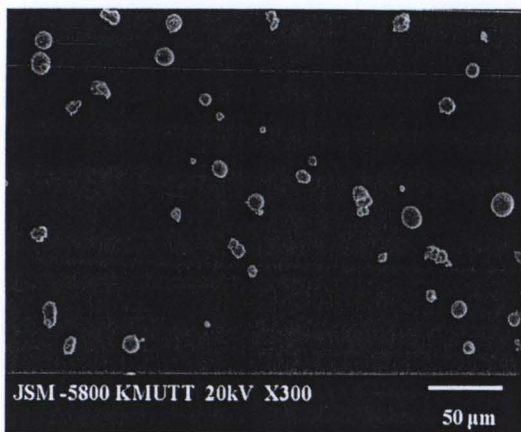


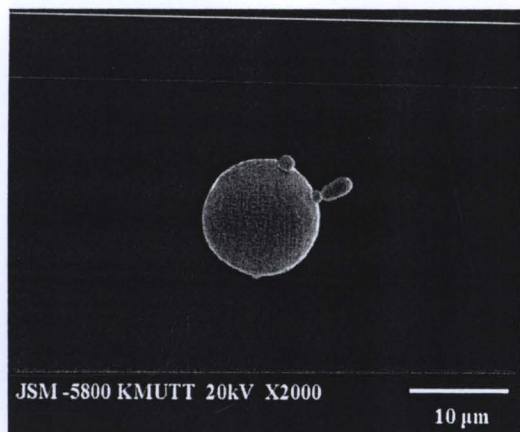
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของผงโลหะ

ลักษณะของผงทองแดงที่ได้จากกระบวนการอะตอมไมเซชัน ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 450 ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 300 เท่า และ 2,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.1 มีลักษณะเป็นก้อนกลมและมีขนาดอยู่ในช่วง 2–15 ไมโครเมตร ลักษณะของผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ (WC) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 8,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2 มีลักษณะเป็นก้อนเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และลักษณะของผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ร้อยละ 12 โดยมวล (WC-12Co) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 300 เท่า และ 2,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.3 มีลักษณะเป็นก้อนกลม มีขนาดอยู่ในช่วง 0.6 – 30 ไมโครเมตร



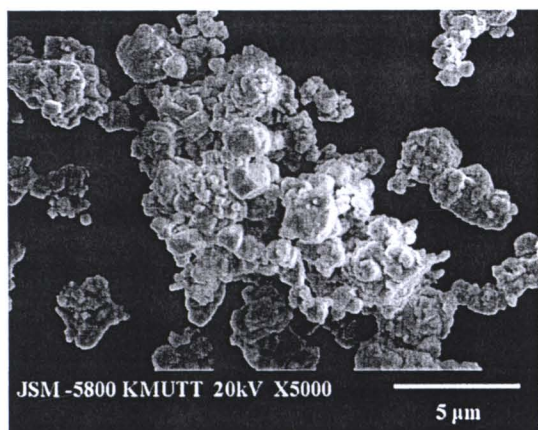
(ก)



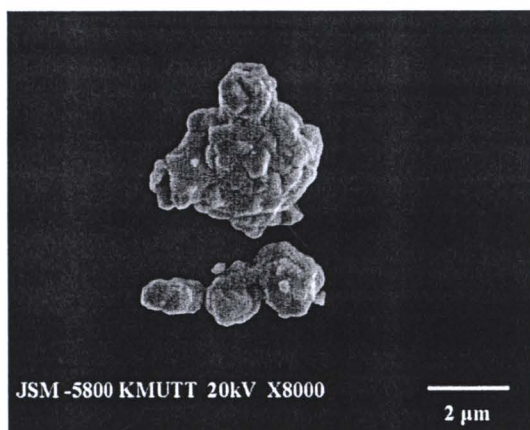
(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะของผงทองแดงถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

(ก) กำลังขยาย 300 เท่า (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า



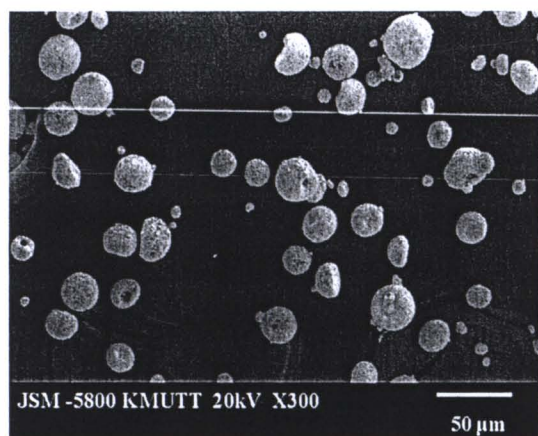
(ก)



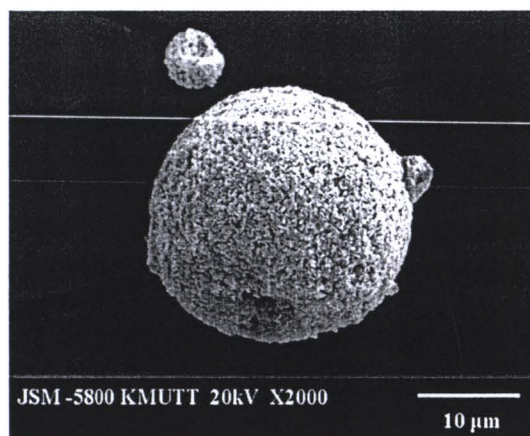
(ข)

รูปที่ 4.2 ลักษณะผงทังสเตนคาร์ไบด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 8,000 เท่า



(ก)

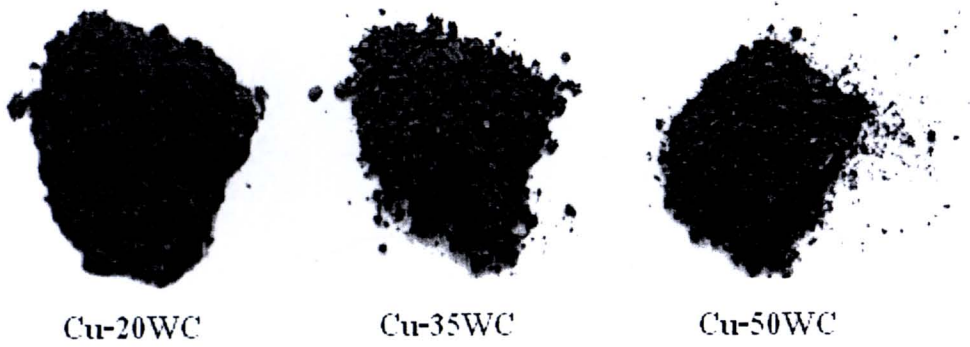


(ข)

รูปที่ 4.3 ลักษณะของผง WC-12Co ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

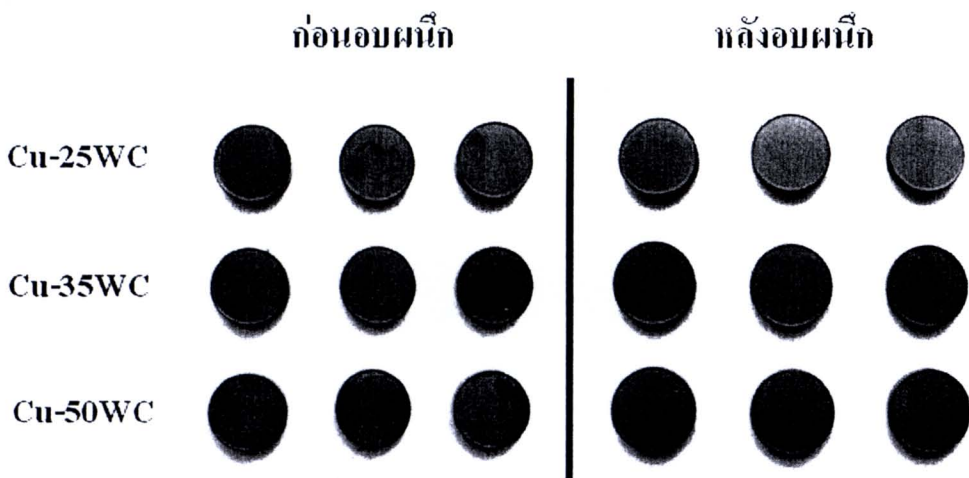
(ก) กำลังขยาย 300 เท่า (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า

ลักษณะของผงโลหะที่ได้จากการผสมผงทองแดงกับผงทังสเตนคาร์ไบด์ และผสมผงทองแดงกับผง WC-12Co ด้วยสัดส่วน 80:20, 65:35 และ 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่าผงที่ทำการผสมนั้นมีสีน้ำตาลแดง และมีสีเข้มขึ้นเมื่อปริมาณของทังสเตนคาร์ไบด์ หรือ WC-12Co เพิ่มขึ้น ลักษณะทางกายภาพของผงทองแดงผสมกับผงทังสเตนคาร์ไบด์ผสมร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 4.4



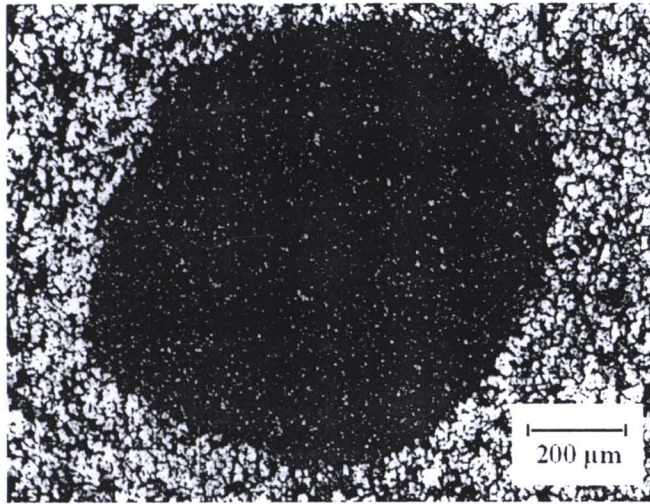
รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของผงทองแดงผสมกับทังสเตนคาร์ไบด์ที่สัดส่วนต่างกัน

ชิ้นงานของผงหลังอัดขึ้นรูปและอบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.5 ชิ้นงานที่ได้หลังจากอัดขึ้นรูป (ก่อนอบผนึก) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร สีของชิ้นงานหลังผ่านการอบผนึก ชิ้นงาน Cu-20WC มีสีเหลืองอมส้ม และเข้มขึ้นเมื่อปริมาณ WC เพิ่มขึ้น

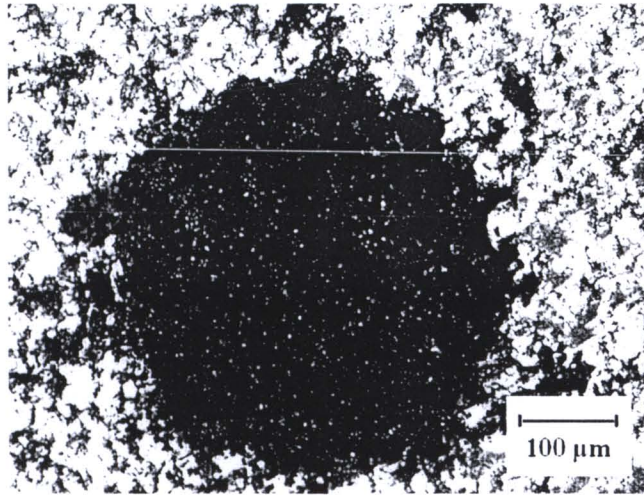


รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังผ่านการอบผนึก

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงาน Cu-WC ที่ผสมผงด้วยเครื่องกลึงแนวนอน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ชิ้นงาน Cu-35WC และ Cu-50WC หลังผ่านการอบผนึก มีการกระจายตัวไม่ค่อยสม่ำเสมอ และมีกลุ่มของทังสเตนคาร์ไบด์ (บริเวณพื้นที่สีดำ) บนผิวของชิ้นงานอย่างเด่นชัด ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการผสมผง Cu-WC ทุกส่วนผสมใหม่เป็นเวลา 9 ชั่วโมง โดยใส่ลูกบดช่วยในการผสม พบว่า มีการกระจายตัวของผงดีขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 ลักษณะการกระจายตัวของผง WC ในชิ้นงาน Cu-WC ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

(ก) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Cu-35WC ใช้กำลังขยายเลนส์วัตถุ 5 เท่า

