียวกับลักษณะกราฟความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร ที่อัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรงดันอัดต่างกัน และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง พบว่าค่าช่วงที่ความเค้นคงที่มีรูปแบบไปในทิศทางเดียวกัน ราบเรียบ เกาะกลุ่มกัน และมีค่าลดลงเมื่อแรงดันอัดในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.10 (ง) และเมื่อพิจารณาชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนดคงที่ เช่น ที่แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร เมื่อเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว เป็นอัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง พบว่าลักษณะกราฟความต้านทานแรงกดค่าช่วงที่ความเค้นคงที่มีรูปแบบไปในทิศทางเดียวกัน เป็นระเบียบ ราบเรียบ และเกาะกลุ่มกันเพิ่มขึ้น แต่พบค่าช่วงความเค้นคงที่มีค่าต่ำลง ดังรูปที่ 4.10 (ก และ ข) และเมื่อพิจารณาวิธีการอัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียว ที่ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนดลดลงจากร้อยละ 70 เป็น 60 โดยปริมาตร พบว่าลักษณะกราฟความต้านทานแรงกดค่าช่วงที่ความเค้นคงที่มีรูปแบบไปในทิศทางเดียวกัน เกาะกลุ่มกัน และมีค่าช่วงความเค้นคงที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.10 (ก และ ค) และพิจารณาวิธีการอัศจรรย์รูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทางชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนด เมื่อลดอัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนดจากร้อยละ 70 เป็น 60 โดยปริมาตร พบว่าลักษณะกราฟความต้านทานแรงกดค่าช่วงที่ความเค้นคงที่มีรูปแบบไปในทิศทางเดียวกัน ราบเรียบ และเกาะกลุ่มกันลดลง แต่มีค่าช่วงความเค้นคงที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.10 (ข และ ง)

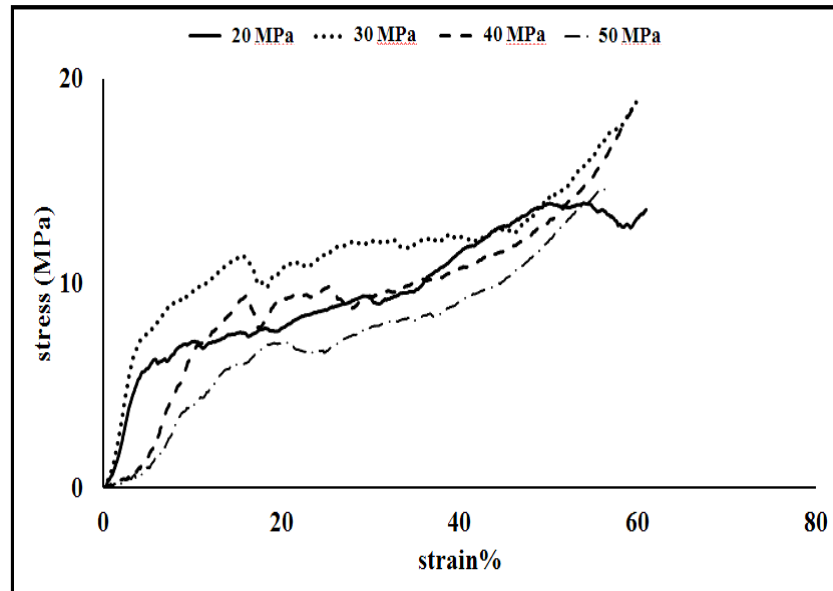
(f)



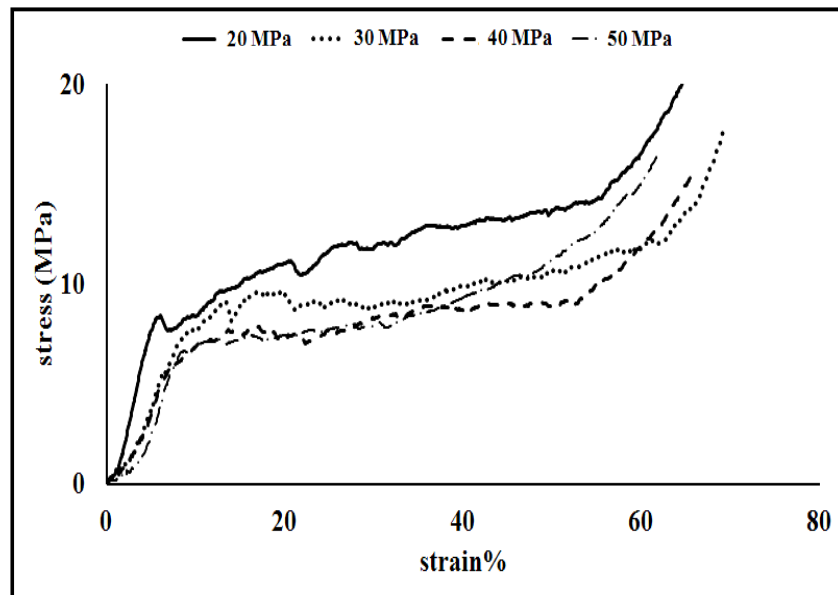
(g)



(h)



(ง)



- รูปที่ 4.10** ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน หลังผ่านกระบวนการอบประสานที่ขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวด้วยแรงดันอัดต่างกัน
- (ก) อัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว
- (ข) อัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยปริมาตร อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง
- (ค) อัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว
- (ง) อัตราส่วนแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และนำไปผ่านกระบวนการอัดด้วยความดันเท่ากันทุกทิศทาง

จากแผนการทดลองส่วนที่ 1 สามารถผลิตชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุนที่มีค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ อยู่ในช่วง 2-14 เมกะปาสคาล ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดอยู่ในช่วง 5-19 เมกะปาสคาล และค่ามอดูลัสของยังอยู่ในช่วง 0.02-0.2 กิกะปาสคาล ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าสมบัติทางกลของโครงร่างทดแทนกระดูกที่ผลิตได้นี้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าสมบัติทางกลที่กระดูกธรรมชาติต้องการ คือ มีค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด และค่ามอดูลัสของยังอยู่ในช่วง 3-20 เมกะปาสคาล 2-200 เมกะปาสคาล และ 0.1-20 กิกะปาสคาล ตามลำดับ [8, 9]

ตารางที่ 4.2 ค่าทดสอบความต้านทานแรงกดค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ ค่ามอดูลัสของยัง และค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด

อัตราส่วน ไทเทเนียมต่อ แอมโมเนียม ไบคาร์บอเนต (ร้อยละโดย ปริมาตร)	ผลการทดลอง	แรงกดอัดขึ้นรูป (เมกะปาสคาล)							
		อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว และ นำไปผ่านกระบวนการอัดด้วย ความดันเท่ากันทุกทิศทาง				อัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว			
		20	30	40	50	20	30	40	50
30/70	ช่วงที่ความเค้น คงที่ (เมกะปาสคาล)	3-5	3-5	3-4	2-4	6-11	3-5	2-5	2-3
	ความต้านทาน แรงกดสูงสุด (เมกะปาสคาล)	5	11	9	10	10	19	17	9
	มอดูลัสของยัง (กิกะปาสคาล)	0.067	0.028	0.046	0.036	0.074	0.021	0.029	0.026
40/60	ช่วงที่ความเค้น คงที่ (เมกะปาสคาล)	10-14	8-12	7-9	6-9	6-10	10-12	9-11	7-10
	ความต้านทาน แรงกดสูงสุด (เมกะปาสคาล)	11	13	12	9	6	10	16	17
	มอดูลัสของยัง (กิกะปาสคาล)	0.202	0.090	0.102	0.130	0.134	0.204	0.064	0.044

4.2 การศึกษาโครงสร้างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ

4.2.1 สมบัติของผง

4.2.1.1 ขนาดผง

การวิเคราะห์การกระจายตัว และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ขนาด 5 ไมครอน ขนาด 50-150 ไมครอน และผงแก้วชีวภาพ พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 36.66, 100.91 และ 79.58 ไมครอน ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายตัวของผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ

ตัวอย่าง	การกระจายตัวของอนุภาค (ไมครอน) $[d_{10}-d_{90}]$	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน) $[d_{4.3}]$
ผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 5 ไมครอน	1.26-110.96	36.66
ผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ 50-150 ไมครอน	43.98-169.15	100.91
ผงแก้วชีวภาพ	11.06-186.10	79.58

4.2.1.2 องค์ประกอบของผง

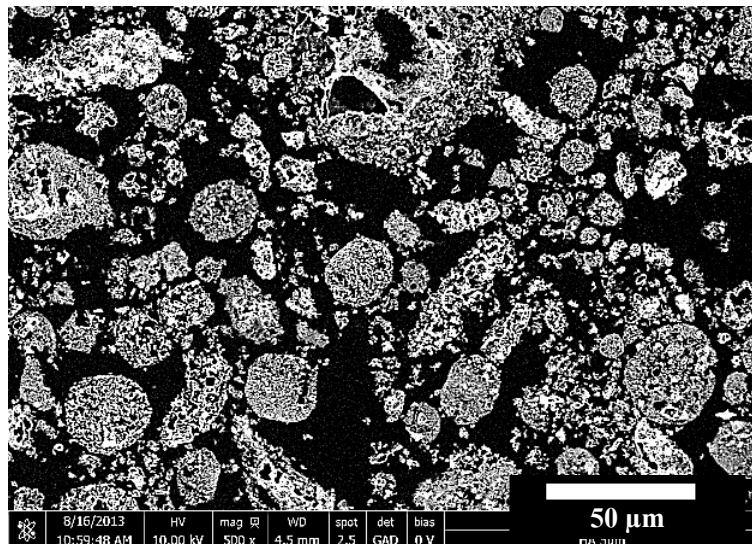
องค์ประกอบของผงแก้วชีวภาพประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 45, 24.5, 24.5 และ 6 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนผสมสารตั้งในการผลิตผงแก้วชีวภาพ ดังตารางที่ 4.4 เนื่องจากผงแก้วชีวภาพไม่มีความเป็นผลึก จึงไม่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนผสมสารตั้งต้นสำหรับผลิตผงแก้วชีวภาพ

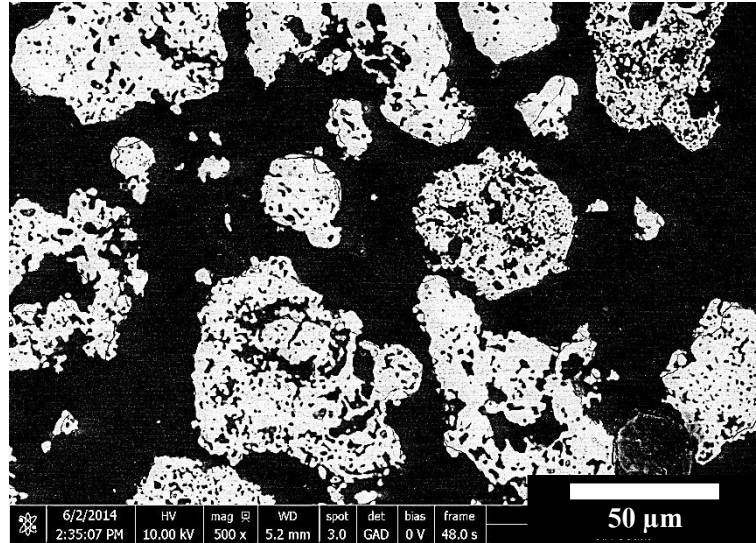
ส่วนผสม	อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	45
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	24.5
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	24.5
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P ₂ O ₅)	6

