

Cu25W Kompozit Tozunun Bilyeli Öğütme Yöntemiyle Üretimine Farklı İşlem Kontrol Katkılarının Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Different Process Control Agents on the Production of Cu25W Composite Powder via Ball Milling Technique

Serkan BIYIK*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Abdullah Kanca Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 61530, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 25.05.2018 • Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 02.08.2018 • Kabul tarihi / Accepted: 08.08.2018

Öz

Bakır (Cu) esaslı kompozitler, özellikle de tungsten (W) veya molibden gibi refrakter metal içeren bileşimler geleneksel malzemelere göre daha geniş bir sıcaklık aralığında üstün fiziksel ve mekanik özellikler sergilerler. Cu-esaslı refrakter metal içerikli kompozitler yüksek sertlikleri, iyi derecede ısı ve elektriksel iletkenlikleri ve ark-erozyonuna karşı yüksek dirençleri sebebiyle özellikle elektrik kontak malzemeleri olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Söz konusu kompozitlerin bilyeli öğütme yöntemiyle üretimi mümkün olmakla birlikte bu yöntemde mevcut olan işlem kontrol katkısı, öğütme hızı, bilye-toz-ağırlık oranı, öğütme süresi vb. gibi birçok işlem değişkenlerinin etkilerinin ayrı ayrı incelenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada; bilyeli öğütme değişkenlerinden bir tanesi olan işlem kontrol katkısının, Cu-esaslı W-takviyeli kompozit tozunun üretimine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla sıvı işlem kontrol katkılarından olan etanol ve metanol; element haldeki Cu ve W tozlarından hazırlanan karışımlara ayrı ayrı katılarak iki istasyonlu gezegen tip bilyeli öğütücüde öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Etanol ve metanol katkılarının Cu25W toz boyut ve morfolojisine olan etkileri parçacık boyut analizi ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Artan öğütme süresi ile birlikte her iki bileşimde de ortalama parçacık boyutunda azalma gözlenmiştir. Söz konusu azalma özellikle metanol katkısı içeren toz karışımında daha belirgin olduğundan dolayı Cu25W kompozit tozunun üretiminde ağırlıkça % 2'lik oran için bir işlem kontrol katkısı olarak metanolün etanole göre daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, metanol katkısı ile 25 saatlik öğütme süresi sonunda etanol katkılı toz karışımına nazaran daha homojen bir dağılım elde edildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bakır-esaslı kompozitler, Bilyeli öğütme, Etanol, İşlem kontrol katkısı, Metanol, Tungsten

Abstract

Copper (Cu) based composites, especially compositions containing refractory metals such as tungsten (W) or molybdenum, exhibit superior physical and mechanical properties over a wide range of temperatures compared to conventional materials. Due to their high hardness, good electrical and thermal conductivities, and excellent arc-erosion resistance; Cu-based refractory metal reinforced composites are frequently used as electrical contact materials. Although, it is possible to produce aforementioned composites via ball milling technique, this method also contains several parameters that have to be investigated in detail, such as process control agent, milling speed, ball-to-powder weight ratio, milling time, and so on. In this paper; the effect of process control agent, which is one of the most important parameters in ball milling technique, on production of Cu-based W-reinforced composite powder was investigated. For this purpose, two different liquid process control agents, namely ethanol and methanol were separately added to powder mixtures containing elemental Cu and W, and then ball milling experiments were performed using a two stationary planetary-type ball mill. The effects of ethanol and methanol additions on particle size and morphology of Cu25W powder mixture were investigated using laser diffraction analysis (Mastersizer) and scanning electron microscopy (SEM). It was found that average particle size values of both compositions decreased with increasing milling duration. Considering its improved particle size reduction effectiveness as a process control agent, methanol at the amount of 2 wt.% was found to be more effective comparing to the same amount of ethanol in terms of producing Cu25W composite powder. Besides, more homogeneous dispersion of elements was achieved in powder mixture containing methanol after ball milling duration of 25 hours.