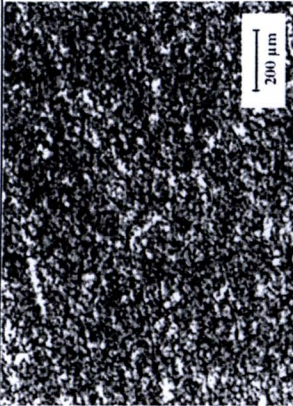
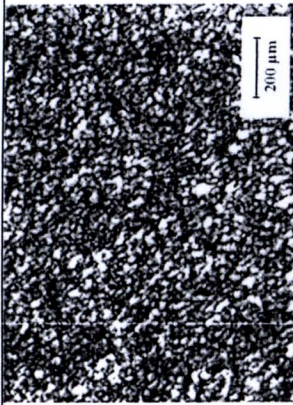
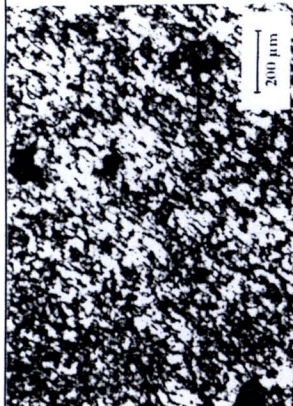
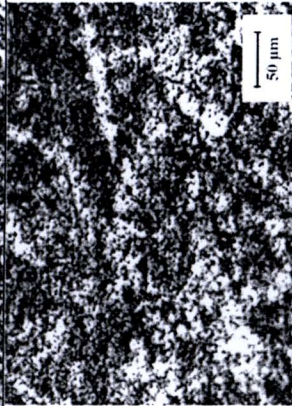
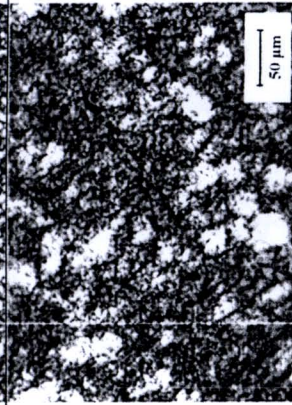
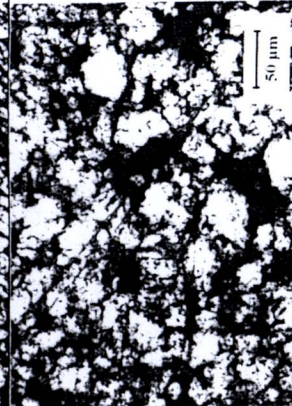
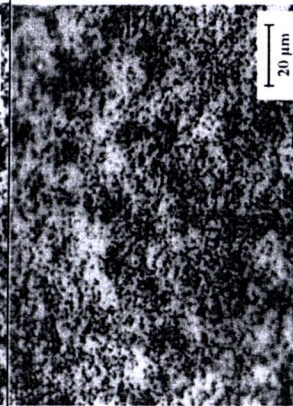
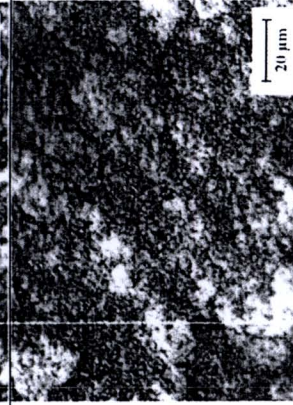
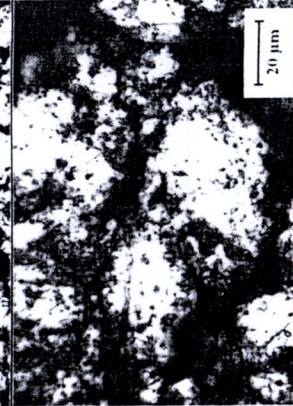
(ข) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Cu-50WC ใช้กำลังขยายเลนส์วัตถุ 10 เท่า

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงาน Cu-WC ที่ผสมผงโดยใช้ลูกบดเป็นตัวช่วยในการผสม หลังการอบผึ่งแห้ง แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า บริเวณพื้นที่เห็นสีขาวคือทองแดง และบริเวณสีดำคือทั้งสเตนคาร์ไบด์ ชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-35WC มีลักษณะการกระจายตัวของผงทั้งสเตนคาร์ไบด์บนโลหะพื้นทองแดงอย่างสม่ำเสมอ ส่วนชิ้นงาน Cu-50WC มีการจับเป็นกลุ่มก้อนของทั้งสเตนคาร์ไบด์บ้างบางบริเวณ ขณะที่โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ดังตารางที่ 4.2 โดยบริเวณพื้นสีขาวคือ Cu และ บริเวณสีดำคือ WC-12Co ซึ่งมีการ

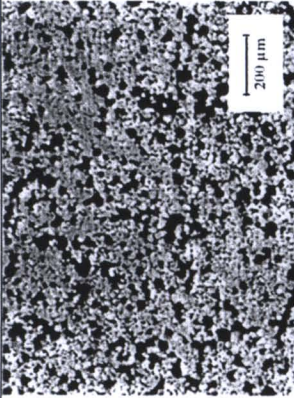
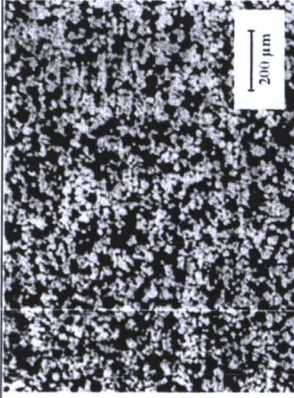
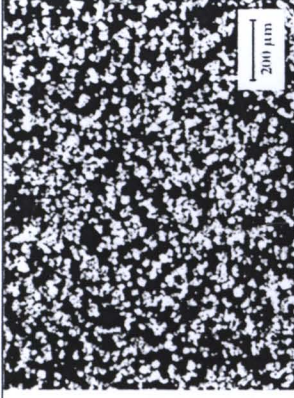
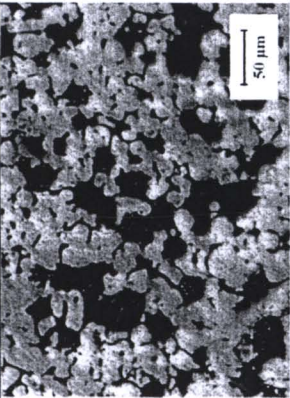
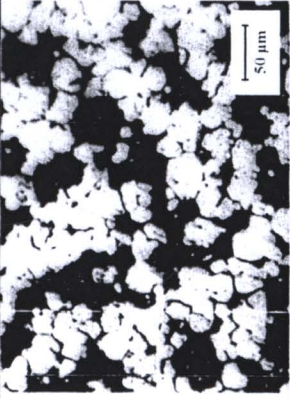
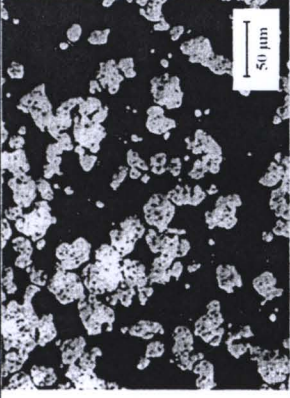
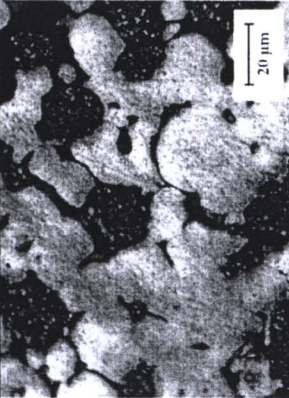
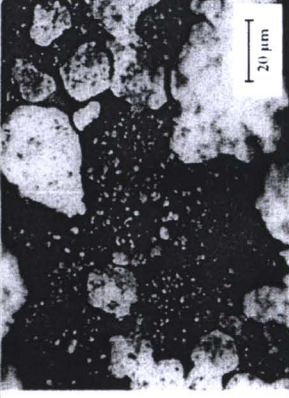
กระจายตัวของ Cu-20(WC-12Co) อย่างสม่ำเสมอทุกส่วนผสม จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่า การเพิ่มเวลาและเติมลูกบดเพื่อช่วยในการผสมนั้นช่วยให้การกระจายตัวของ WC มีการกระจายตัวดีขึ้นแต่ยังมีการเกาะกลุ่มของ WC ในชิ้นงาน Cu-50WC

จากการศึกษางานวิจัยของ Rajkovic และ คณะ [35] พบว่าหลังจากทำการบดผสมชิ้นงาน Cu-2Al และ Cu-4Al₂O₃ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีการกระจายตัวของอนุภาค Al และ Al₂O₃ บนพื้นทองแดงอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเวลาทำการบดผสมเพิ่มขึ้นเป็น 20 ชั่วโมง ขนาดของอนุภาค Al มีขนาดเล็กลงในระดับนาโน ทำให้ค่าความแข็งจุลภาคของ Cu-2Al มีค่าความแข็งสูงกว่า ค่าความแข็งจุลภาคของ Cu-4Al₂O₃ แต่ขนาดอนุภาคของ Al₂O₃ อยู่ในระดับไมโครเมตร จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของ Cu-4Al₂O₃ สูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าของ Cu-2Al นอกจากนี้มีงานวิจัยของ Venugopal และคณะ [36] พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโน (Nanocomposites) ของ Cu-Ta ซึ่งเตรียมด้วยวิธี High-Energy Ball Mill มีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งของวัสดุเชิงประกอบระดับไมครอน (Microcomposites) นั้นหมายความว่า การกระจายตัวของผงและขนาดของอนุภาคผงที่ใช้มีผลต่อการนำไฟฟ้าและความแข็งของชิ้นงาน โดยผงที่มีขนาดเล็กนำไฟฟ้าดีกว่าผงที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากผงที่มีขนาดเล็กสามารถกระจายตัวและผสมคลุกเคล้าได้ดีกว่าผงที่มีขนาดใหญ่

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Cu-WC ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

กำลังขยาย	Cu-20WC	Cu-35WC	Cu-50WC
5x			
20x			
50x			

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

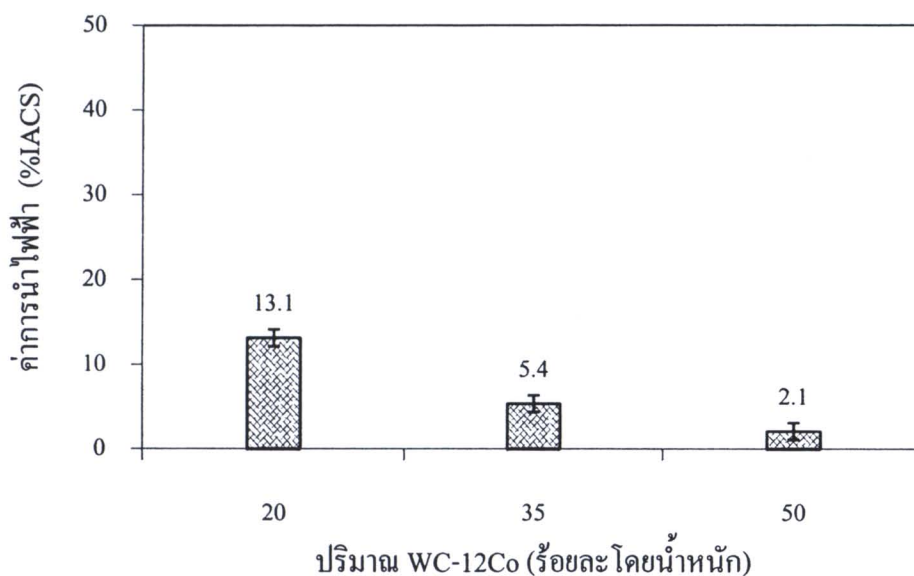
กำลังขยาย	Cu-20(WC12Co)	Cu-35(WC12Co)	Cu-50(WC12Co)
5x			
20x			
50x			



4.2 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co)

4.2.1 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co)

ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ไม่ผ่านการทุบแปรรูป ที่สัดส่วน WC-12Co ร้อยละ 25, 50 และ 75 แสดงดังรูปที่ 4.7 ชิ้นงาน Cu-20(WC-12Co) มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 13.1 %IACS ชิ้นงาน Cu-35(WC-12Co) มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 5.4 %IACS และชิ้นงาน Cu-50(WC-12Co) มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 2.1 %IACS

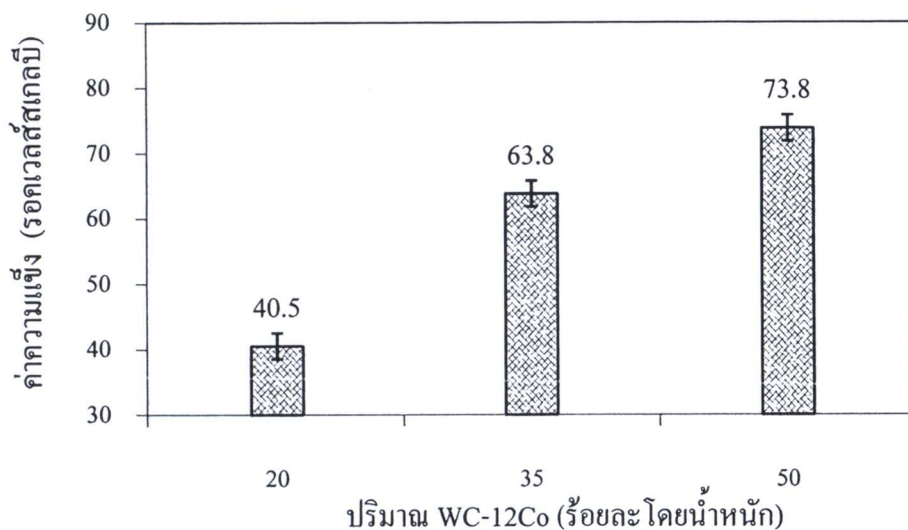


รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผืนึก

จากผลการทดลองเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณ WC-12Co เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคผงของ WC-12Co นำไฟฟ้าได้น้อย และการกระจายตัวของผง WC-12Co บนพื้นทองแดงส่งผลให้เกิดขีดขวางการส่งผ่านอิเล็กตรอนของทองแดงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Findik และ Uzun [11] พบว่า เมื่อปริมาณของ W เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง โดยโลหะผสม Ag-15W และ Ag-70W มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 87 และ 48 %IACS ตามลำดับ ดังนั้นการเติม WC-12Co ในปริมาณที่มากขึ้นและการเติมธาตุผสมที่ต่างชนิดกันส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเป็นไปตามหลักการโดยทั่วไปของการเติมธาตุผสมจะทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าลดลง [6]