4.2.1.3 ลักษณะของผงก่อนบดผสม

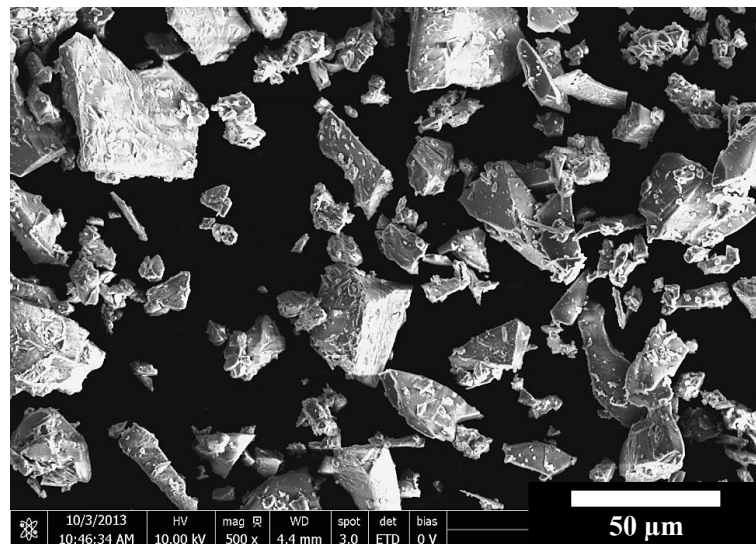
ลักษณะผงไฮดรอกซีแอปาทิต และผงแก้วชีวภาพก่อนผ่านกระบวนการบดผสม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคผงไฮดรอกซีแอปาทิตทั้ง 2 ขนาด มีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม และมีรูพรุนกระจายอยู่ภายในอนุภาค ดังรูป 4.11 (ก และ ข) และเมื่อพิจารณาลักษณะอนุภาคผงแก้วชีวภาพ พบว่ามีลักษณะเหลี่ยม รูปร่างไม่แน่นอน และมีขนาดแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.11 (ค)



(ก)



(จ)



(ข)

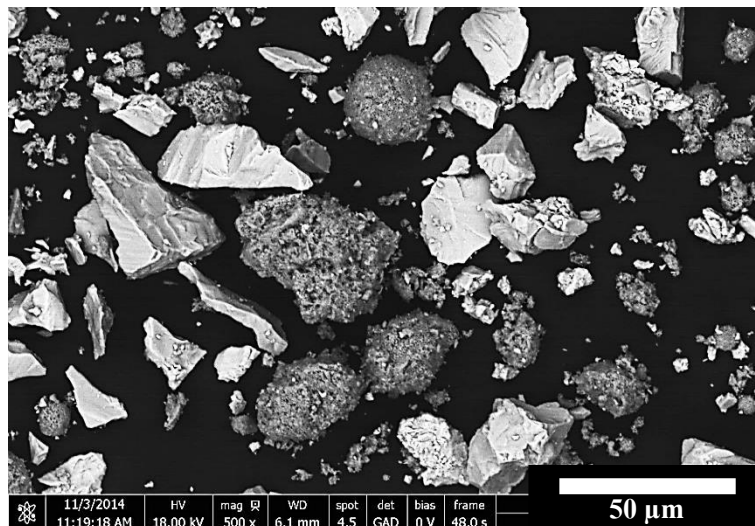
รูปที่ 4.11 ลักษณะอนุภาคผง

- (ก) ไฮดรอกซีเอปาทาइटซ์ขนาด 5 ไมครอน
- (ข) ไฮดรอกซีเอปาทาइटซ์ขนาด 50-150 ไมครอน
- (ค) ผงแก้วชีวภาพ

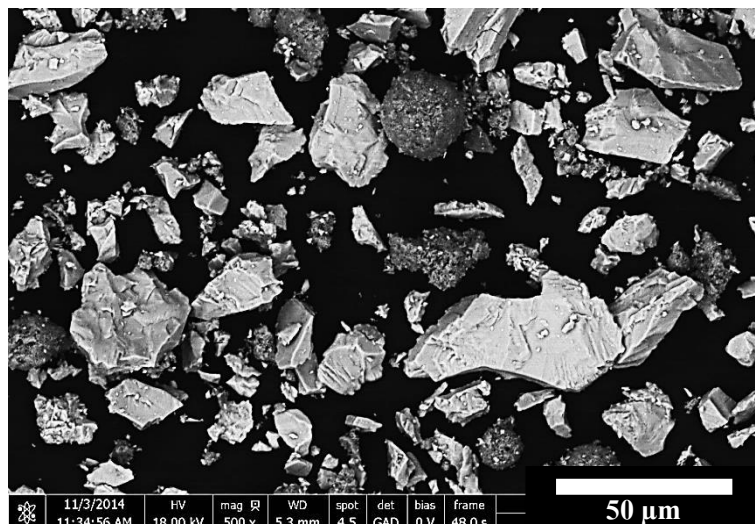
4.2.1.4 ลักษณะของผงหลังบดผสม

จากผลการศึกษาโครงสร้างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ (ภาคผนวก ข.) ที่อนุภาคไฮดรอกซีแอปาไทต์ขนาด 50-150 ไมครอน พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการอบประสานซึ่งงานเกิดการแตกหัก ไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ เพราะฉะนั้นในการศึกษาโครงสร้างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ จึงพิจารณาเฉพาะอนุภาคไฮดรอกซีแอปาไทต์ขนาด 5 ไมครอน เพียงชนิดเดียว โดยลักษณะผงไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ผ่านการบดเป็นเวลา 15 นาที เมื่อพิจารณาอัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาไทต์เพิ่มขึ้น พบว่าชิ้นงานทุกอัตราส่วนมีลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาผงไทเทเนียม และผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ผ่านการบด (รูปที่ 4.12) เทียบกับอนุภาคไทเทเนียม (รูปที่ 4.3) และอนุภาคไฮดรอกซีแอปาไทต์ (รูปที่ 4.11 (ก)) ที่ไม่ผ่านกระบวนการบดผสม พบว่ามีลักษณะรูปร่าง และขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคเริ่มต้น

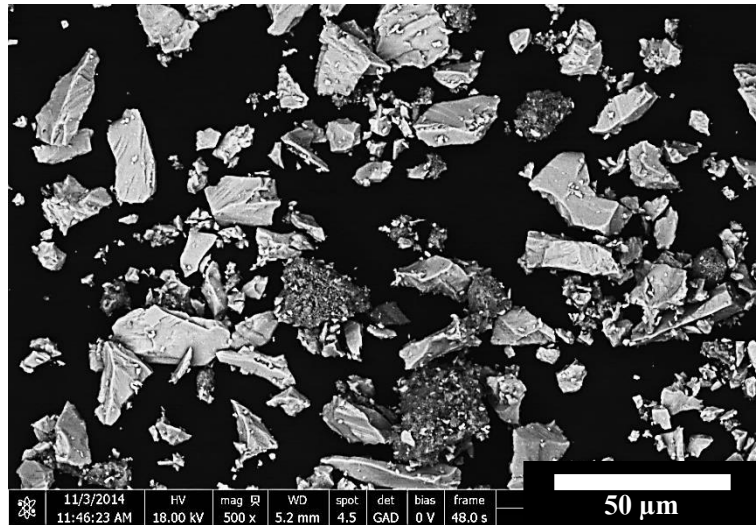
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 4.12 ลักษณะอนุภาคผงไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ และผงแก้วชีวภาพอัตราส่วนต่างๆ ที่เวลาบดผสม 15 นาที

(ก) ชั่งงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 40 โดยปริมาตร

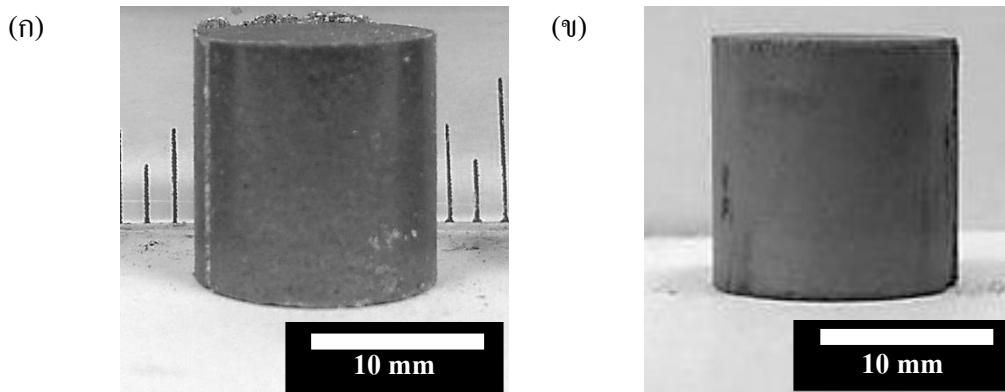
(ข) ชั่งงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 60 โดยปริมาตร

(ค) ชั่งงานไทเทเนียมที่ผสมแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 80 โดยปริมาตร

4.2.2 สมบัติของโครงสร้างทดแทนกระดูกที่ทำจากวัสดุไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ และผงแก้วชีวภาพ

4.2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ และผงแก้วชีวภาพหลังผ่านกระบวนการอบประสาน พบว่าชิ้นงานมีผิวเรียบ และมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการอบประสาน ดังรูปที่ 4.13