Keywords: Copper-based composites, Ball milling, Ethanol, Process control agent, Methanol, Tungsten

* Serkan BIYIK; serkanbiyik@ktu.edu.tr; Tel: (0462) 377 81 84; orcid.org/0000-0002-6083-0802

1. Giriş

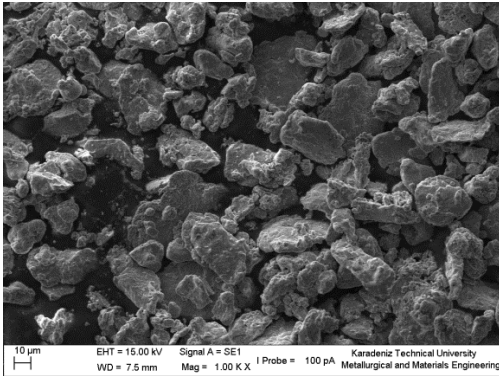
Elektrik kontakları röle veya kontaktör gibi elektromanyetik anahtarların en önemli elemanlarından biri olup elektrik devresinin belirlenen zamanlarda açılıp kapanması görevini üstlenirler. Kontaklar, üzerlerinden elektrik akımı geçtiği için hem mekanik hem de elektriksel olarak aşınmaya maruz kalırlar. Elektriksel aşınma veya ark-erozyonu özellikle iki kontak arasındaki malzeme transferinin ve kontak yüzeylerindeki bozunumların en önemli sebebidir (Bıyık vd., 2015; Li vd., 2017; Zhu vd., 2017). Elektrik kontaklarının sürekli açılıp kapanması ile veya artan çevrim sayıları ile kontak yüzeylerindeki bozunum ve malzeme kaybı da artmaktadır (Bıyık ve Aydın, 2016). Elektrik kontaklarında oluşabilecek bir arıza kentlerde enerji çöküşü, telefon sistemlerinin bozulması ve hatta bir uçağın kontrolden çıkması gibi çeşitli trajik sonuçlar doğurabilir. Bu yüzden elektrik kontakları için tercih edilecek malzemelerin yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, yüksek sertlik, oksit, sülfür ve diğer bileşiklere karşı yüksek reaksiyon direnci ve yüksek ergime sıcaklığı gibi birtakım özelliklere sahip olmaları arzu edilir (Feng vd., 2005; Pandey vd., 2008; Cosovic vd., 2012). Ancak hiçbir malzeme bütün bu özelliklere tek başına sahip olmadığından emniyet, tedarik edilebilme, ömür ve maliyet gibi değişkenler göz önüne alınarak belirlenen her uygulama için farklı özelliklere sahip malzemelerin bir araya getirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda elektrik endüstrisindeki çoğu kontak uygulamalarında bakır (Cu) esaslı kompozit kontak malzemeleri tercih edilmektedir (Bıyık ve Aydın, 2015; Shi vd., 2015). Bakırın özellikle yüksek sıcaklıklardaki ark-erozyon performansını iyileştirmek ve sertliğini artırmak için tungsten (W) veya molibden gibi refrakter metaller kullanılmakta ve yeni kompozitler geliştirilmektedir (Bıyık, 2017; Dong vd., 2017; Yusefi ve Parvin, 2017). Kompozitlerin üretiminde geleneksel toz metalurjisi (TM) yöntemi kullanılırken, kompozit tozların üretiminde bilyeli öğütme yönteminden faydalanılmaktadır (Bıyık ve Aydın, 2017/1). Bilyeli öğütme yöntemi ile soğuk kaynak ve kırılma olayları arasındaki denge sağlandığında toz parçacıklarındaki boyut küçülmeleri ile birlikte daha homojen dağılımlı i yapılar elde edilebilmektedir (Bıyık ve Aydın, 2017/2). Homojenliğin sağlanamaması ve yerel bileşim farklılıkları (segregasyon) gibi durumlar kontakların performansını olumsuz etkileyeceğinden bilyeli öğütme yönteminin önemi burada ön plana çıkmaktadır. Bilyeli öğütme yönteminden alınacak verim, toz karışımına ilave edilecek

işlem kontrol katkılarının türü ve miktarı ile doğrudan ilişkilidir (Suryanarayana, 2004). İşlem kontrol katkıları katı, sıvı veya gaz halde olabilir. Kullanılan toz karışımının içeriğine (sünek veya gevrek toz) bağlı olarak en uygun işlem kontrol katkısının ve miktarının, yapılacak öğütme deneyleri ile belirlenmesi gerekir. Katı işlem kontrol katkıları olarak stearik asit, polietilen glikol (PEG) ve çinko stearat kullanılırken sıvı halde en çok tercih edilen işlem kontrol katkıları etanol ve metanoldür. Özellikle elektrik kontak malzemelerinin üretimi gibi yüksek saflık gerektiren uygulamalarda, katı işlem kontrol katkılarının sıvı işlem kontrol katkılarına göre içyapıda safsızlık oluşturma eğilimleri daha yüksek olabileceği için sıvı işlem kontrol katkılarına yönelim daha uygun görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada bilyeli öğütme yöntemi kullanılarak etanol ve metanol gibi iki farklı türde sıvı işlem kontrol katkısı içeren Cu-W kompozit tozları üretilmiş ve bunların toz boyutu ve morfolojisindeki değişimler incelenerek daha homojen bir içyapı elde edilmesi ve böylece kontak performansını iyileştirici etki yaratılması amaçlanmıştır.