4.2.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co)

ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ไม่ผ่านการทุบแปรรูป ที่สัดส่วนของ WC-12Co ร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8 ชิ้นงาน Cu-20(WC-12Co) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 40.5 รอคเวสต์สเกลปี ชิ้นงาน Cu-35(WC-12Co) มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 63.8 รอคเวสต์สเกลปี และ ชิ้นงาน Cu-50(WC-12Co) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 73.8 รอคเวสต์สเกลปี

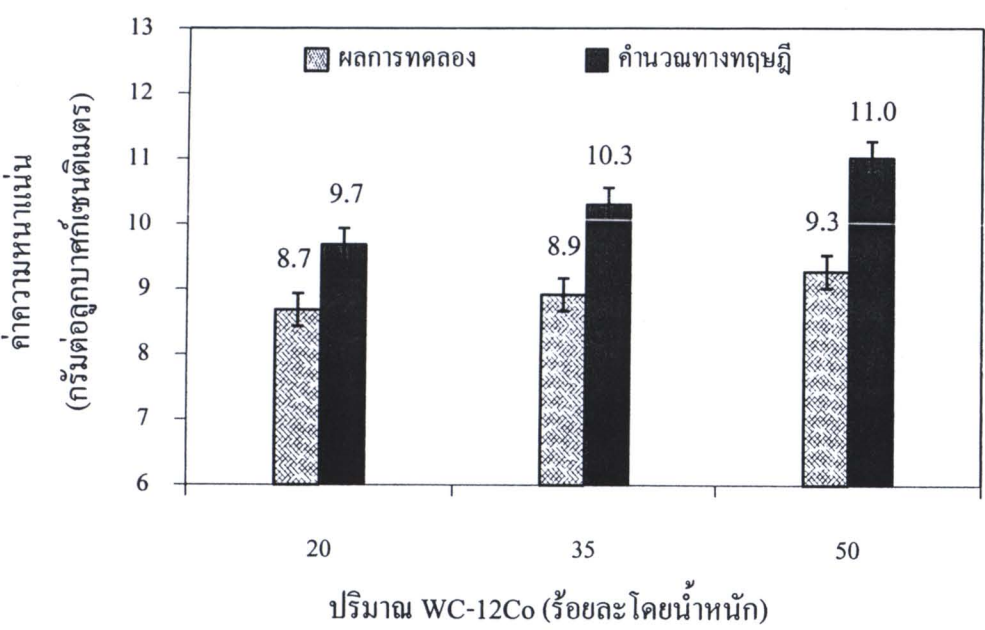


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ในสัดส่วนต่างกันหลังอบพ่น

จากผลการทดลองเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณ WC-12Co เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคผงของ WC-12Co มีความแข็งสูง เมื่อกระจายตัวของผง WC-12Co ในโครงสร้างพื้นของทองแดงมากขึ้นส่งผลให้เกิดขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้เคลื่อนที่ได้ยาก นอกจากนี้ยังมีผลมาจากสองประการต่อความแข็งของวัสดุคือ (หนึ่ง) อนุภาค WC-12Co เกยสัมผัสกัน (Bridging) และ (สอง) จำนวนอนุภาค WC-12Co ที่สัมผัสกับหัวกดของเครื่องทดสอบความแข็งมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งผลของสองปรากฏการณ์นี้ทำให้ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) ระหว่างทองแดงกับ WC-12Co มีความแข็งมากขึ้น

4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co)

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นและผลการคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ไม่ผ่านการทุบแปรรูป ที่สัดส่วน WC-12Co ร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าผลที่ได้จากการทดลองของชิ้นงาน Cu-20(WC-12Co) มีค่าความหนาแน่น 8.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชิ้นงาน Cu-35(WC-12Co) มีค่าความหนาแน่น 8.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงาน Cu-50(WC-12Co) มีค่าความหนาแน่น 9.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ WC-12Co เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก WC-12Co เป็นโลหะหนักมีค่าความหนาแน่นและมวลมาก จึงทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น



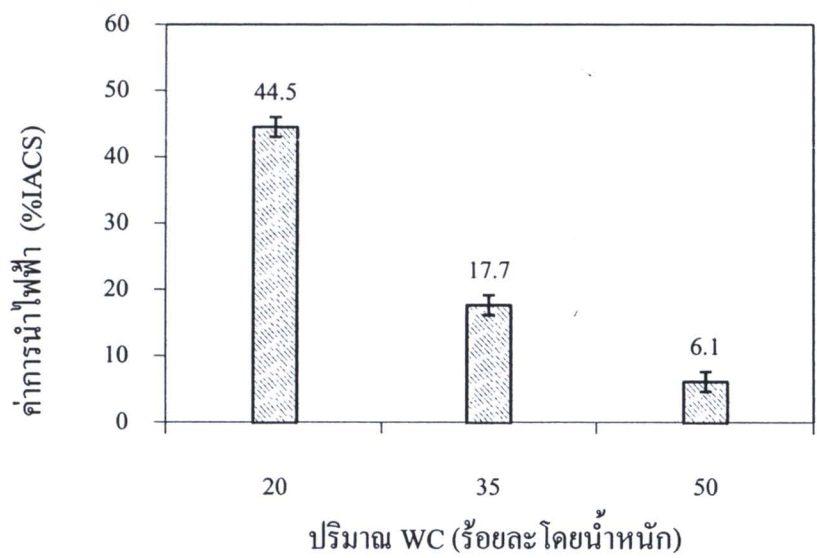
รูปที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนึก

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองกับค่าความหนาแน่นที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งมีสาเหตุมาจากชิ้นงานยังมีรูพรุนตกค้างภายในหลังจากอบผนึก

4.3 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน Cu-WC

4.3.1 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-WC

ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-WC ที่ไม่ผ่านการทุบแปรรูปที่ส่วนผสม WC ร้อยละ 20, 35 และ 50 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-20WC มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 44.5 %IACS ชิ้นงาน Cu-35WC มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 17.7 %IACS และชิ้นงาน Cu-50WC มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 6.1 %IACS เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ WC เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก WC มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 8.9 %IACS เมื่อเพิ่มปริมาณ WC เพิ่มจึงทำให้การนำไฟฟ้าลดลง

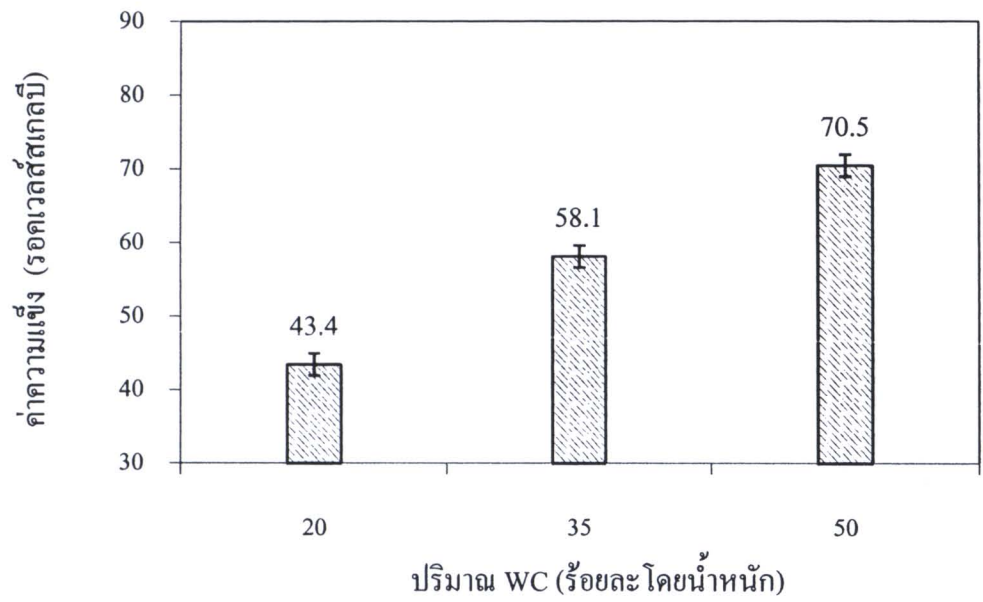


รูปที่ 4.10 ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-WC ในสัดส่วนต่างกันหลังอบพ่น

เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-WC กับชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ในสัดส่วนเท่ากัน พบว่า ชิ้นงาน Cu-WC มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงาน Cu-(WC-12Co) ทุกสัดส่วนที่ผสม

4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Cu-WC

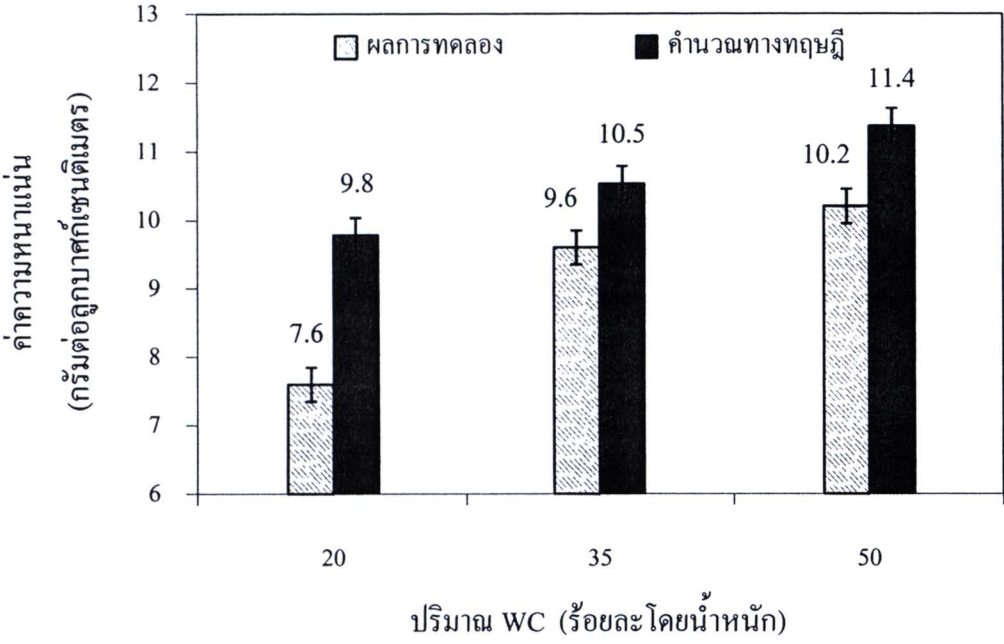
ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Cu-WC ที่ไม่ผ่านการทุบแปรรูปที่ส่วนผสมต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า ชิ้นงาน Cu-20WC มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 43.4 รอคเวลส์สเกลบี ชิ้นงาน Cu-35WC มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 58.1 รอคเวลส์สเกลบี และชิ้นงาน Cu-50WC มีค่าความแข็งเฉลี่ย 70.5 รอคเวลส์สเกลบี เห็นได้ว่า เมื่อปริมาณ WC เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Cu-(WC-12Co)



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-WC ในสัดส่วนต่างกันหลังอบพ่นิก

4.3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-WC

ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-WC ในสัดส่วนที่แตกต่างกันหลังอบพ่นิกไม่ผ่านการทุบขึ้นรูป แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-20WC มีค่า 7.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชิ้นงาน Cu-35WC มีค่าความหนาแน่นที่ 9.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงาน Cu-50WC มีค่าความหนาแน่นที่ 10.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ WC เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบความหนาแน่นมีแนวโน้มเดียวกับชิ้นงาน Cu-(WC-12Co)



รูปที่ 4.12 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-WC ในสัดส่วนต่างกันหลังอบผนิก

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองกับค่าความหนาแน่นที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งมีสาเหตุมาจากชิ้นงานยังมีรูพรุนตกค้างภายในหลังจากอบผนิก