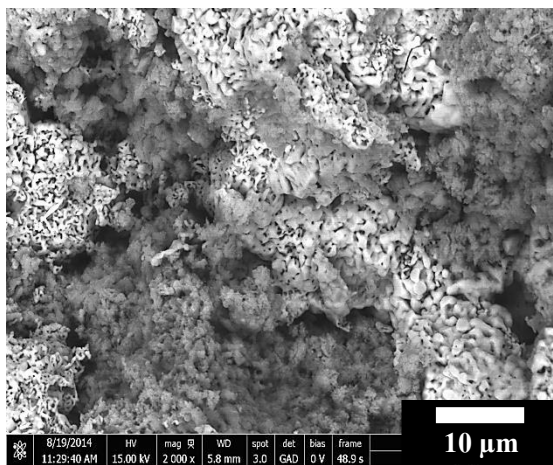


รูปที่ 4.13 ลักษณะชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพ

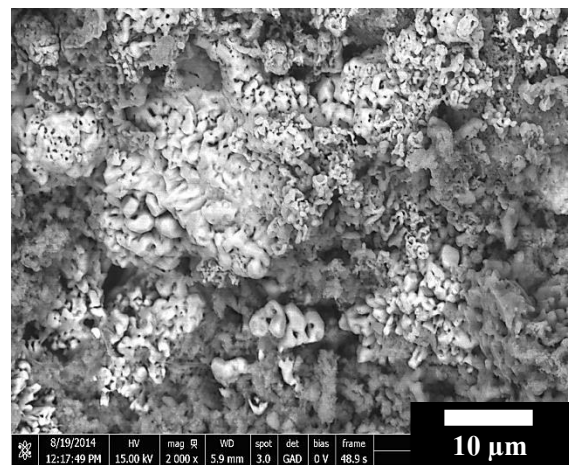
(ก) ก่อนผ่านกระบวนการอบประสาน

(ข) หลังผ่านกระบวนการอบประสาน

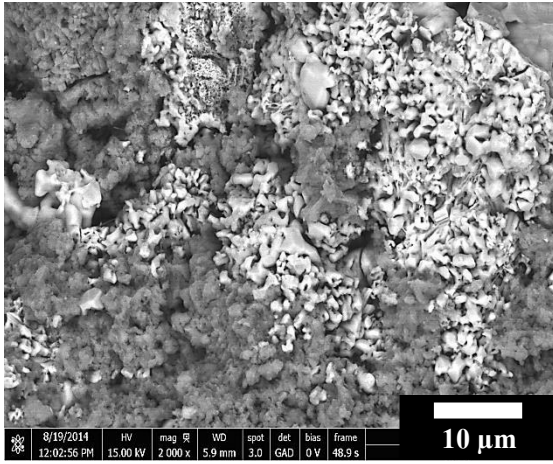
ลักษณะบริเวณภายในชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटหลังอบประสาน อัตราส่วนต่างๆ ที่ไม่เติมผงแก้วชีวภาพ และเติมผงแก้วชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายต่ำ พบว่าชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटทุกอัตราส่วนทั้งที่ไม่เติมผงแก้วชีวภาพ และเติมผงแก้วชีวภาพ โครงสร้างมีลักษณะพื้นผิวคล้ายกัน โดยพบเพียงเฟสของไทเทเนียม และไฮดรอกซีแอปาทาइट ดังรูป 4.14 (ก, ข, ค, ง, จ, และ ฉ) แต่เมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายสูงชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटที่เติมผงแก้วชีวภาพ พบเส้นที่เกิดจากผงแก้วชีวภาพ (ลูกศรสีดำ รูปที่ 4.14 (ซ-ญ)) หลอมแทรกตัวเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคของไทเทเนียม และไฮดรอกซีแอปาทาइटในกระบวนการอบประสาน



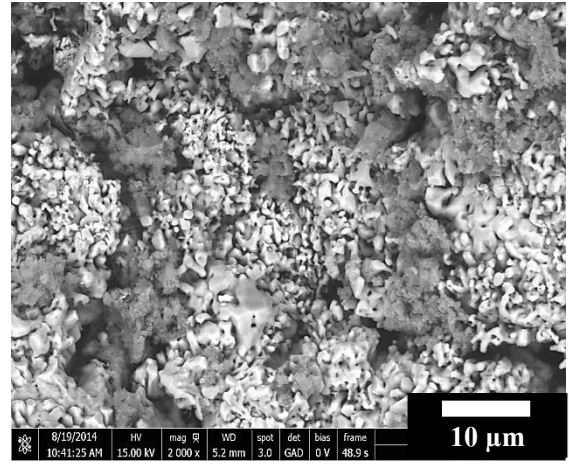
(ก)



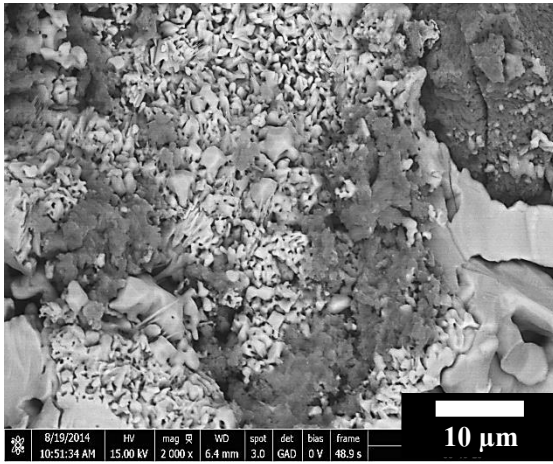
(ข)



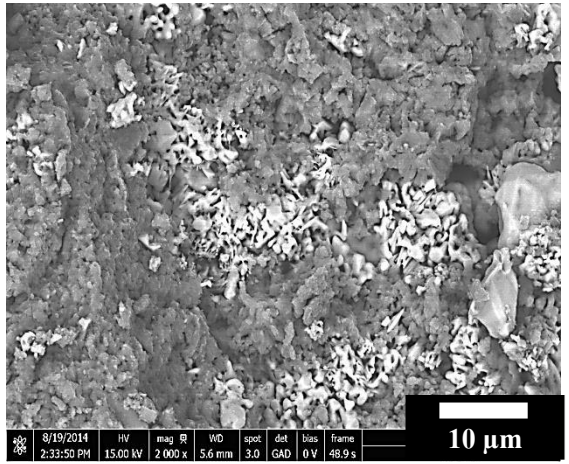
(f)



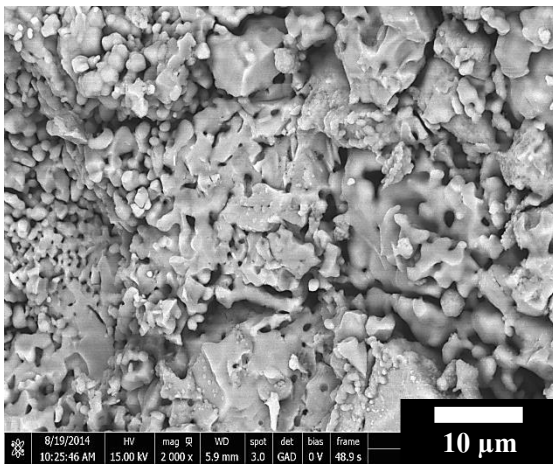
(g)



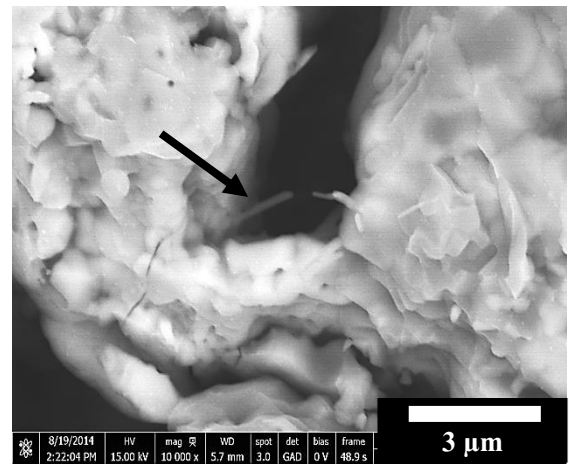
(h)



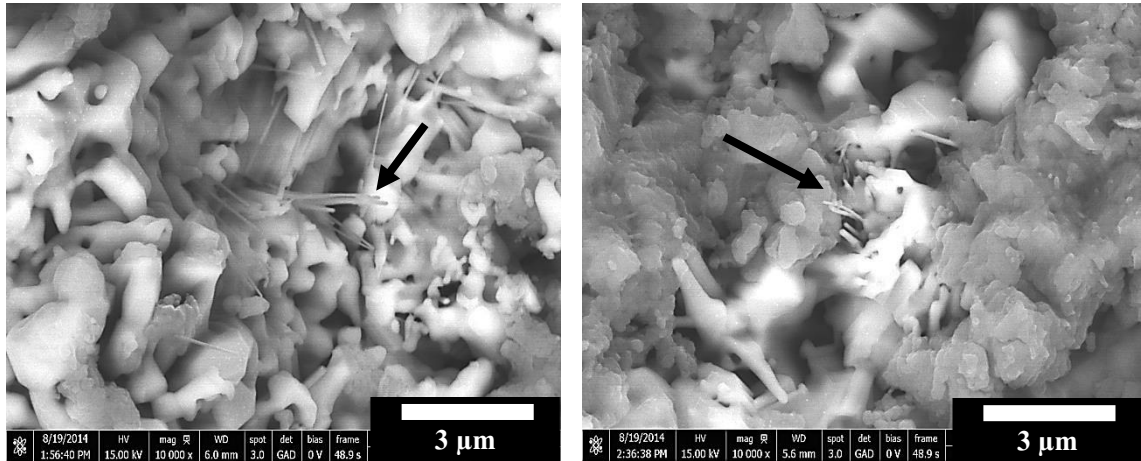
(i)



(j)



(k)



(ณ)

(ญ)

รูปที่ 4.14 ลักษณะบริเวณภายในชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट

(ก) ภาพกำลังขยายต่ำ ที่ไม่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 40 โดยปริมาตร

(ข) ภาพกำลังขยายต่ำ ที่ไม่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 60 โดยปริมาตร

(ค) ภาพกำลังขยายต่ำ ที่ไม่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 80 โดยปริมาตร

(ง) ภาพกำลังขยายต่ำ ที่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 40 โดยปริมาตร

(จ) ภาพกำลังขยายต่ำ ที่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 60 โดยปริมาตร

(ฉ) ภาพกำลังขยายต่ำ ที่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 80 โดยปริมาตร

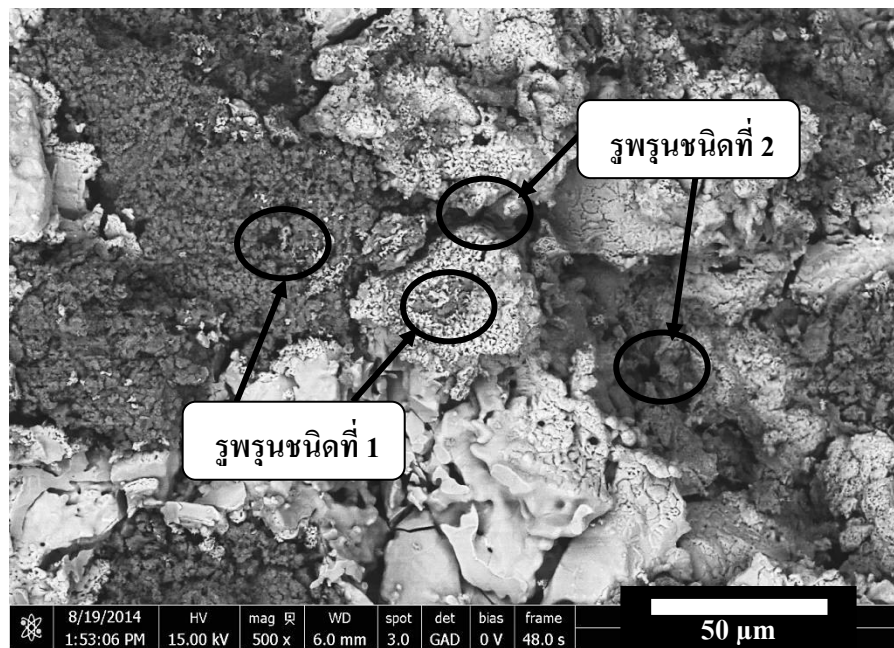
(ช) ภาพกำลังขยายต่ำ ที่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 100 โดยปริมาตร

(ซ) ภาพกำลังขยายสูง ที่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 40 โดยปริมาตร

(ณ) ภาพกำลังขยายสูง ที่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 60 โดยปริมาตร

(ญ) ภาพกำลังขยายสูง ที่เติมผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 80 โดยปริมาตร