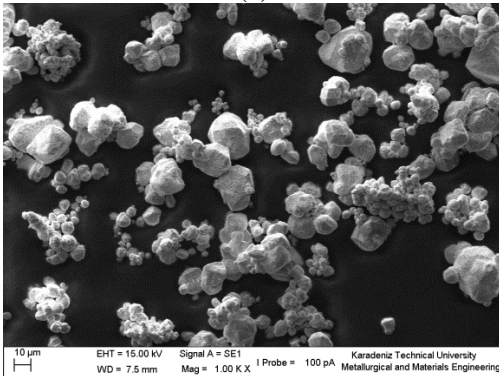
2. Amaç, Gereç ve Yöntem

Bu çalışmada matris fazı olarak Cu, takviye fazı olarak ise W tercih edilmiştir. Bilyeli öğütme deneylerinde kullanılan başlangıç tozları sırasıyla elementel Cu (maksimum toz boyutu 44 µm, % 99 saflıkta) ve W (ortalama toz boyutu 12 µm, % 99.9 saflıkta) tozlarıdır. Başlangıç toz morfolojilerinin taramalı elektron mikroskobu (Zeiss Evo LS 10) görüntüleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Öncelikle başlangıç tozları 75:25 ağırlık oranlarında karıştırılarak aynı içeriğe sahip iki karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara % 2'lik ağırlık oranında işlem kontrol katkıları (etanol ve metanol) ilave edilmiştir. Böylece iki farklı sıvı işlem kontrol katkısı içeren iki ayrı karışım elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlar tungsten karbürden imal edilen öğütme kaplarına yerleştirilmiş ve bilye malzemesi olarak yine tungsten karbürden üretilen 10 mm çapında bilyeler tercih edilmiştir. Öğütme kapları iki istasyonlu bir bilyeli öğütücüye (Retsch PM 200) yerleştirilerek, hazırlanan toz karışımlarının 300 d/dk hızda ve 10:1 bilye-toz-ağırlık oranında öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Belirli aralıklarla öğütücü durdurularak öğütme kabı sıcaklığının ortam sıcaklığına düşmesi sağlanmıştır. Her çevrim aralığı sonunda parçacık boyut analizi cihazı (Malvern Mastersizer 2000) kullanılarak ortalama toz boyutları belirlenmiş ve öğütme işlemine tekrar devam edilerek 25 saatlik

öğütme süresine erişilmiştir. Ayrıca, ortalama toz boyutunun öğütme süresi ile değişimi süresince toz morfolojisindeki değişimler taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Buna göre işlem kontrol katkısı olarak etanol ve metanolün kullanılması sonucunda son toz boyutlarında ve morfolojilerinde oluşan farklılıklar ve homojenlik durumları karşılaştırılmış ve Cu25W kompozit tozunun üretimi için %2'lik ağırlık oranında en uygun sıvı işlem kontrol katkısının türü belirlenmiştir. Bu çalışmada, mekanik alaşımlamada görülen Cu-W arasında yapısal dönüşüm oluşturmadan ziyade bilyeli öğütme yöntemiyle toz boyut küçülmeleri ile birlikte daha homojen bir içyapı oluşturma üzerine odaklanılmıştır. Böylece yerel bileşim farklılıkları en aza indirgenerek elementlerin elektrik kontak malzemesi yüzeyleri üzerinde dengeli dağılımı sağlanarak fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 1. Başlangıç toz morfolojileri; (a) Cu ve (b) W tozu.