เมื่อนำผลการทดสอบการนำไฟฟ้า และความแข็ง ของชิ้นงาน Cu-WC ที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM B663-94 (2006) ดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-20WC ที่ได้มีค่า 44.5 %IACS ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุหน้าสัมผัส ที่ผ่านกรรมวิธีทางผงโลหะแบบ Infiltration กลุ่ม B มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 45-50 %IACS ส่วนค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-20WC มีค่าอยู่ที่ 43.4 รอคเวลล์สเกลบี ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของวัสดุหน้าสัมผัสกลุ่มนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 86-96 รอคเวลล์สเกลบี ส่วนชิ้นงาน Cu-35WC และ Cu-50WC มีค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งต่ำกว่ามาตรฐานทุกกลุ่ม

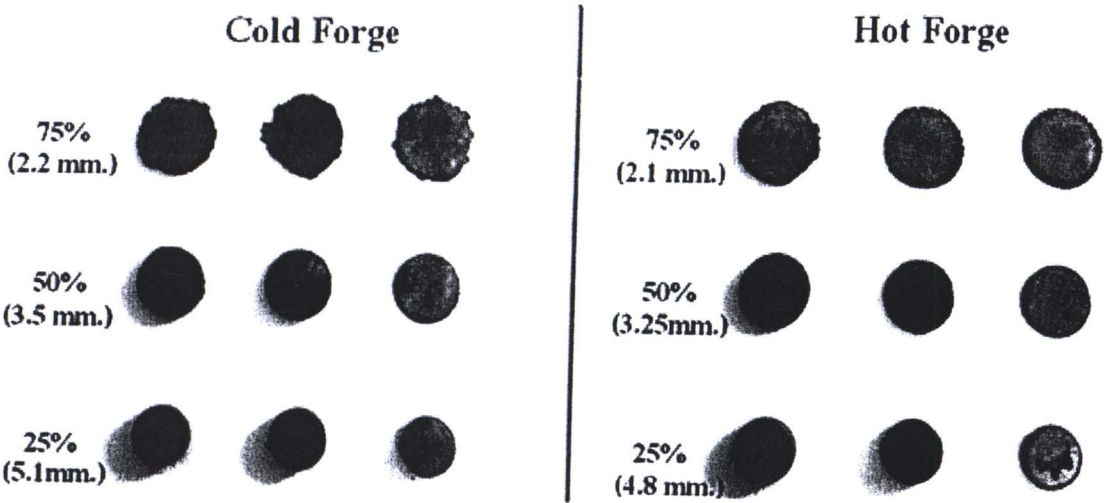
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุหน้าสัมผัสที่มีส่วนผสมหลักของเงินกับทั้งสแตนคาร์ไบด์
ตามมาตรฐาน ASTM B663-94(2006) [12]

ส่วนผสม (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	กลุ่ม		
	A	B	C
เงิน	38-42	48-52	63-67
ทั้งสแตนคาร์ไบด์	58-62	48-52	33-37
ทองแดง (มากที่สุด)	0.5	0.5	0.5
โคบอลต์ หรือ นิกเกิล (มากที่สุด)	0.5	0.5	0.5
สารปนเปื้อนอื่นๆ (มากที่สุด)	1	1	1
สมบัติทางกายภาพ	กลุ่ม		
	A	B	C
ค่าการนำไฟฟ้า (%IACS)	35-40	45-50	55-60
ความแข็ง (รอกเวลล์สเกลบี)	95-105	86-96	50-65
ความหนาแน่น (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	13.1	12.6	11.9
ความหนาแน่นทางทฤษฎี (ร้อยละ)	96	96	96

ด้วยเหตุนี้ ในการทดลองจึงนำชิ้นงาน Cu-20WC มาทำการชุบขึ้นรูปร้อน เพื่อต้องการลดรูพรุนและเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงาน Cu-20WC มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นจาก 44.5 เป็น 61.8 %IACS และมีค่าความแข็งสูงขึ้นจาก 43.4 เป็น 85.9 รอกเวลล์สเกลบี ซึ่งมีค่าที่ได้สูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งของวัสดุหน้าสัมผัสกลุ่ม C ตามมาตรฐาน ASTM B663-94 (2006) ซึ่งมี WC ร้อยละ 33-37 โดยน้ำหนัก จึงเป็นที่มาในการเลือกชิ้นงาน Cu-20WC มาทำการชุบขึ้นรูปร้อน โดยลดความหนาหลงร้อยละ 25, 50 และ 75 และชุบขึ้นรูปเย็นเพื่อลดความหนาหลงร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 นอกจากนี้ในการทดลองได้ชุบขึ้นรูปชิ้นงาน Cu-35WC และ Cu-50WC พบว่า ชิ้นงานแตกทั้งการชุบขึ้นรูปร้อนและเย็น จึงไม่มีผลการทดลองอื่นของสองส่วนผสมนี้

4.4 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูป

ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็นเพื่อลดความหนาประมาณร้อยละ 25, 50 และ 75 มีลักษณะดังรูปที่ 4.13 ชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนเพื่อลดความหนาร้อยละ 25, 50 และ 75 มีความหนาหลังการทุบที่ 4.8, 3.25 และ 2.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปเย็นเพื่อลดความหนาร้อยละ 25, 50 และ 75 มีความหนาหลังการทุบที่ 5.1, 3.5 และ 2.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนมีความหนาน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปเย็น ทั้งนี้เนื่องจากการดึงความหนาของชิ้นงานสำหรับทุบขึ้นรูปนั้นจะทำการตั้งค่าด้วยการทุบขึ้นรูปเย็น การทุบขึ้นรูปร้อนนั้นต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนทำให้ชิ้นงานมีความอ่อนตัว และเมื่อได้รับแรงกระแทกทำให้ชิ้นงานเกิดการยุบมากกว่า จึงทำให้ความหนาของชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนจึงมีความหนาดำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปเย็น

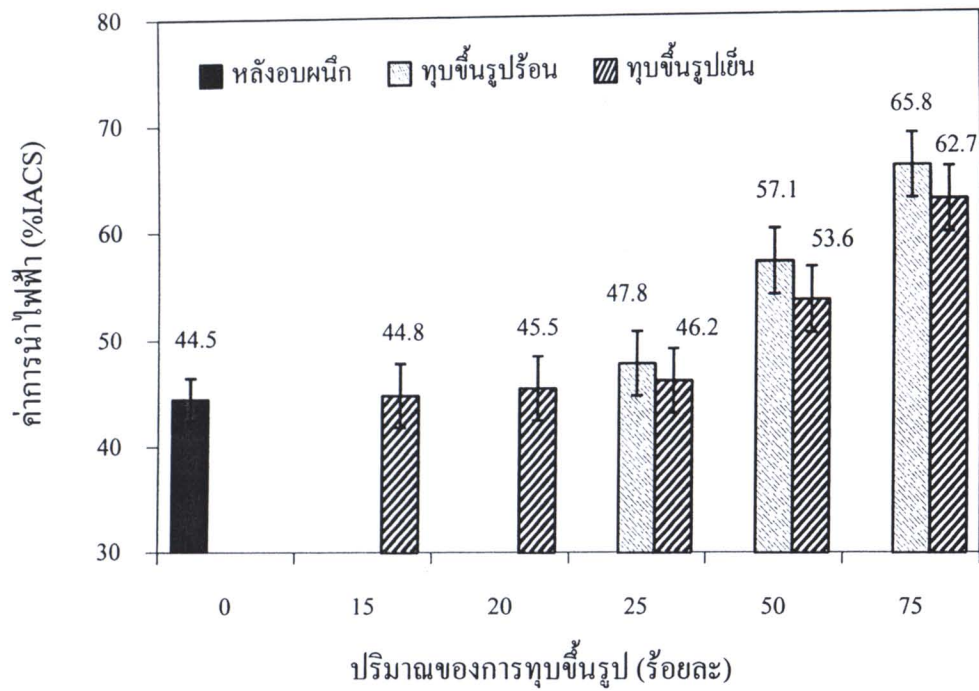


รูปที่ 4.13 ลักษณะของชิ้นงานหลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น

4.4.1 ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูป

ผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผืนิก ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น แสดงดังรูปที่ 4.14 ชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนร้อยละ 25, 50 และ 75 มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 47.8, 57.1 และ 65.8 %IACS ตามลำดับ ขณะที่ชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้น

รูปเย็นร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 44.8, 45.5, 46.2, 53.6 และ 62.7 %IACS ตามลำดับ



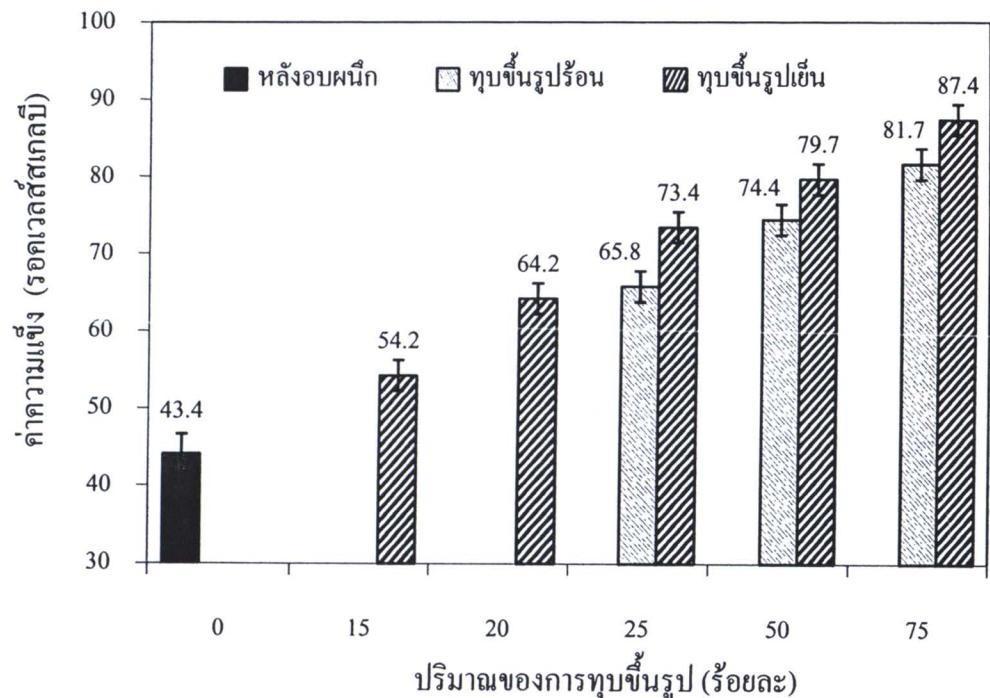
รูปที่ 4.14 ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็น

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงานหลังอบผกที่ไม่ผ่านการชุบขึ้นรูป และเมื่อปริมาณการชุบขึ้นรูปเพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบขึ้นรูปนั้นยังคงมีรูพรุนตกค้างอยู่ภายในหลังผ่านการอบผก โดยรูพรุนเหล่านี้จะทำให้หน้าตัดขวางการส่งผ่านอิเล็กตรอนทำให้วัสดุนำไฟฟ้าได้ไม่ดี ดังนั้นเมื่อชิ้นงานผ่านการชุบขึ้นรูปจึงทำให้รูพรุนที่ตกค้างอยู่ลดลง ทำให้การส่งผ่านของอิเล็กตรอนจากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมหนึ่งเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าจึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบขึ้นรูป และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปสูงขึ้น มีค่าการนำไฟฟ้าด้วยเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงานที่การชุบขึ้นรูปเย็นที่ปริมาณการชุบเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่ทำการชุบขึ้นรูปร้อนนั้นเกิด Dynamic Recrystallization มีการโตของเกรนอย่างต่อเนื่อง [22] ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปเย็น จึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนนำไฟฟ้าได้ดีกว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปเย็น

4.4.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูป

ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผึ่ง ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็น แสดงดังรูปที่ 4.15 ชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนร้อยละ 25, 50 และ 75 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 65.8, 74.4 และ 81.7 รอคเวสต์สเกลบี ตามลำดับ ขณะที่ชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปเย็นร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 54.2, 64.2, 73.4, 79.7 และ 87.4 รอคเวสต์สเกลบี ตามลำดับ