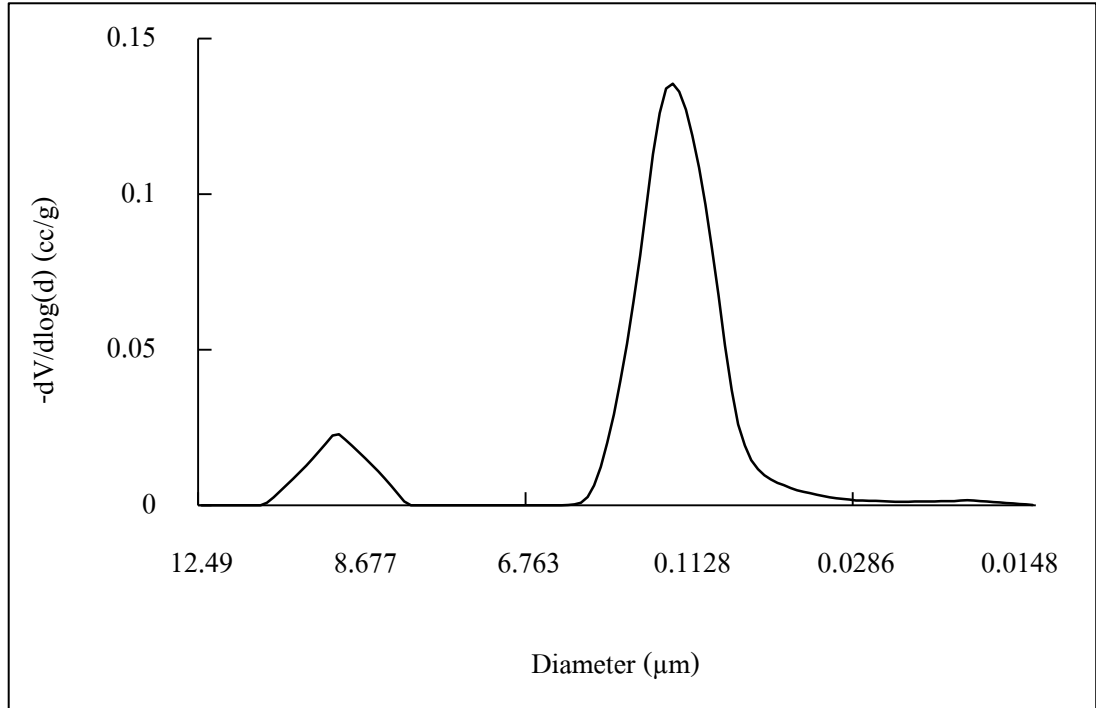
ลักษณะรูพรุนบริเวณภายในชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพที่ผ่านการอบประสาน เมื่อพิจารณาภาพโดยรวมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบรูพรุนขนาดเล็ก 2 ชนิด โดยชนิดแรกเป็นรูพรุนที่เกิดจากการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคชนิดเดียวกัน ได้แก่ ระหว่างอนุภาคของไทเทเนียม และระหว่างอนุภาคของไฮดรอกซีแอปาทาइट และรูพรุนชนิดที่ 2 เป็นรูพรุนที่เกิดจากรอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาคต่างชนิดกัน ได้แก่ กลุ่มอนุภาคไทเทเนียม และกลุ่มอนุภาคไฮดรอกซีแอปาทาइट โดยรูพรุนชนิดที่ 2 นี้มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนชั้นแรกเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.15



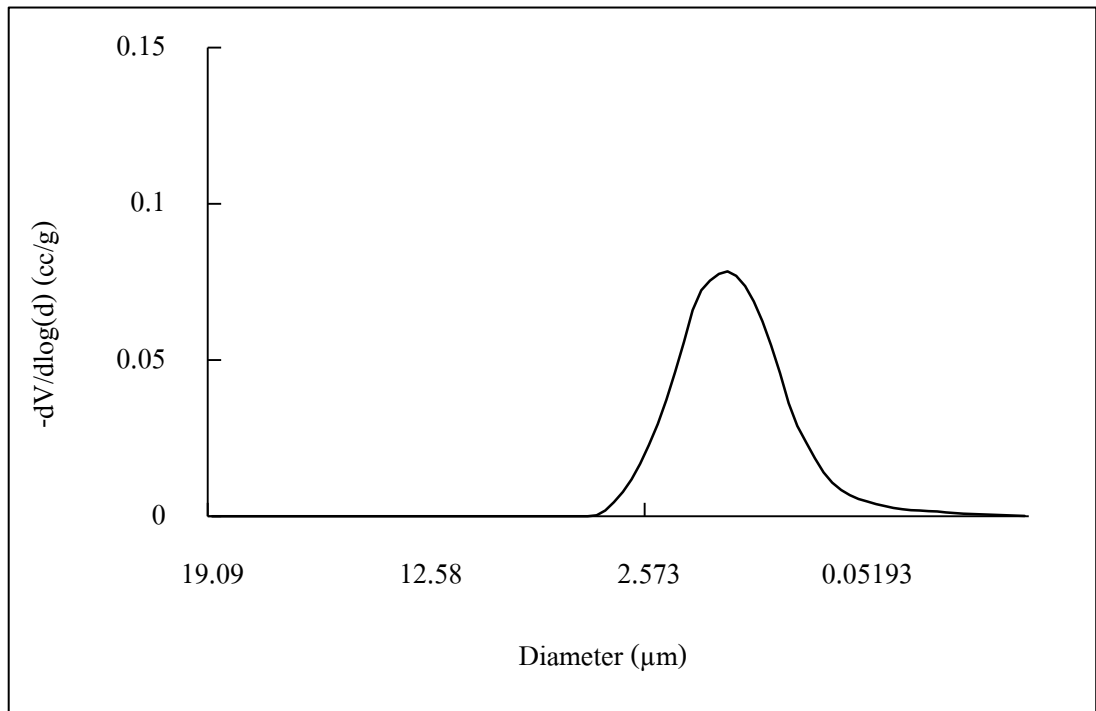
รูปที่ 4.15 ลักษณะรูพรุนที่พบในชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพ

4.2.2.2 ปริมาตรความพรุน

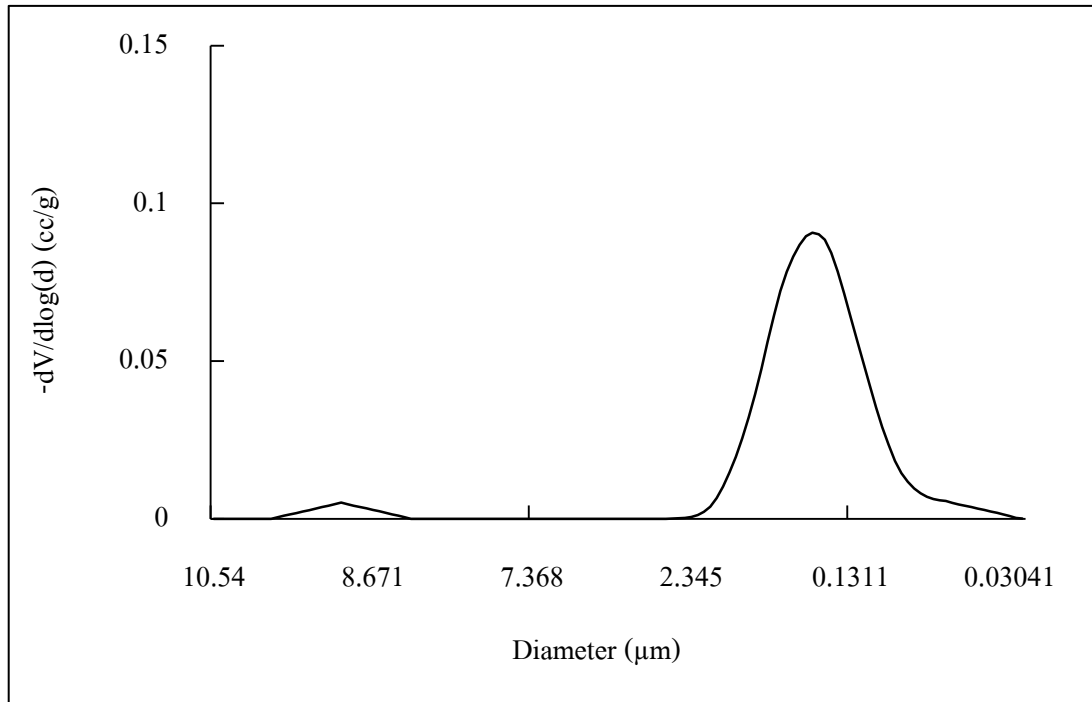
การวัดการกระจายขนาดรูพรุน ของชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพ หลังอบประสาน เมื่อพิจารณาชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 60 โดยปริมาตร พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 0.01-6.54 และ 8.14-10.5 ไมครอน โดยมีรูพรุนส่วนใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 ไมครอน และมีความพรุนตัวร้อยละ 31.69 เมื่อพิจารณาชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 40 โดยปริมาตร พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 0.03-10.29 ไมครอน โดยมีรูพรุนส่วนใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.23 ไมครอน และมีความพรุนตัวร้อยละ 28.69 และเมื่อพิจารณาชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 20 โดยปริมาตร พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 0.03-3.16 และ 8.38-9.71 ไมครอน โดยมีรูพรุนส่วนใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.26 ไมครอน และมีความพรุนตัวร้อยละ 25.7 ดังรูปที่ 4.16



(f)



(g)



(ค)

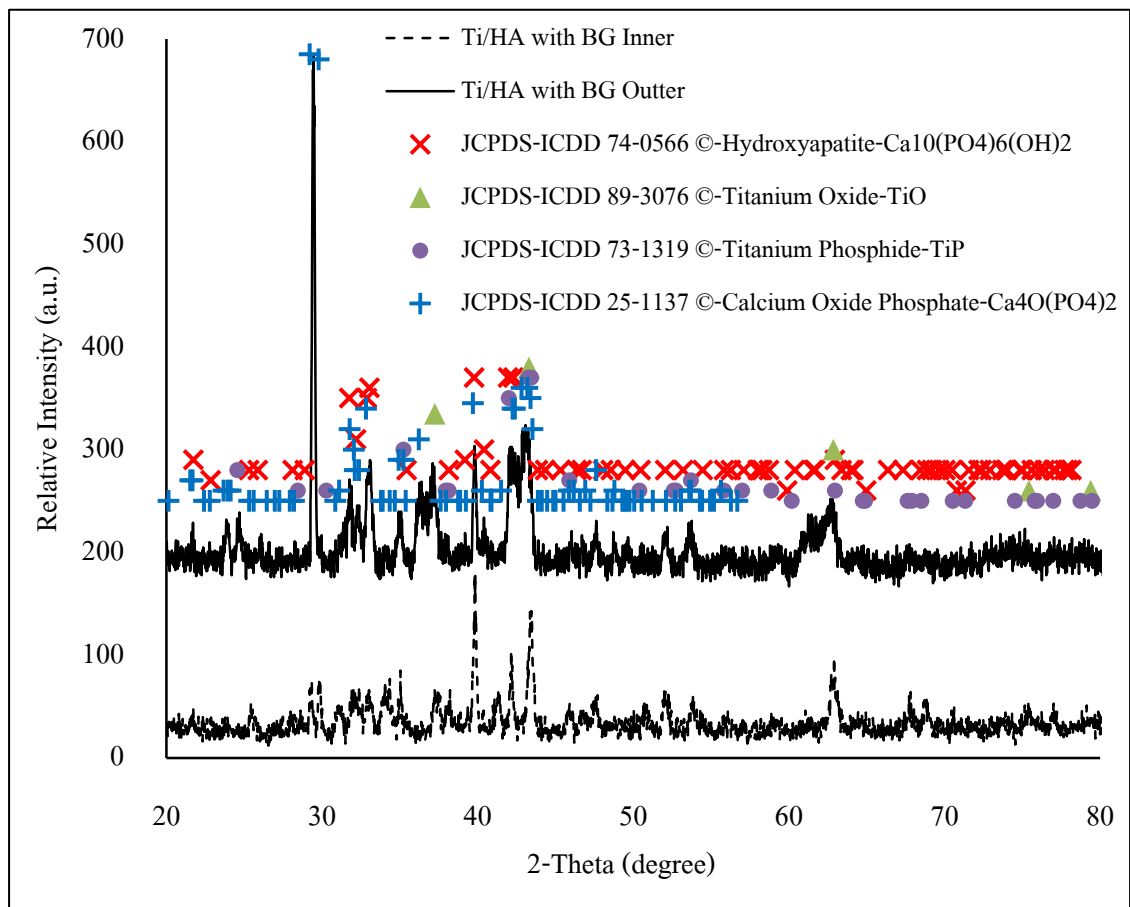
รูปที่ 4.16 ปริมาตรขนาดอนุภาคของผงซิงงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ และผงแก้วชีวภาพ หลังอบประสานที่อัตราส่วนต่างๆ

- (ก) ซิงงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร
- (ข) ซิงงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ร้อยละ 40 โดยปริมาตร
- (ค) ซิงงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

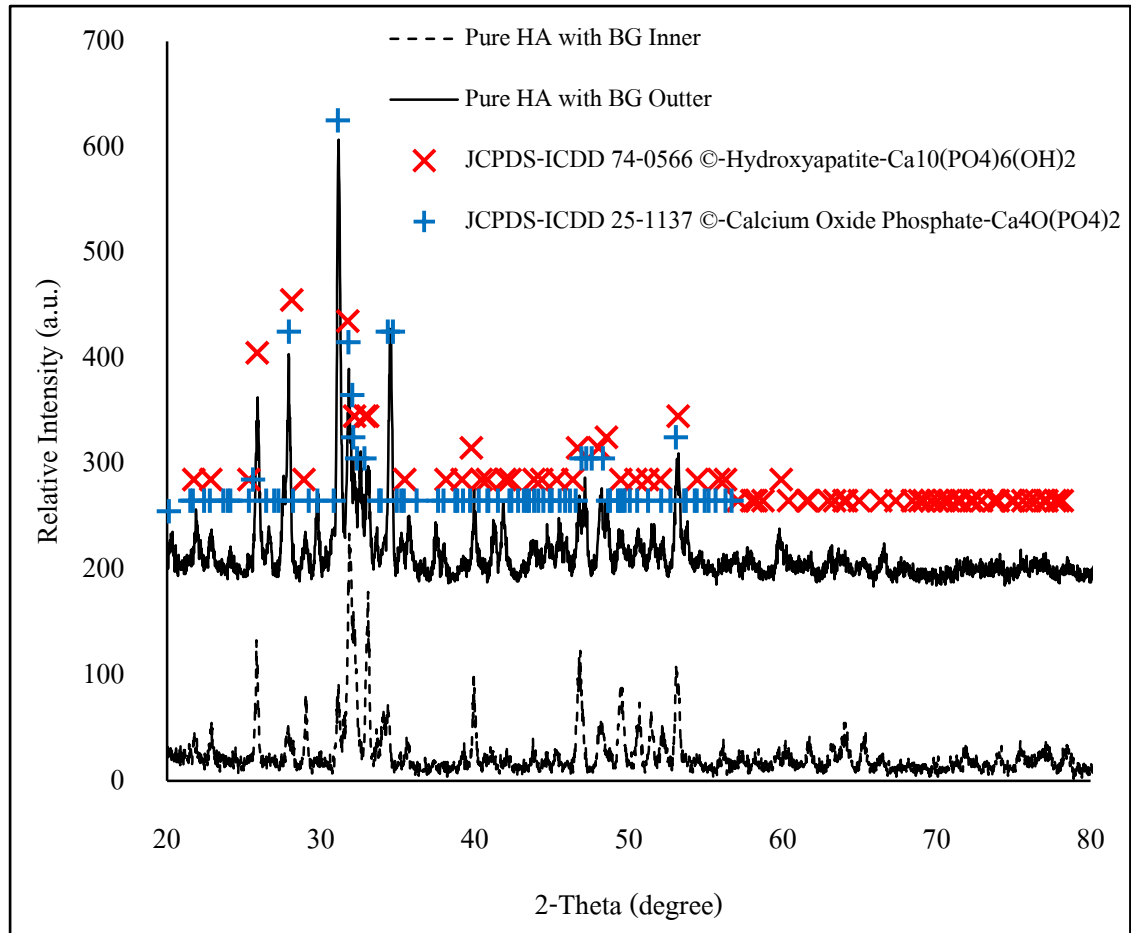
4.2.2.3 องค์ประกอบของซิงงาน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผงไทเทเนียมตั้งต้นที่ใช้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิงงานซิงงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทิต์ และผงแก้วชีวภาพ หลังอบประสานบริเวณภายนอก ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งเลี้ยวเบน 2θ ที่ 29, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 40, 42, 43, 48, 51, 53, 60 และ 62 องศา ตำแหน่งเหล่านี้ตรงกับข้อมูลจาก JCPDS-ICDD 74-0566 (C), 89-3076 (C), 73-1319 (C) และ 25-1137 (C) ของไฮดรอกซีแอปาทิต์ ไทเทเนียมออกไซด์ ไทเทเนียมฟอสเฟต และแคลเซียมออกไซด์ฟอสเฟตส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าบริเวณภายนอกซิงงานนี้ประกอบด้วยไฮดรอกซีแอปาทิต์ ไทเทเนียมออกไซด์ ไทเทเนียมฟอสเฟต และแคลเซียมออกไซด์ฟอสเฟต ดังรูปที่ 4.17 (ก) และบริเวณภายในประกอบด้วยตำแหน่งเลี้ยวเบน 2θ ที่ 29, 30, 40, 42, 43 และ 63 องศา ตำแหน่งเหล่านี้ตรงกับข้อมูลจาก JCPDS-ICDD 74-0566 (C) และ 89-3076 (C) ของไฮดรอกซีแอปาทิต์ และไทเทเนียมออกไซด์ส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าบริเวณภายในซิงงานนี้

ประกอบด้วย ไฮดรอกซีแอปาทิต์ และไทเทเนียมออกไซด์ ในส่วนของชั้นงานไฮดรอกซีแอปาทิต์ บริสุทธิ์พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์บริเวณผิวภายนอก และภายในชั้นงานประกอบด้วย ตำแหน่งเลี้ยวเบน 2θ ที่ 22, 26, 28, 31, 32, 33, 34, 38, 40, 42, 43, 47, 53 และ 60 องศา ตำแหน่งเหล่านี้ ตรงกับข้อมูลจาก JCPDS-ICDD 74-0566 (C) และ 25-1137 (C) ของไฮดรอกซีแอปาทิต์ และแคลเซียมออกไซด์ฟอสเฟตส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าบริเวณภายนอก และภายในชั้นงานนี้ประกอบด้วยไฮดรอกซีแอปาทิต์ และแคลเซียมออกไซด์ฟอสเฟต ดังรูปที่ 4.17 (ข)



(ก)

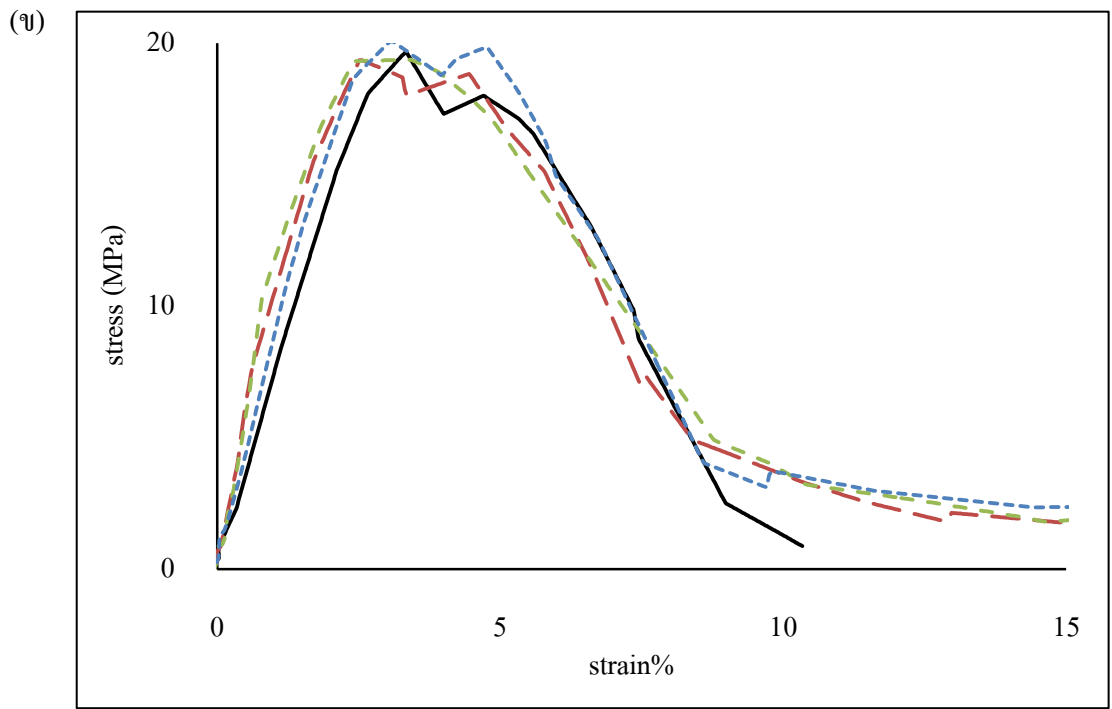
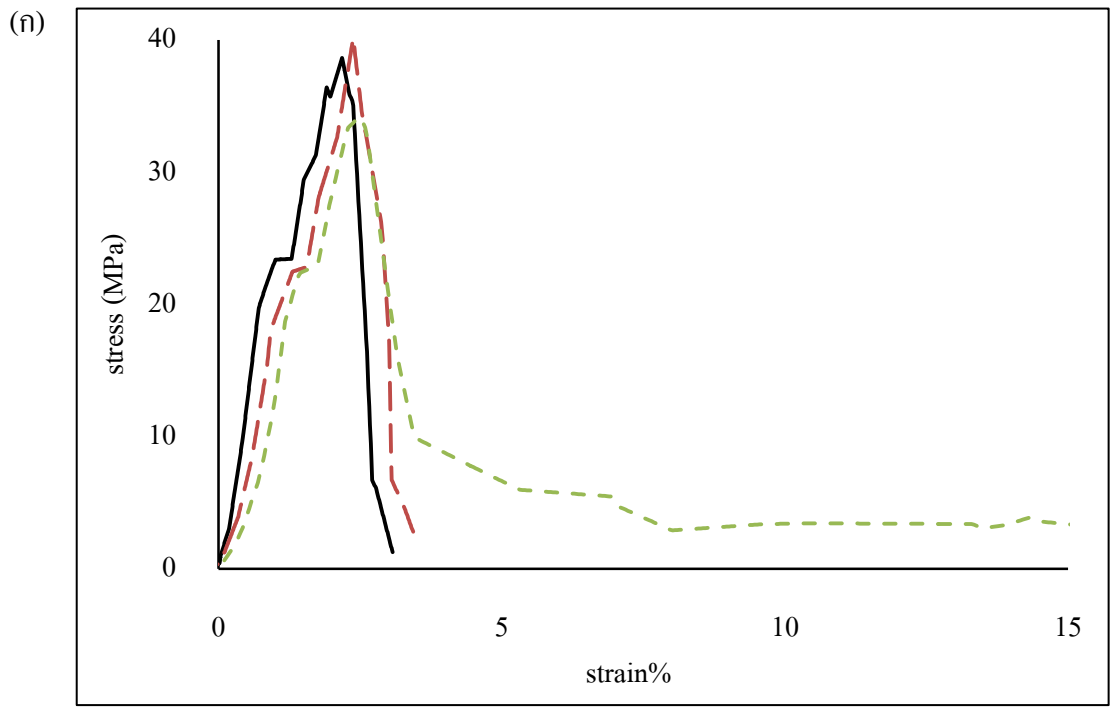