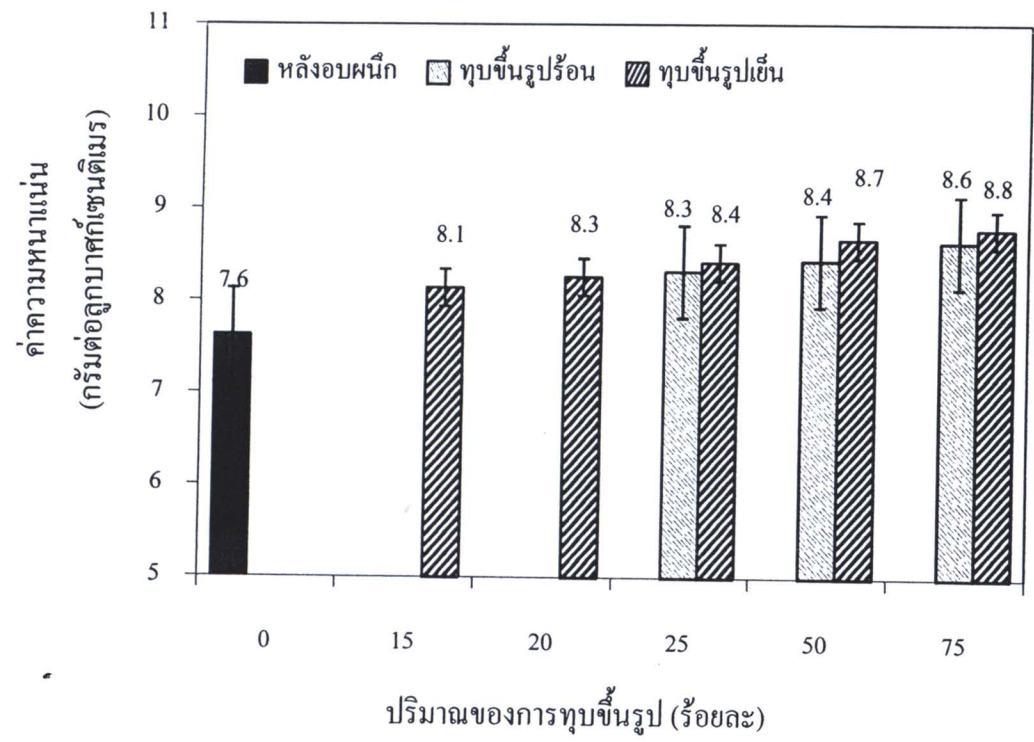
รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็น

เห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปเย็นนั้นมีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนที่ปริมาณของการชุบขึ้นรูปเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการชุบขึ้นรูปเย็นเกิดคิสโลเคชั่นจำนวนมาก ส่งผลให้คิสโลเคชั่นออกแรงผลักดันมากขึ้น การเคลื่อนที่ของคิสโลเคชั่นจะถูกขัดขวางด้วยคิสโลเคชั่นตัวอื่นจึงทำให้แข็งขึ้น [27] ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปเย็นมีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อน จากงานวิจัยของ สุทธิพงษ์ โสภา และคณะ [37] ซึ่งทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการชุบขึ้นรูปและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม Al6063 พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบขึ้นรูปนั้นส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านความแข็ง โดยชิ้นงาน Al6063 ที่ผ่านการชุบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสจะมีขนาดของเกรนอยู่ที่ 6.75 ไมโครเมตร และความแข็งอยู่ที่ 44.87 บรินเนลล์ เมื่อ

อุณหภูมิของการชุบขึ้นรูปสูงขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส ขนาดของเกรนมีค่า 6.94 ไมโครเมตร และความแข็งมีค่า 40.97 บริเนลล์ ด้วยเหตุนี้ทำให้ทราบว่า อุณหภูมิของการชุบขึ้นรูปและขนาดของเกรน มีผลต่อสมบัติทางกลด้านความแข็งของวัสดุ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้สมบัติทางกลด้านความแข็งลดลง

4.4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูป

ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผืนิก ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็น แสดงดังรูปที่ 4.16 ชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนร้อยละ 25, 50 และ 75 มีค่าความหนาแน่น 8.3, 8.4 และ 8.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปเย็นร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 มีค่าความหนาแน่น 8.1, 8.3, 8.4, 8.7 และ 8.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็น

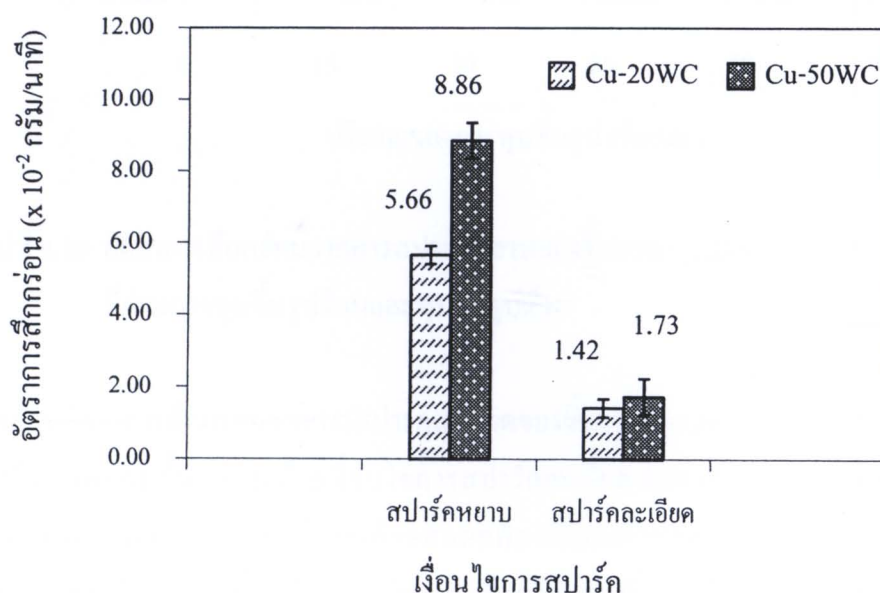
จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การชุบขึ้นรูปมีผลต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจาก ขณะที่ทำการชุบขึ้นรูปนั้นทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรวดเร็ว เกิดการอัดตัวมาก

ขึ้นทำให้ปริมาณพูนของชิ้นงานลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบขึ้นรูป จึงทำให้ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งปริมาณพูนที่ยังตกค้างอยู่นี้จะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maneshian และ Simchi [38] พบว่า Cu-80W ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีผสมผงโลหะเชิงกล (Mechanical Alloying : MA) เมื่อความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงและการนำไฟฟ้าของชิ้นงานเพิ่มขึ้น การเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบผนึก

เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปกับมาตรฐาน ASTM B663-94 (2006) ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับหน้าสัมผัสไฟฟ้าส่วนผสม Ag-WC ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Infiltration ตามด้วยกระบวนการอัดและอบผนึก พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของ Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็นร้อยละ 25 อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของส่วนผสม Ag-50WC คือ 45-50 %IACS และค่าการนำไฟฟ้าของการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็นร้อยละ 50 และ 75 อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ที่ส่วนผสม Ag-35WC คือ 55-60 %IACS ส่วนค่าความแข็งแรงของการชุบขึ้นรูปเย็นร้อยละ 75 อยู่ในช่วงที่รับได้ที่ส่วนผสม Ag-50WC คือ 86-96 รอกเวลส์สเกลบี ขณะที่ค่าความแข็งแรงของการชุบขึ้นรูปร้อนและชุบขึ้นรูปเย็น ที่ร้อยละ 25 และ 50 มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ส่วนผสม Ag-35WC

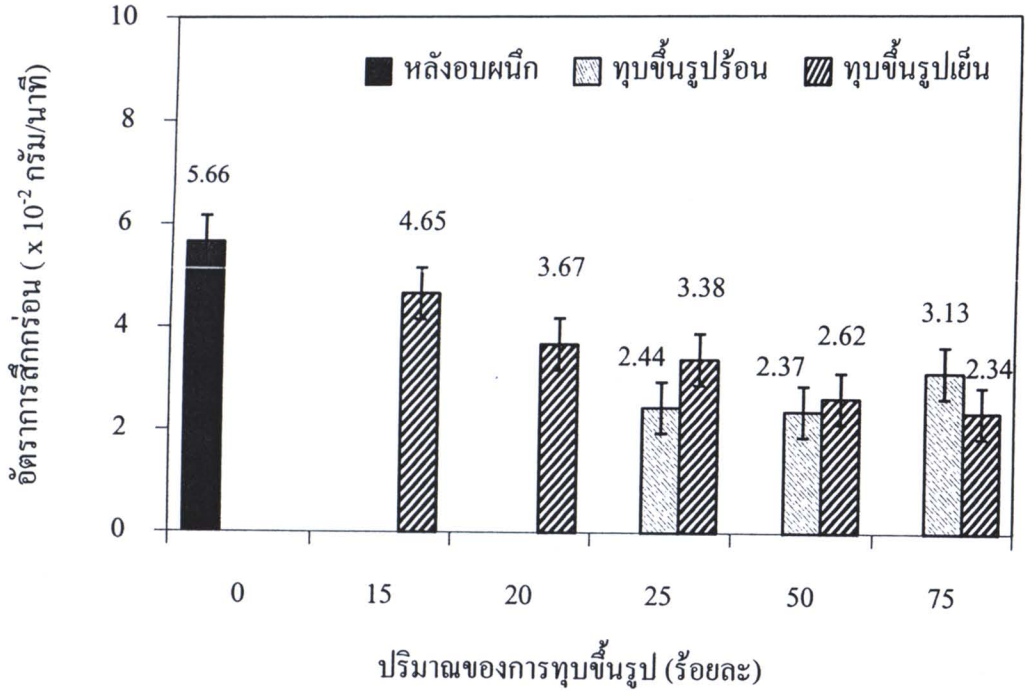
4.5 ผลการทดสอบการสึกกร่อนจากการสปาร์ค

ในการทดลองหาการสึกกร่อนของชิ้นงานจากการสปาร์คนั้น ชิ้นงานเริ่มต้นผ่านกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันทำให้ความหนาที่เริ่มต้นแตกต่างกัน กล่าวคือ หลังการชุบขึ้นรูปความหนาลดลงตามปริมาณการชุบขึ้นรูป แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทั้งหมดให้มีค่าคงที่เท่ากันคือ 5 มิลลิเมตร (ตัดด้วย Wire Cut) ดังนั้นการสึกหรอในที่นี้จึงหาจาก อัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานที่หาได้จากน้ำหนักของชิ้นงานที่เป็นอิเล็กโทรดที่หายไปจากการสปาร์คหารด้วยเวลาที่ใช้ในการสปาร์ค เพื่อให้ได้ความลึกของตัวรองรับเท่ากันเป็น 0.30 มิลลิเมตร ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานจากการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC ที่ผ่านการอบผก และไม่ชุบขึ้นรูป แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าชิ้นงานส่วนผสม Cu-50WC ที่ผ่านการสปาร์คหยาบ มีอัตราการสึกหรอ 8.86×10^{-2} กรัมต่อนาที่ และอัตราการสึกหรอหลังสปาร์คละเอียดคือ 1.73×10^{-2} กรัมต่อนาที่ ชิ้นงานส่วนผสม Cu-20WC ที่ผ่านการสปาร์คหยาบมีอัตราการสึกกร่อน 5.66×10^{-2} กรัมต่อนาที่ และอัตราการสึกกร่อนหลังสปาร์คละเอียดคือ 1.42×10^{-2} กรัมต่อนาที่ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน Cu-50WC มีอัตราการสึกกร่อนสูงกว่าชิ้นงาน Cu-20WC ทั้งนี้เนื่องจาก WC ถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าทองแดง และ Cu-50WC นำไฟฟ้าได้น้อยกว่า Cu-20WC ทำให้การส่งผ่านความร้อนขณะที่เกิดการสปาร์คไปยังเศษโลหะ และสารไดอิเล็กตริกที่อยู่รอบๆได้เข้า จึงทำให้อัตราการสึกกร่อนของ Cu-50WC สูงกว่า Cu-20WC



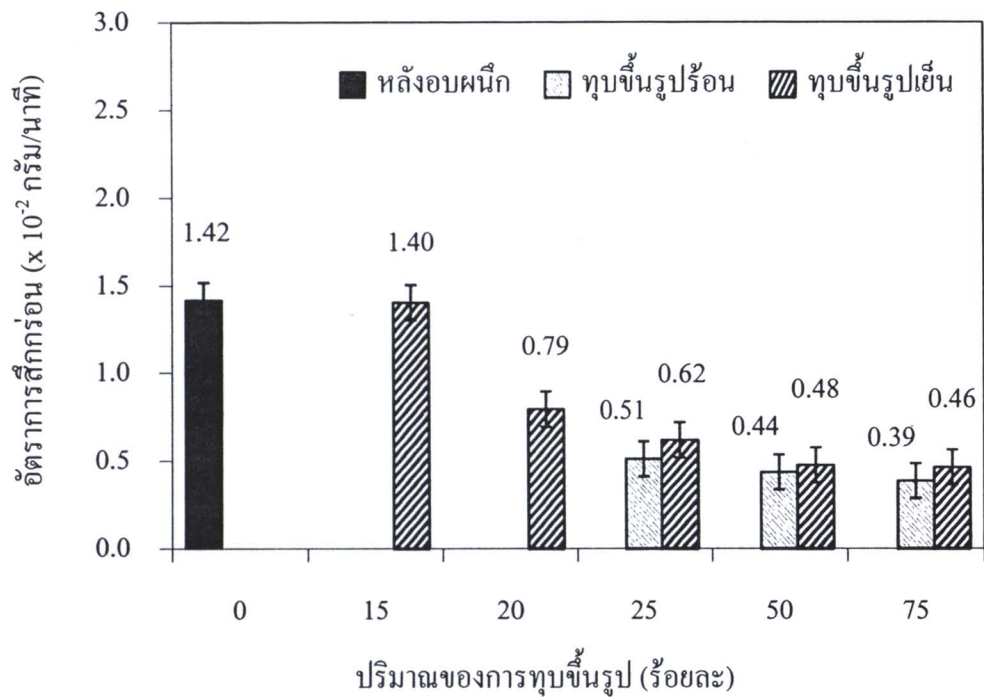
รูปที่ 4.17 อัตราการสึกกร่อนของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC หลังอบผกผ่านการสปาร์ค

ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนิก ทบขึ้นรูป ร้อนลดความหนา ร้อยละ 25, 50, 75 ทบขึ้นรูปเย็นลดความหนา ร้อยละ 15, 20, 25, 50, 75 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่า การทบขึ้นรูปร้อนและเย็นช่วยลดอัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คได้ดีกว่า ชิ้นงานหลังอบผนิก โดยร้อยละของการทบขึ้นรูปสูงขึ้น อัตราการสึกกร่อนมีค่าลดลง ยกเว้นชิ้นงานที่ ผ่านการทบขึ้นรูปร้อนลดความหนา ร้อยละ 75 ให้อัตราการสึกกร่อนสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการทบขึ้น รูปร้อนลดความหนา ร้อยละ 25 และ 50 เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดบาง ขณะทำการทดสอบเกิด ข้อผิดพลาดจากการสปาร์ค เนื่องจากขีดจำกัดของเวลาและเงินทุน ในที่นี้จึงขอเสนอแนะให้ทำการ ทดลองใหม่เพื่อลดการผิดพลาดในการทดลอง



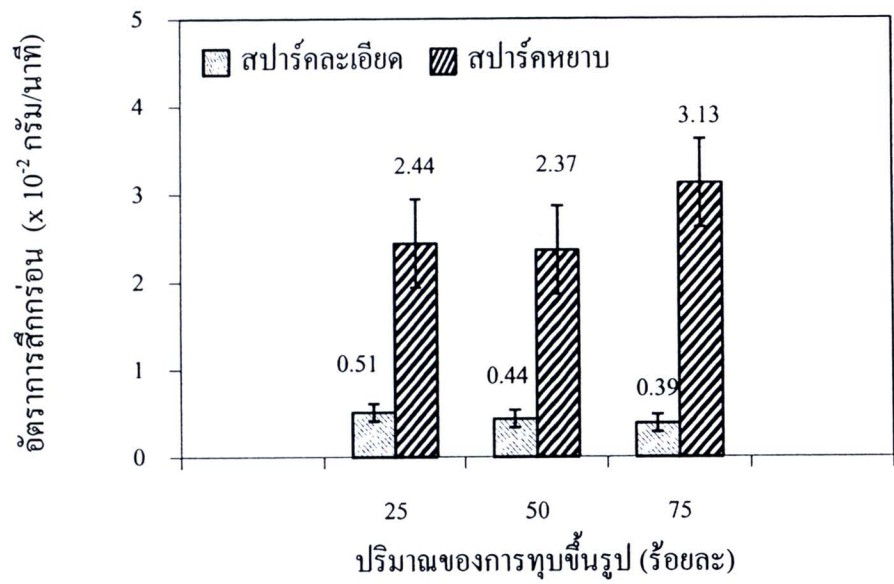
รูปที่ 4.18 อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนิก ที่ผ่านการทบขึ้นรูปร้อนและทบขึ้นรูปเย็น

ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนิก ผ่านการ ทบขึ้นรูปร้อน และทบขึ้นรูปเย็น ด้วยเงื่อนไขการสปาร์คละเอียด แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า ผลการ ทดลองการสึกกร่อนจากการสปาร์คละเอียดสอดคล้องกับผลการทดลองการสึกกร่อนจากการ สปาร์คหยาบ กล่าวคือ การทบขึ้นรูปช่วยลดอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานได้ดีกว่าชิ้นงานหลังการอบ ผนิกอย่างเดียว

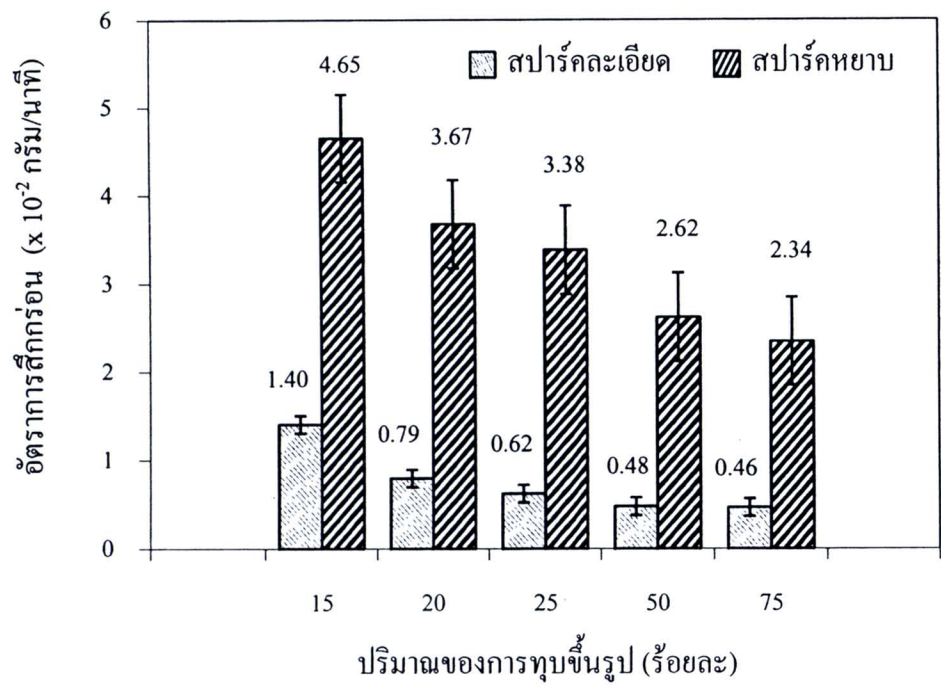


รูปที่ 4.19 อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คเลียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผืนึก ที่ผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบและสปาร์คเลียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนและทุบขึ้นรูปเย็น ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการสปาร์คเลียดมีอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการสปาร์คหยาบ ทั้งนี้เนื่องจากว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้าและความถี่ที่ใช้ในการสปาร์คต่างกัน การสปาร์คเลียดใช้ กระแสไฟฟ้าที่ 1 แอมแปร์ ความถี่สูง และความต่างศักย์ขณะเกิดการสปาร์คประมาณ 290 โวลต์ ส่วนการสปาร์คหยาบจะใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 15 แอมแปร์ ความถี่ต่ำ และความต่างศักย์ขณะเกิดการสปาร์คประมาณ 220 โวลต์ ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการสปาร์คเลียดมีอัตราการสึกกร่อนต่ำกว่า และผิวที่ได้หยาบน้อยกว่าการสปาร์คหยาบ



รูปที่ 4.20 อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อน

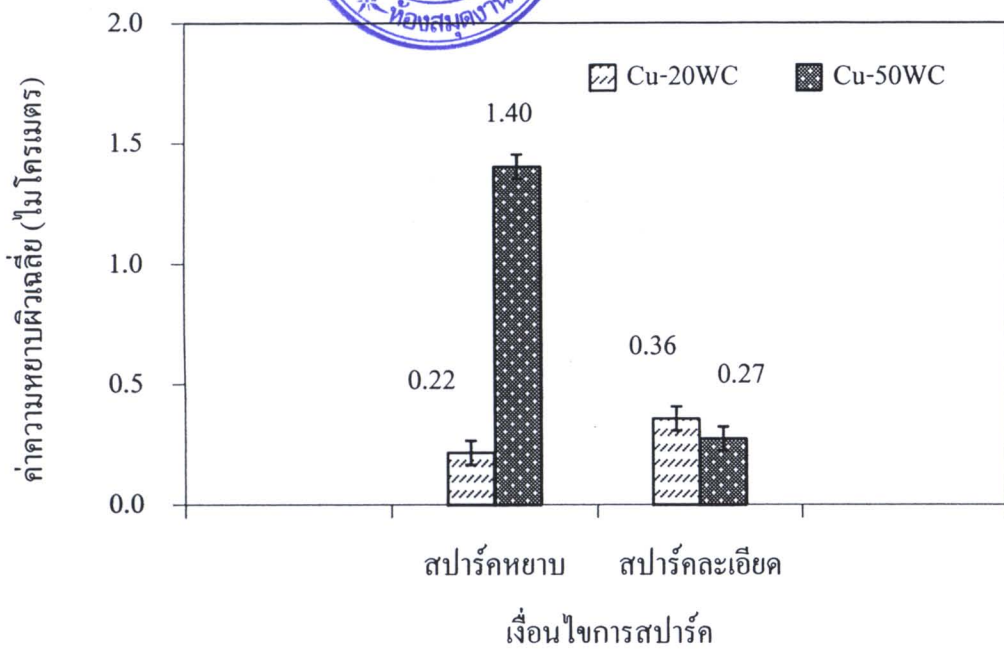


รูปที่ 4.21 อัตราการสึกกร่อนจากการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการชุบขึ้นรูปเย็น

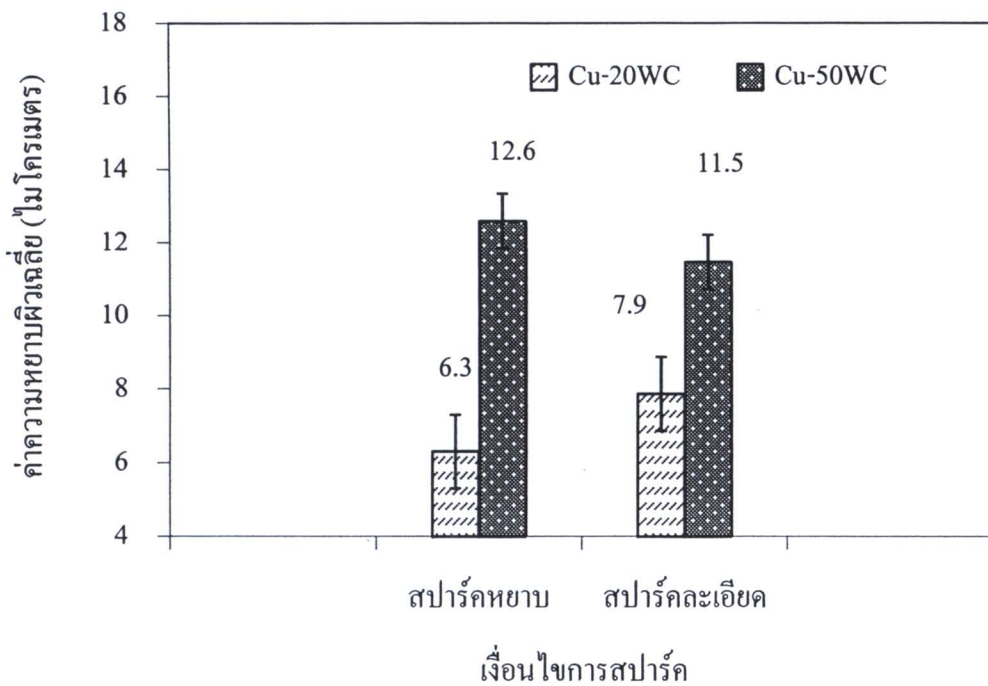
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการสึกกร่อนจากการสปาร์ค กับ ประเภทการทُبขึ้นรูปชิ้นงาน และค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ชิ้นงานทُبขึ้นรูปร้อน หลังผ่านการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียด มีค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการทُبขึ้นรูปเย็นที่ร้อยละของการทُبเท่ากัน และอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานทُبขึ้นรูปที่ร้อยละของการทُبเพิ่มขึ้น หลังผ่านการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของวัสดุจะมีผลต่อสมบัติด้านการนำความร้อนของวัสดุ โดยวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี จะนำความร้อนได้ดีด้วย ซึ่งวัสดุที่นำความร้อนได้ดีจะสามารถลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในตัวมันเองได้เร็วกว่าวัสดุที่นำความร้อนได้ต่ำ หมายความว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อนระหว่างตัวกลางจะมีค่าลดลง ทำให้ขณะที่เกิดการสปาร์คขึ้นงานที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงมีการส่งผ่านความร้อนไปยังเศษโลหะที่เกิดการหลอมละลายได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า จึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการทُبขึ้นรูปร้อนและชิ้นงานที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงมีอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการทُبขึ้นรูปเย็นและชิ้นงานมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ

4.6 ผลการทดสอบความหยาบผิวของชิ้นงาน Cu-WC หลังผ่านการสปาร์ค

ผลการทดสอบความหยาบผิวของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC ที่ผ่านการอบผนิก (ไม่ทُبขึ้นรูป) ก่อนการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียด แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่า ชิ้นงาน Cu-20WC มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.22 และ 0.36 ไมโครเมตร ตามลำดับ ชิ้นงาน Cu-50WC มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 1.40 และ 0.27 ไมโครเมตร หลังการสปาร์คหยาบและสปาร์คละเอียดชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC มีค่าความหยาบผิว ดังรูปที่ 4.23 โดยชิ้นงาน Cu-20WC มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 7.9 และ 6.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ชิ้นงาน Cu-50WC มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 12.6 และ 11.5 ไมโครเมตร