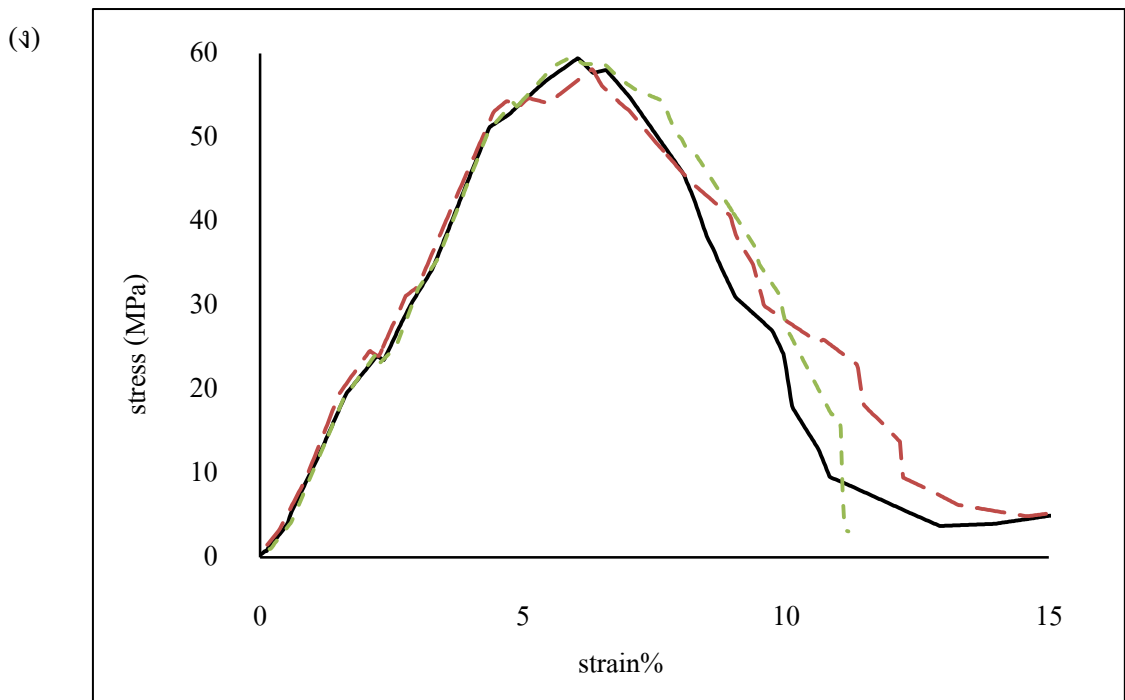
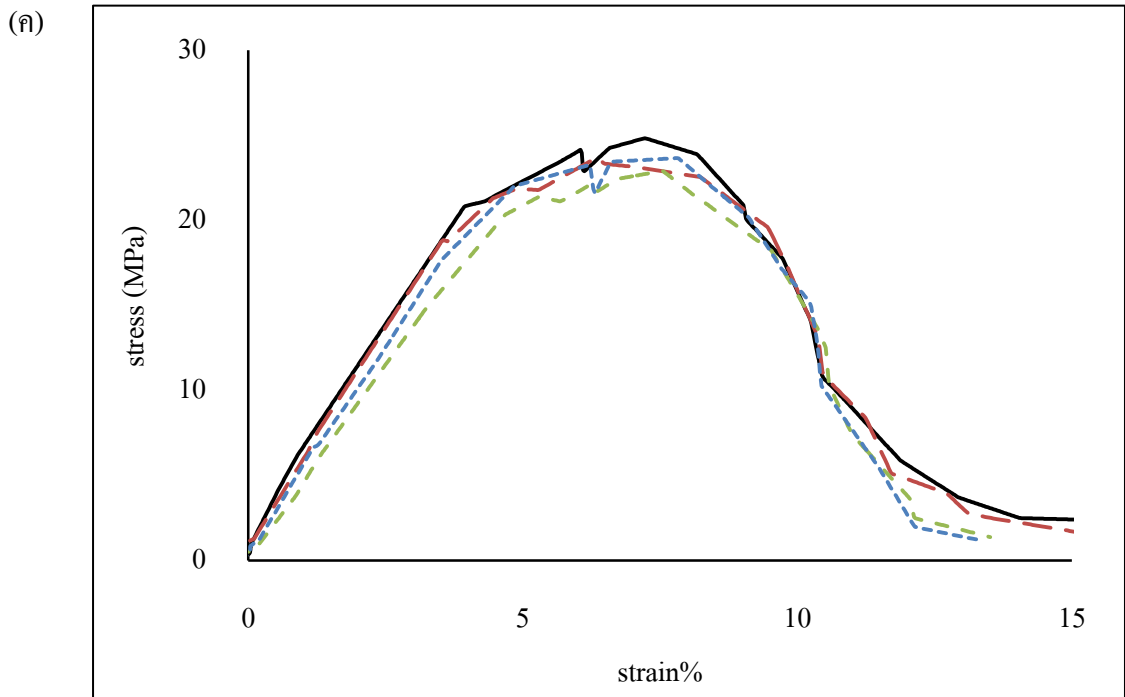
(ข)

- รูปที่ 4.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ภายนอก และภายในชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีเอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพหลังอบประสาน
- (ก) ไฮดรอกซีเอปาทาइटร้อยละ 60 โดยปริมาตร
- (ข) ไฮดรอกซีเอปาทาइटบริสุทธิ์

4.2.2.4 การทดสอบความต้านทานแรงกด

การทดสอบความต้านทานแรงกดสูงสุดของชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีเอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีเอปาทาइटร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยปริมาตร พบว่ากราฟความต้านทานแรงกดมีลักษณะฐานพีคกว้าง ยอดพีคโค้งมน มีรูปแบบไปในทิศทางเดียวกัน และไม่พบค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ และเมื่อลดอัตราส่วนไฮดรอกซีเอปาทาइटจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร พบว่าค่าความเค้นที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.18 (ข-ง) และเมื่อพิจารณาชิ้นงานไฮดรอกซีเอปาทาइटบริสุทธิ์ผสมผงแก้วชีวภาพ พบว่ากราฟความต้านทานแรงกดมีลักษณะฐานพีคแคบ ยอดพีคแหลม และไม่พบค่าช่วงที่ความเค้นคงที่ ดังรูปที่ 4.18 (ก)





รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट์ และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ

(ก) ชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาทาइट์บริสุทธิ์

(ข) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร

(ค) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट์ร้อยละ 40 โดยปริมาตร

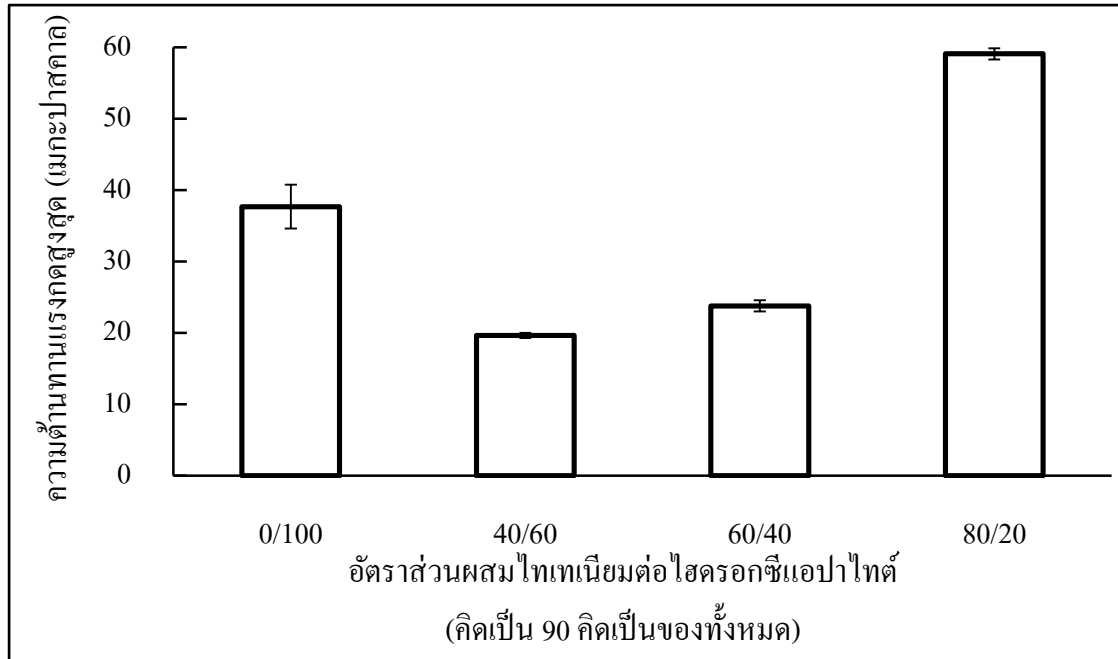
(ง) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปพาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ พบว่ามีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด และ ค่ามอดูลัสของยังอยู่ในช่วง 19.64-59.10 เมกะปาสคาล และ 0.68-1.61 กิกะปาสคาล ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งค่าสมบัติทางกลของโครงสร้างทดแทนกระดูกที่ผลิตได้นี้ มีค่าช่วงเดียวกับค่าสมบัติทางกลที่กระดูกธรรมชาติต้องการ คือ ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด และค่ามอดูลัสของยังอยู่ในช่วง 2-200 เมกะปาสคาล และ 0.1-20 กิกะปาสคาล ตามลำดับ [8, 9]

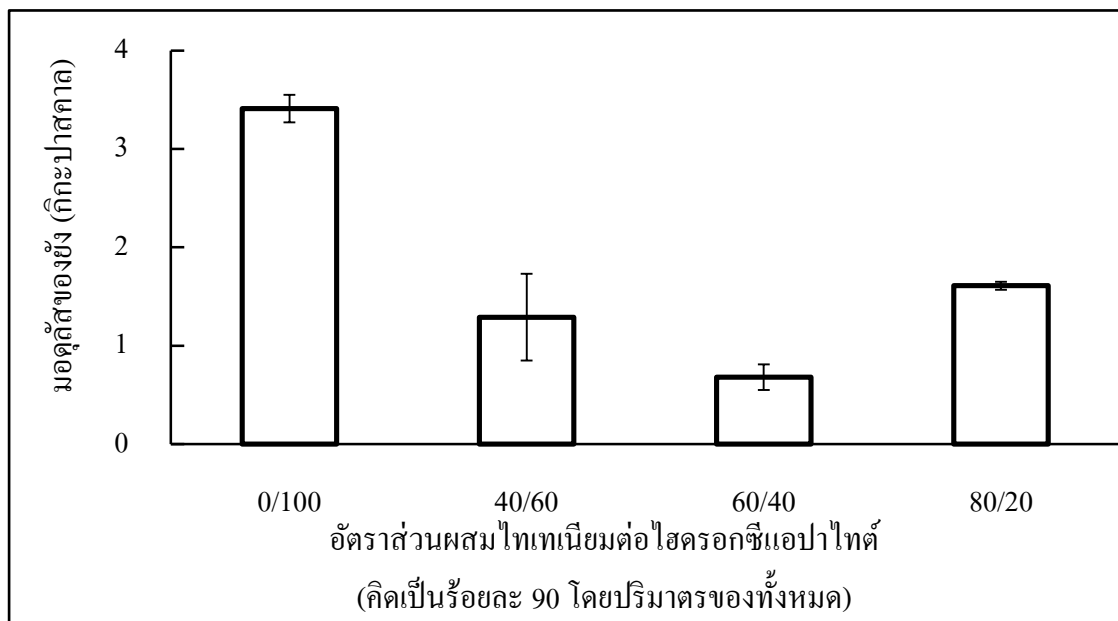
ตารางที่ 4.5 ค่าทดสอบความต้านทานแรงกดสูงสุดของชิ้นงานที่ผสมผงแก้วชีวภาพ หลังอบประสาน อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนผสม ไทเทเนียมต่อไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (คิดเป็นร้อยละ 90 โดยปริมาตรของทั้งหมด) ผสมผงแก้วชีวภาพ (คิดเป็นร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทั้งหมด)	ความต้านทานแรงกดสูงสุด (เมกะปาสคาล)	มอดูลัสของยัง (กิกะปาสคาล)
0/100	37.69 ± 3.07	3.41 ± 0.14
40/60	19.64 ± 0.35	1.29 ± 0.44
60/40	23.78 ± 0.79	0.68 ± 0.13
80/20	59.10 ± 0.80	1.61 ± 0.04

เมื่อพิจารณาแนวโน้มค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด และค่ามอดูลัสของยังของชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปพาไทต์ และผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปพาไทต์ร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยปริมาตร พบว่าเมื่ออัตราส่วนไฮดรอกซีแอปพาไทต์ลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.19 (ก) แต่เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสของยัง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออัตราส่วนไฮดรอกซีแอปพาไทต์ลดลง ดังรูปที่ 4.19 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดสูงสุดชิ้นงานไฟเบอร์ผสมไฮดรอกซีแอปาทิต

และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ

(ก) ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด

(ข) ค่านมอดุลัสของยัง

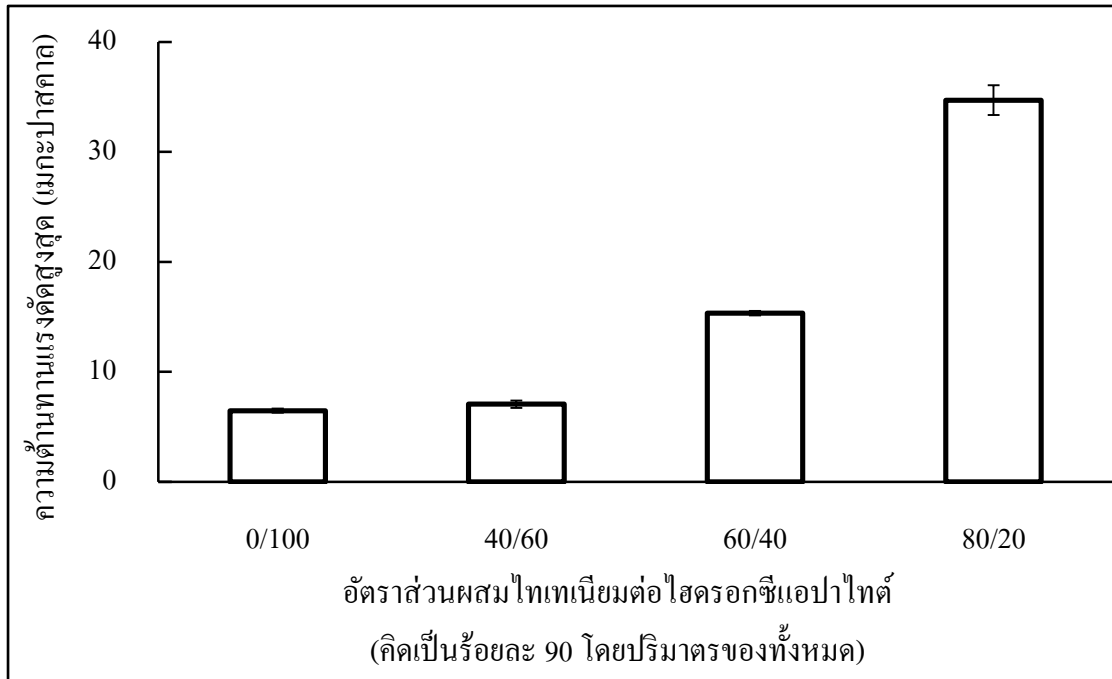
4.2.2.5 การทดสอบความต้านทานแรงดัด

ค่าการทดสอบความต้านทานแรงดัดชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพ พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด และค่ามอดุลัสของยังอยู่ในช่วง 7.06-34.70 เมกะปาสคาล และ 1.62-5.79 กิกะปาสคาล ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งค่าสมบัติทางกลของโครงร่างทดแทนกระดูกที่ผลิตได้นี้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าสมบัติทางกลที่กระดูกธรรมชาติต้องการ คือ ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด และค่ามอดุลัสของยังอยู่ในช่วง 103-238 เมกะปาสคาล และ 0.1-20 กิกะปาสคาล ตามลำดับ [8, 9, 10, 11]

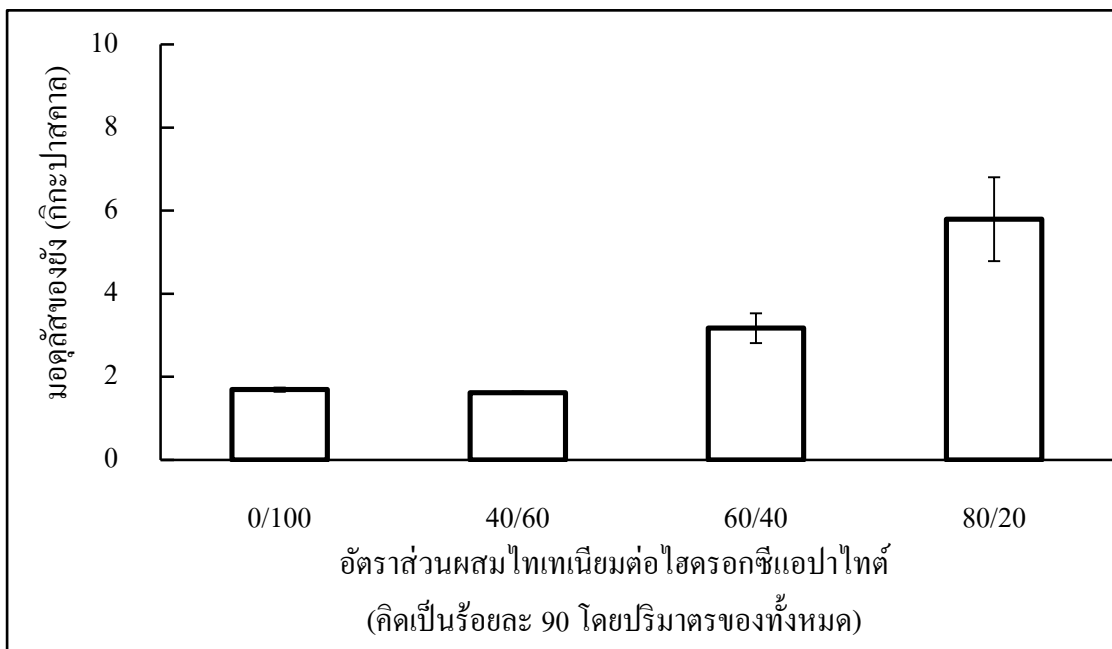
ตารางที่ 4.6 ค่าทดสอบความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชิ้นงานที่ผสมผงแก้วชีวภาพ หลังอบประสาน อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนผสม ไทเทเนียมต่อไฮดรอกซีแอปาทาइट (คิดเป็นร้อยละ 90 โดยปริมาตรของทั้งหมด) ผสมผงแก้วชีวภาพ (คิดเป็นร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทั้งหมด)	ความต้านทานแรงดัดสูงสุด (เมกะปาสคาล)	มอดุลัสของยัง (กิกะปาสคาล)
0/100	6.47±0.18	1.69±0.05
40/60	7.06±0.33	1.62±0.03
60/40	15.33±0.21	3.17±0.36
80/20	34.70±1.35	5.79±1.01
100/0	431.29±18.17	17.62±2.31

เมื่อพิจารณาแนวโน้มค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด และค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट และผงแก้วชีวภาพ ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइटร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยปริมาตร พบว่าเมื่ออัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาทาइटลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด และค่ามอดุลัสของยังที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.20



(ก)