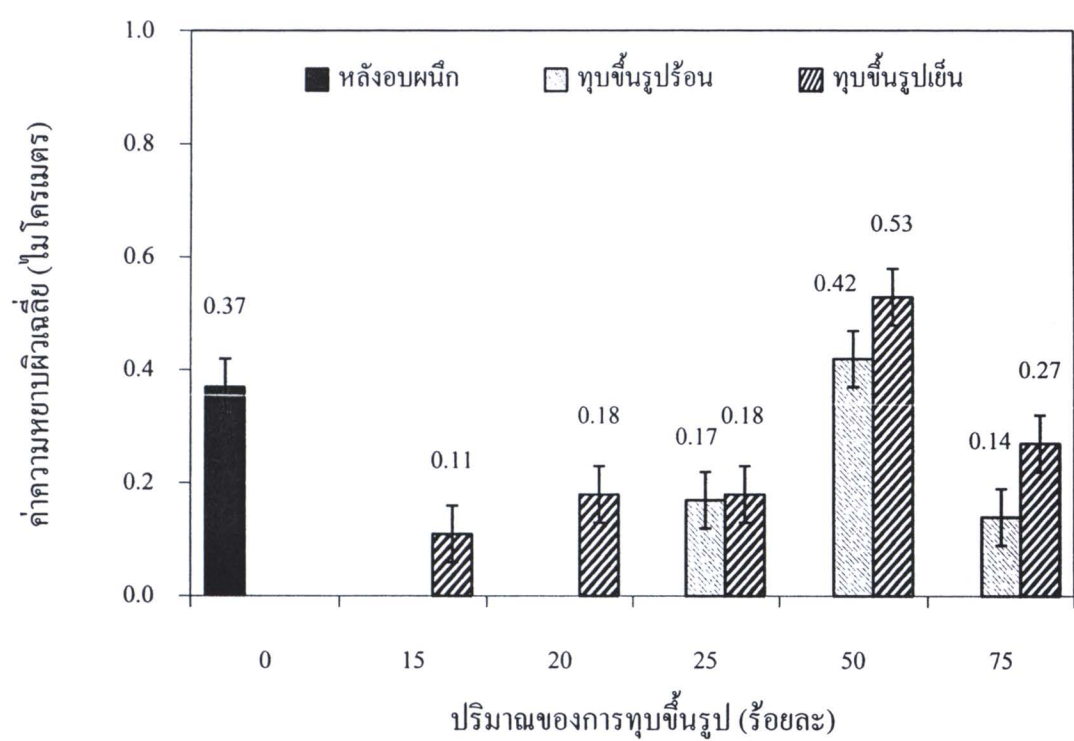
รูปที่ 4.22 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก่อนสปาร์ตหยาบและสปาร์ตละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC หลังอบพ่น



รูปที่ 4.23 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังสปาร์ตหยาบและสปาร์ตละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC และ Cu-50WC หลังอบพ่น

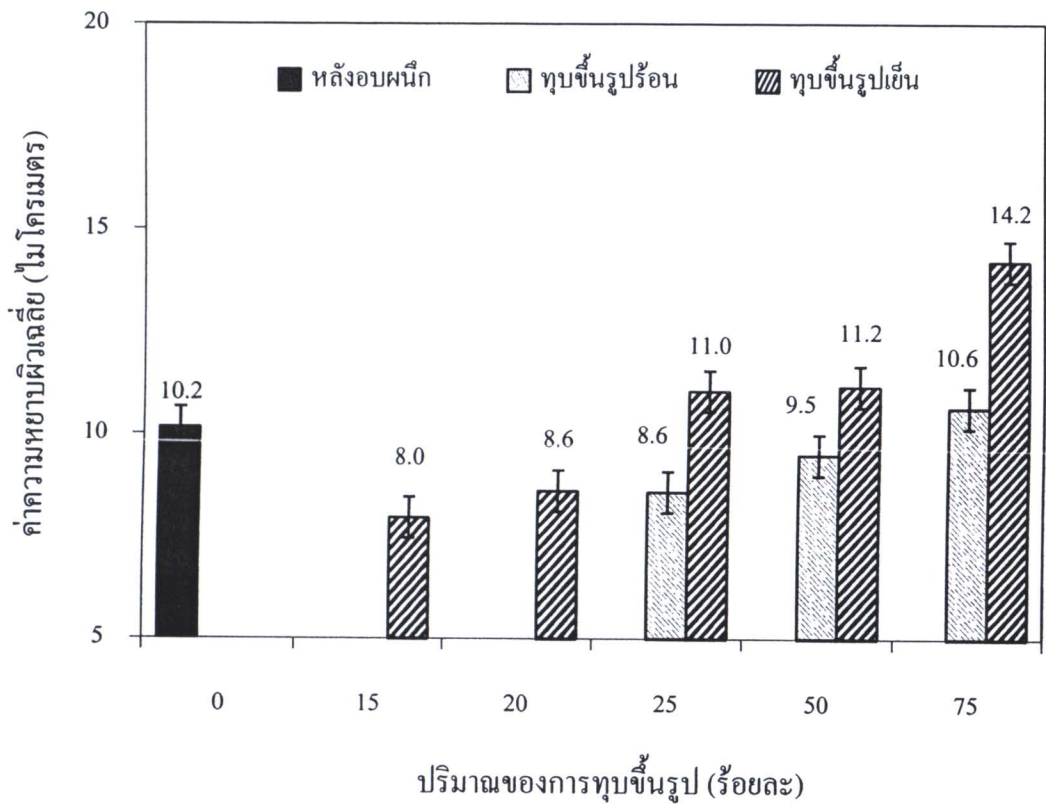
4.6.1 ผลการทดสอบความหยาบผิวของชิ้นงาน Cu-WC หลังผ่านการสปาร์คหยาบ

ผลการทดสอบความหยาบผิวก่อนสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผืนึก หลังผ่านการทุบขึ้นรูปร้อนเพื่อลดความหนา ร้อยละ 25, 50 และ 75 และหลังผ่านการทุบขึ้นรูปเย็น เพื่อลดความหนา ร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 แสดงดังรูปที่ 4.24 เห็นได้ว่าความหยาบผิวของทุกชิ้นงานมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักเนื่องจากทุกชิ้นงานผ่านการขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200



รูปที่ 4.24 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก่อนการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC

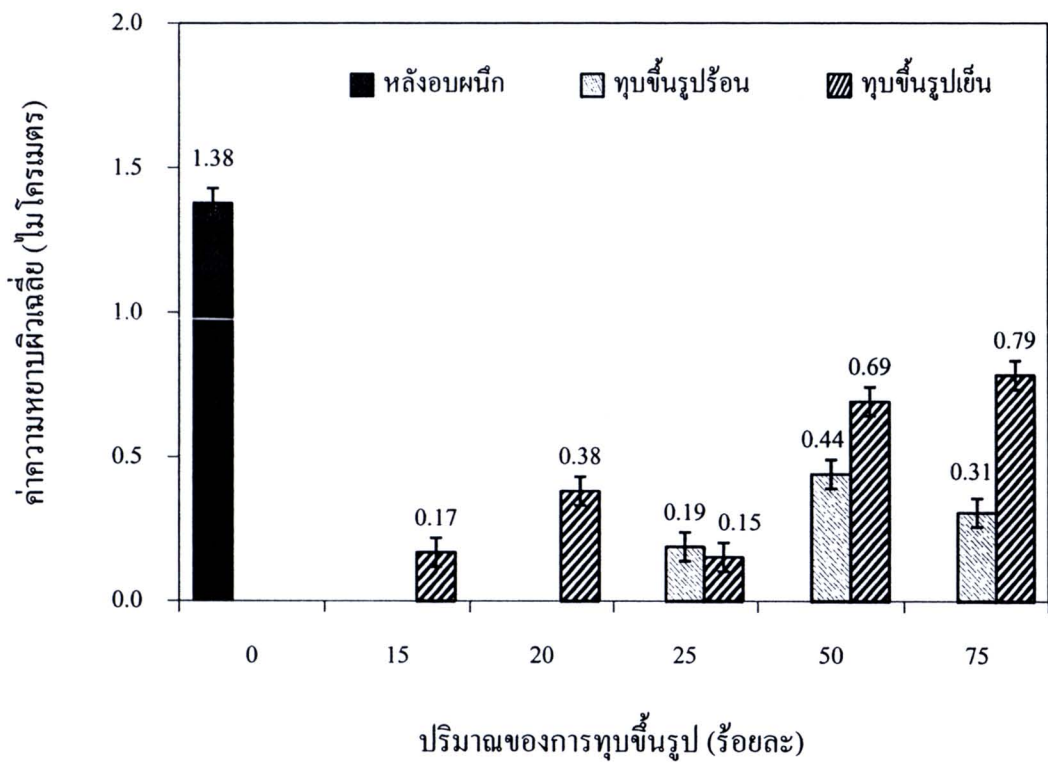
ค่าความหยาบผิวหลังสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC ผ่านการชุบชั้นรูปร้อนและชุบชั้นรูปเย็น แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่า ชิ้นงาน Cu-20WC ผ่านการชุบชั้นรูปร้อนเพื่อลดความหนา ร้อยละ 25, 50 และ 75 มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 8.6, 9.5 และ 10.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนชิ้นงาน Cu-20WC ผ่านการชุบชั้นรูปเย็นเพื่อลดความหนา ร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 8.0, 8.6, 11.0, 11.2 และ 14.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC

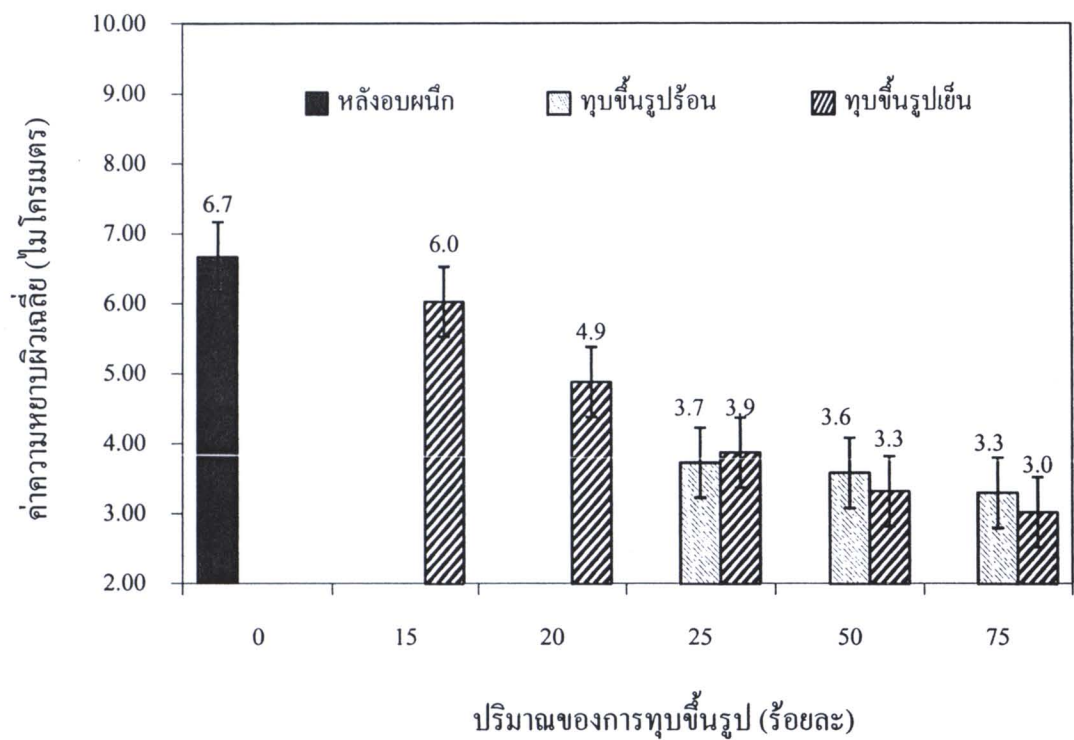
4.6.2 ผลการทดสอบความหยาบผิวของชิ้นงาน Cu-WC หลังการสปาร์คละเอียด

ผลการทดสอบความหยาบผิวก่อนสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC หลังการทพขึ้นรูปร้อน เพื่อลดความหยาบร้อยละ 25, 50 และ 75 และหลังการทพขึ้นรูปเย็น เพื่อลดความหยาบร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 แสดงดังรูปที่ 4.26 เห็นได้ว่าความหยาบผิวของทุกชิ้นงานมีค่าแตกต่างกันไม่มาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-1.4 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากทุกชิ้นงานผ่านการขัดผิวด้วยกระดาษทราย เบอร์ 1200