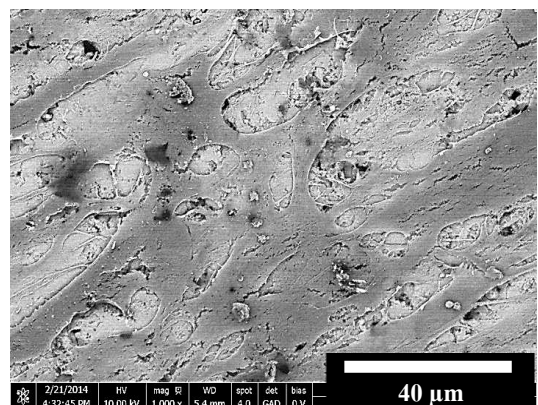
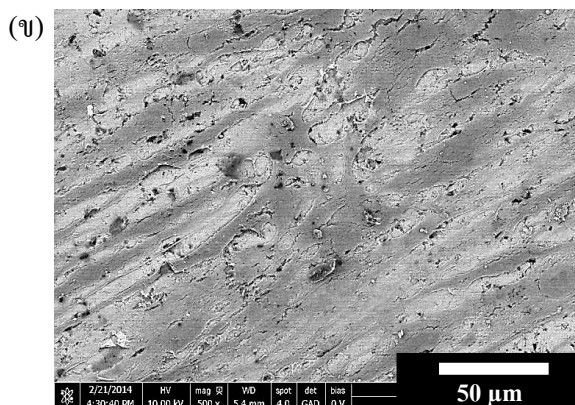
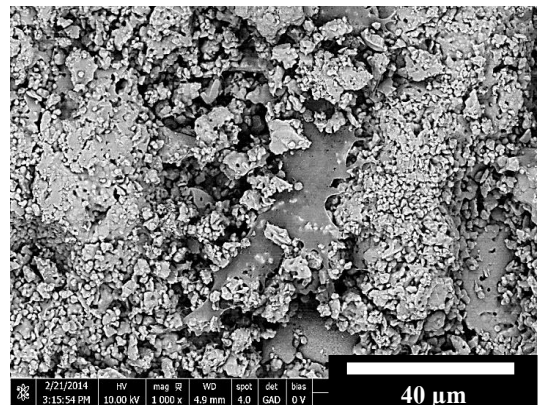
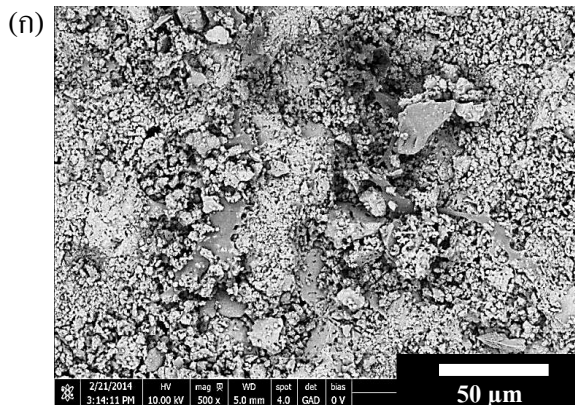


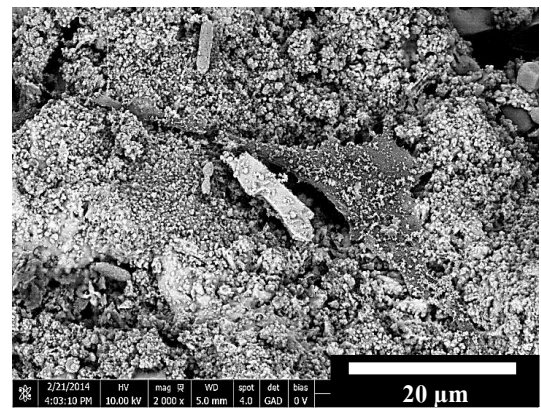
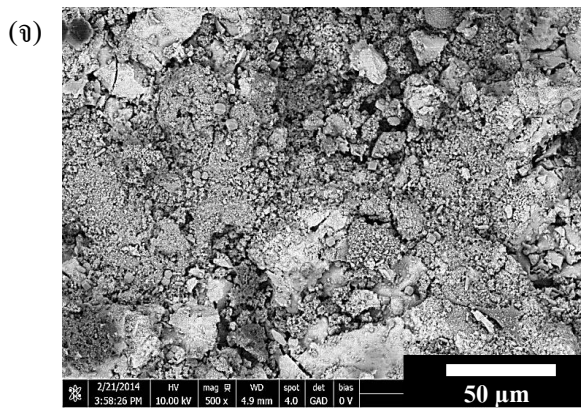
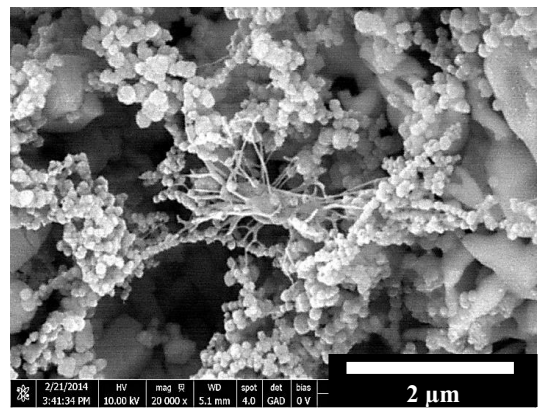
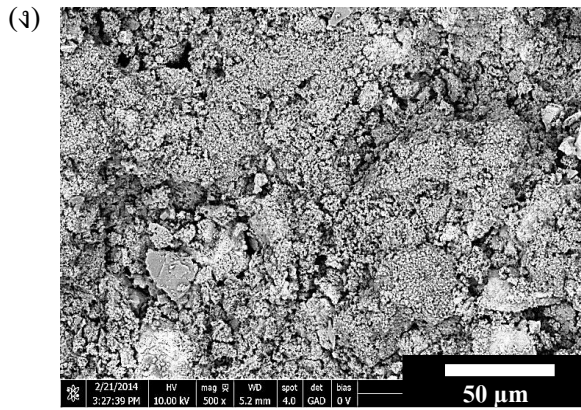
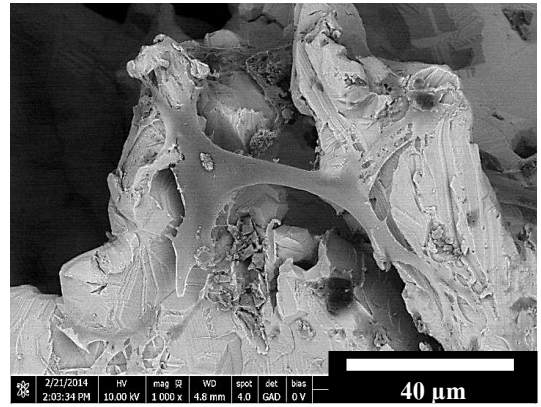
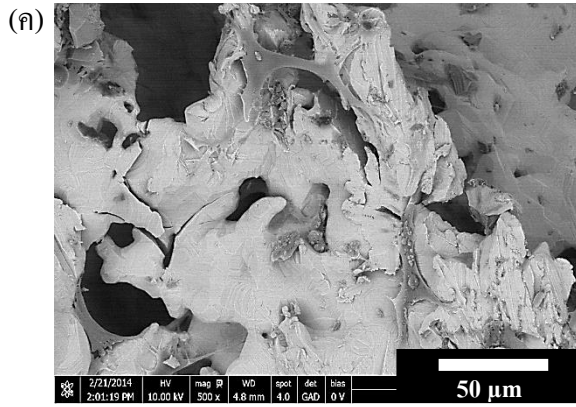
(ข)

รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดสูงสุดชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีเอปาทิต และผงแก้วชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ
(ก) ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด
(ข) ค่ามอดุลัสของยัง

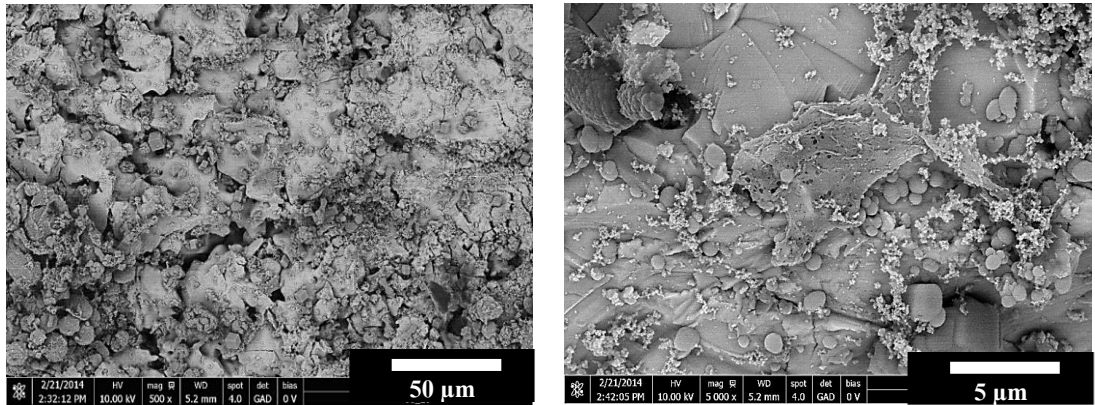
4.3 การทดสอบความเข้ากันทางชีวภาพ

การทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของเซลล์กระดูกต่อพื้นผิววัสดุที่ผลิตขึ้นนั้น จะทำการศึกษาผลที่ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อประเมินผลการยึดเกาะ และความสมบูรณ์ของเซลล์ จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะตัวอย่างเซลล์กระดูกที่มีการยึดเกาะไม่สมบูรณ์ และเซลล์กระดูกที่มีการยึดเกาะสมบูรณ์ โดยจากการทดสอบความเข้ากันทางชีวภาพของชิ้นงานไทเทเนียมผสมไฮดรอกซีแอปพาไทด์ และผงแก้วชีวภาพ เมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายต่ำหลังเลี้ยงเซลล์กระดูกชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปพาไทด์ร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยปริมาตร ไม่สามารถตรวจพบเซลล์กระดูกบนพื้นผิวชิ้นงาน แต่เมื่อพิจารณาภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงสามารถตรวจพบเซลล์ โดยลักษณะเซลล์กระดูกที่พบมีขนาดเล็ก มีลักษณะไม่สมบูรณ์ มีรูปร่างและขนาดเปลี่ยนแปลงไปจากเซลล์ปกติ และมีการยึดเกาะที่ไม่ดีกับผิวชิ้นงาน ดังรูป 4.21 (ง-จ) แต่เมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายต่ำของชิ้นงานไทเทเนียมบริสุทธิ์ ไฮดรอกซีแอปพาไทด์ผสมผงแก้วชีวภาพ และไทเทเนียมที่มีความพรุน สามารถตรวจพบเซลล์กระดูกบนพื้นผิวชิ้นงานได้ โดยลักษณะเซลล์กระดูกที่พบมีขนาดใหญ่ และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยายสูง พบว่าเซลล์กระดูกมีรูปร่าง และขนาดใกล้เคียงเซลล์ปกติ มีการยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี และมีส่วนที่ยื่นออกมาจากเซลล์คล้ายนิ้วมือ (Filopodia) ดังรูปที่ 4.21 (ก-ค)





(ฉ)



- รูปที่ 4.21** การยึดเกาะของเซลล์กระดูก หลังจากเลี้ยงเซลล์กระดูกบนผิวชิ้นงานเป็นเวลา 7 วัน
 ที่กำลังขยายต่ำ (ซ้าย) และที่กำลังขยายสูง (ขวา)
- (ก) ชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาทาइटบริสุทธิ์ และผงแก้วชีวภาพ
- (ข) ชิ้นงานไทเทเนียมบริสุทธิ์
- (ค) ชิ้นงานไทเทเนียมที่มีความพรุน
- (ง) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट 60 โดยปริมาตร และผงแก้วชีวภาพ
- (จ) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट 40 โดยปริมาตร และผงแก้วชีวภาพ
- (ฉ) ชิ้นงานไทเทเนียมที่ผสมไฮดรอกซีแอปาทาइट 20 โดยปริมาตร และผงแก้วชีวภาพ