รูปที่ 4.26 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยก่อนการสปาร์คละเอียดของชิ้นงาน Cu-20WC

ค่าความหยาบผิวหลังสปาร์เคลือบของชิ้นงาน Cu-20WC ที่ผ่านการทพขึ้นรูปร้อนและทพขึ้นรูปเย็น แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า ชิ้นงาน Cu-20WC ผ่านการทพขึ้นรูปร้อนเพื่อลดความหนา ร้อยละ 25, 50 และ 75 มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 3.7, 3.6 และ 3.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนชิ้นงาน Cu-20WC ผ่านการทพขึ้นรูปเย็นเพื่อลดความหนา ร้อยละ 15, 20, 25, 50 และ 75 มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 6.0, 4.9, 3.9, 3.3 และ 3.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ



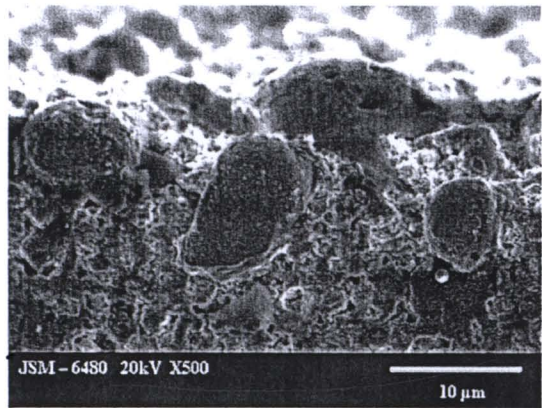
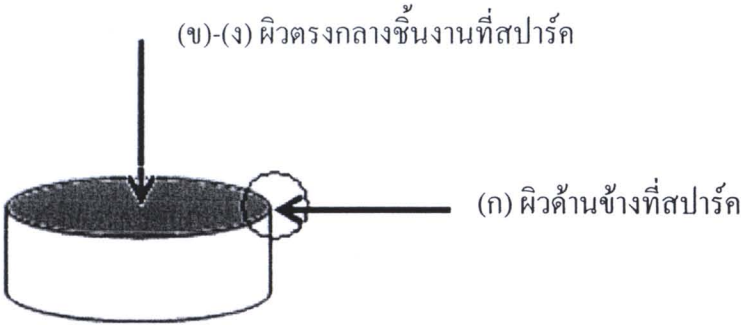
รูปที่ 4.27 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการสปาร์เคลือบของชิ้นงาน Cu-20WC

จากรูป 4.23, 4.25 และ 4.27 เห็นได้ว่า ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานหลังผ่านการสปาร์คหยาบมีค่าสูงกว่าชิ้นงานหลังผ่านการสปาร์เคลือบ ทั้งนี้เนื่องจากการสปาร์คหยาบ (C190) กระแสไฟฟ้าถูกปล่อยออกมาในลักษณะของพัลส์ที่มีกระแสสูง มีความถี่ต่ำ ระยะเวลาสั้นขณะที่การสปาร์เคลือบ (C300) กระแสไฟฟ้าถูกปล่อยออกมาในลักษณะของพัลส์ที่มีกระแสต่ำ ความถี่สูง ระยะเวลาสั้นๆ ทำให้ความหยาบผิวของชิ้นงานหลังสปาร์คขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าและความถี่ที่ใช้ในการปล่อยกระแสไฟฟ้าโดยชิ้นงานที่ได้รับปริมาณของกระแสไฟฟ้าสูง จะมีค่าความหยาบผิวที่สูง ซึ่งจากผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ[39] พบว่า ค่าความหยาบผิวของ AISI 1045 โดยมี Cu-75W เป็นอิเล็กโทรด มีค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 1 ไมโครเมตร เป็นประมาณ 3.5 ไมโครเมตร ที่กระแสไฟฟ้า 1 และ 12 แอมแปร์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ

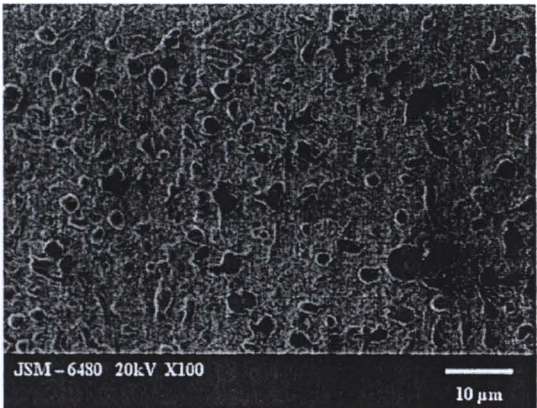
สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ [40] พบว่า ความเรียบผิวของชิ้นงานหลังสปาร์กไม่ขึ้นกับความเรียบผิวของอิเล็กโทรดแต่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการสปาร์กและ การสปาร์กด้วยเงื่อนไข C190 ได้ความเรียบผิว Ra ของอิเล็กโทรดหลังการสปาร์กสูงกว่าความเรียบผิวก่อนสปาร์ก

4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Cu-20WC หลังผ่านการสปาร์ก

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการสปาร์กหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบผนึก แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยในการศึกษาได้ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 2 บริเวณคือ (ก) บริเวณด้านข้างที่สปาร์ก และ (ข) – (ง) บริเวณผิวตรงกลางของชิ้นงานด้านที่ผ่านการสปาร์กพบว่า บริเวณผิวด้านข้างที่ผ่านการสปาร์กหยาบมีความขรุขระของผิว

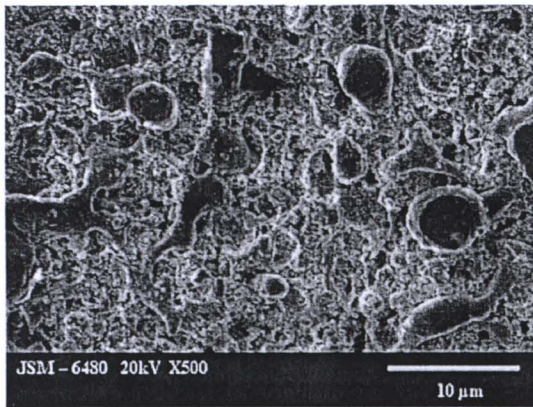


(ก)

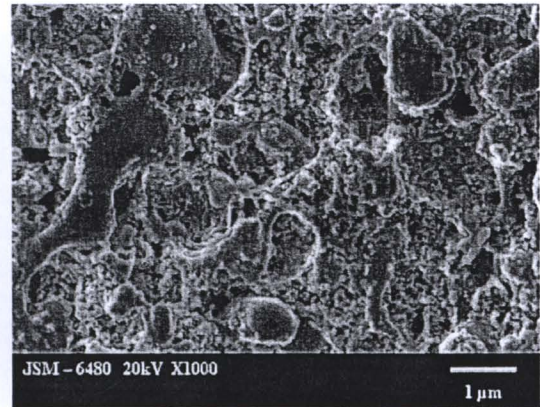


(ข)





(ก)



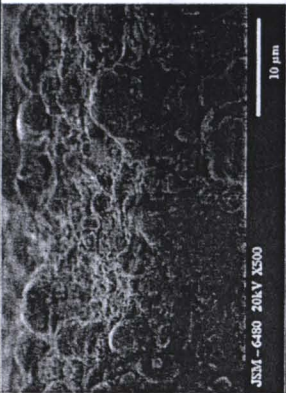
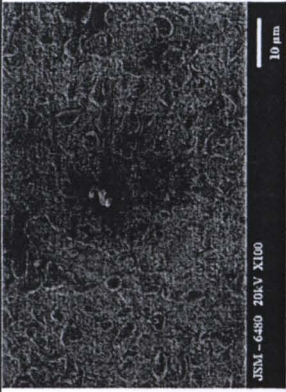
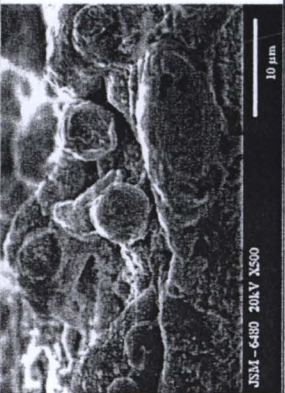
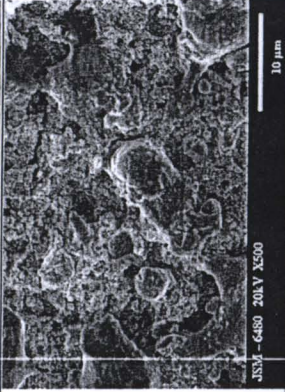
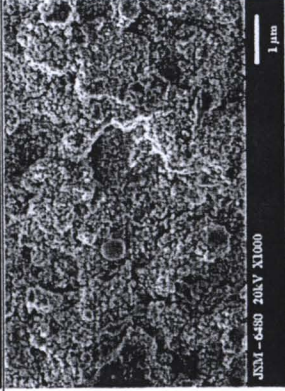
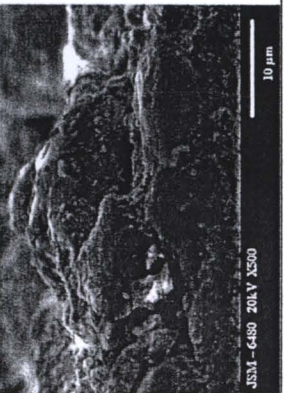
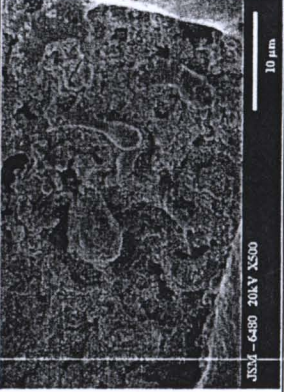
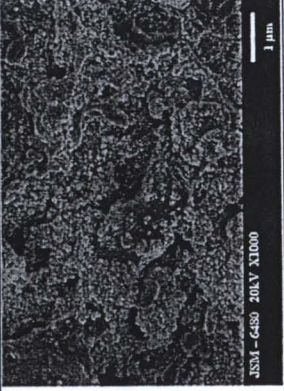
(ง)

รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการสปาร์คหยาบของชิ้นงาน Cu-20WC หลังอบพ่นึก

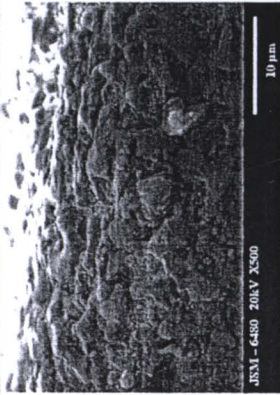
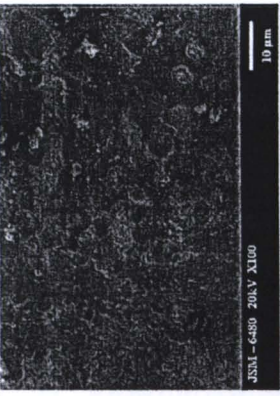
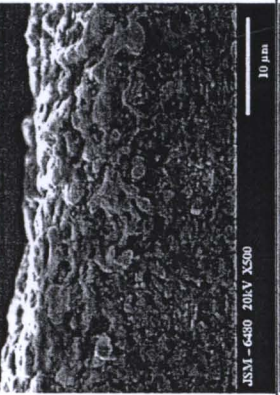
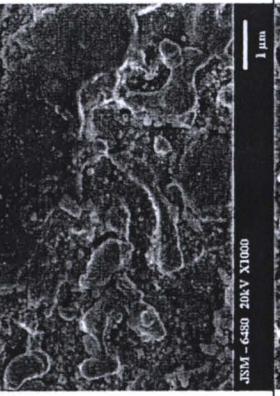
- (ก) บริเวณผิวด้านข้าง กำลังขยาย 500 เท่า
- (ข) บริเวณผิวตรงกลางชิ้นงาน กำลังขยาย 100 เท่า
- (ค) บริเวณผิวตรงกลางชิ้นงาน กำลังขยาย 500 เท่า
- (ง) บริเวณผิวตรงกลางชิ้นงาน กำลังขยาย 1,000 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการสปาร์คหยาบ และสปาร์คละเอียด ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าเมื่อร้อยละการชุบขึ้นรูปสูงขึ้น ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ผ่านการสปาร์คหยาบมีค่าสูงขึ้น และผิวมีความขรุขระมากขึ้น ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการสปาร์คละเอียดมีค่าความหยาบผิวลดลง ผิวมีความขรุขระลดลง ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค

ตารางที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน Cu-20WC ทูบขึ้นรูปเย็นหลังผ่านการสปรayed

ปริมาณการ ทุบขึ้นรูป	ผิวตรงกลางชิ้นงาน			
	ผิวด้านข้าง 500X	100X	500X	1000X
25%				
50%				
75%				

ตารางที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน Cu-20WC ทูบชนรูปเย็นที่ผ่านการสปาร์คละเอียด

ปริมาณการ ทุบชนรูป	ผิวตรงกลางชิ้นงาน			
	ผิวด้านข้าง	100X	500X	1000X
	500X			
	25%			
	50%			
	75%	