3. Bulgular ve Tartışma

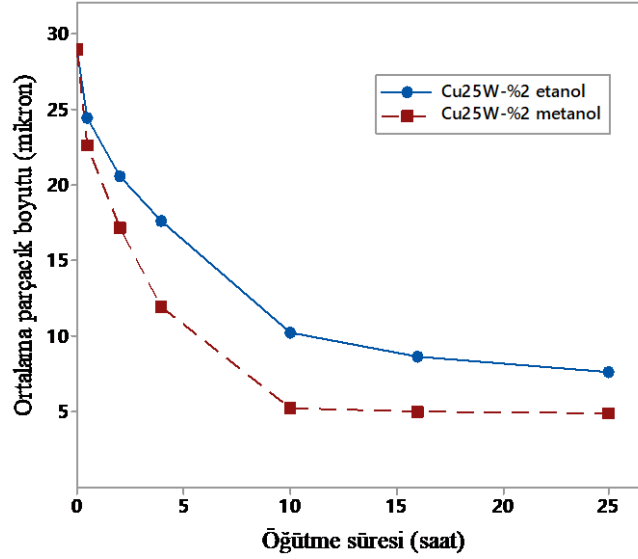
Başlangıç tozlarına ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, Cu tozunun düzensiz (Şekil 1a), W tozunun ise açılı (Şekil 1b) bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, takviye elemanı olan tungstenin matris elemanı olan bakıra göre çok daha düşük boyutlu olduğu aynı görüntülerden

desteklenmektedir. Parçacık boyut analizi cihazı kullanılarak her öğütme çevrimi sonunda Cu25W toz karışımlarından elde edilen ortalama toz boyutu değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre etanol ve metanol kullanımına bağlı olarak ortalama toz boyutu değerleri de her çevrim aralığı sonunda değişim göstermiştir. İşlem kontrol katkılı numunelerde gözlenen durumun aksine işlem kontrol katkısı içermeyen numunede artan öğütme süresi ile toz boyutlarında ilk 4 saate kadar artış gözlenmiştir (Bıyık ve Aydın, 2017/2). Bu bağlamda kısa süreli öğütmelerde işlem kontrol katkısı kullanımının toz boyutu üzerine olumlu etkisi ön plana çıkmaktadır.

Bilyeli öğütme işleminde yüksek enerjili öğütme işlemine maruz kalan toz parçacıkları bilye-toz-bilye, bilye-toz-değirmen yüzeyi çarpışmaları sonucunda hem morfolojik hem de boyutsal anlamda değişim gösterirler. Bilyeli öğütme sayesinde sürekli olarak plastik deformasyon, kırılma, soğuk kaynak, yeniden kırılma ve kaynaklanma olayları etkisi ile kademeli olarak değişim gösteren ve son derece homojen mikro yapıların elde edilebilmesi mümkündür. Bilyeli öğütme ile ilgili yapılan çalışmalar gözden geçirildiğinde öğütmenin ilk evrelerinde toz boyutunun soğuk kaynak etkisi altında genellikle dalgalandığı, ilerleyen evrelerde ise kademeli olarak azaldığı ve kararlı hale ulaştığı görüşü hakimdir (Bıyık ve Aydın, 2017). Bununla birlikte, kullanılan tozların başlangıç boyutu ve morfolojisi, öğütücü kap malzemesi, kullanılan bilye malzemesi ve boyutları, bilyeli öğütme değişkenlerinin seçimi, özellikle de işlem kontrol katkısının etkisi; işlem verimi açısından diğer dikkate alınacak etmenler arasında sayılabilir. Bu çalışmada işlem kontrol katkısı olarak etanol ve metanolün kullanılması sonucunda Cu25W toz karışımında ortaya çıkan değişimler Şekil 2'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 2, Tablo 1'deki değerlerin kullanılması ile elde edilen bir grafik olup, ortalama toz boyut değerlerinin işlem kontrol katkısından bağımsız olarak öğütme süresi ile birlikte kademeli olarak azaldığını ortaya koymaktadır. Söz konusu azalmanın derecesi özellikle ilk 10 saat için daha belirgindir. Sonrasında ise ortalama toz boyutu değerlerinde önemli ölçüde değişim gözlenmemiştir. Başlangıç ortalama toz boyutu 28.897 µm olan Cu25W tozunun 25 saatlik öğütme süresi sonunda son toz boyutu etanol ve metanol kullanılmasıyla sırasıyla 7.621 ve 4.875 µm değerlerine düşmüştür (Tablo 1). İşlem kontrol katkıları ve ortalama toz boyut değerleri incelendiğinde, metanolün etanole göre ortalama toz boyutu değerleri üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür (Şekil 2).

Tablo 1. Artan öğütme süresi ile birlikte etanol ve metanol katkılarına bağlı olarak değişen Cu25W ortalama toz boyut değerleri.

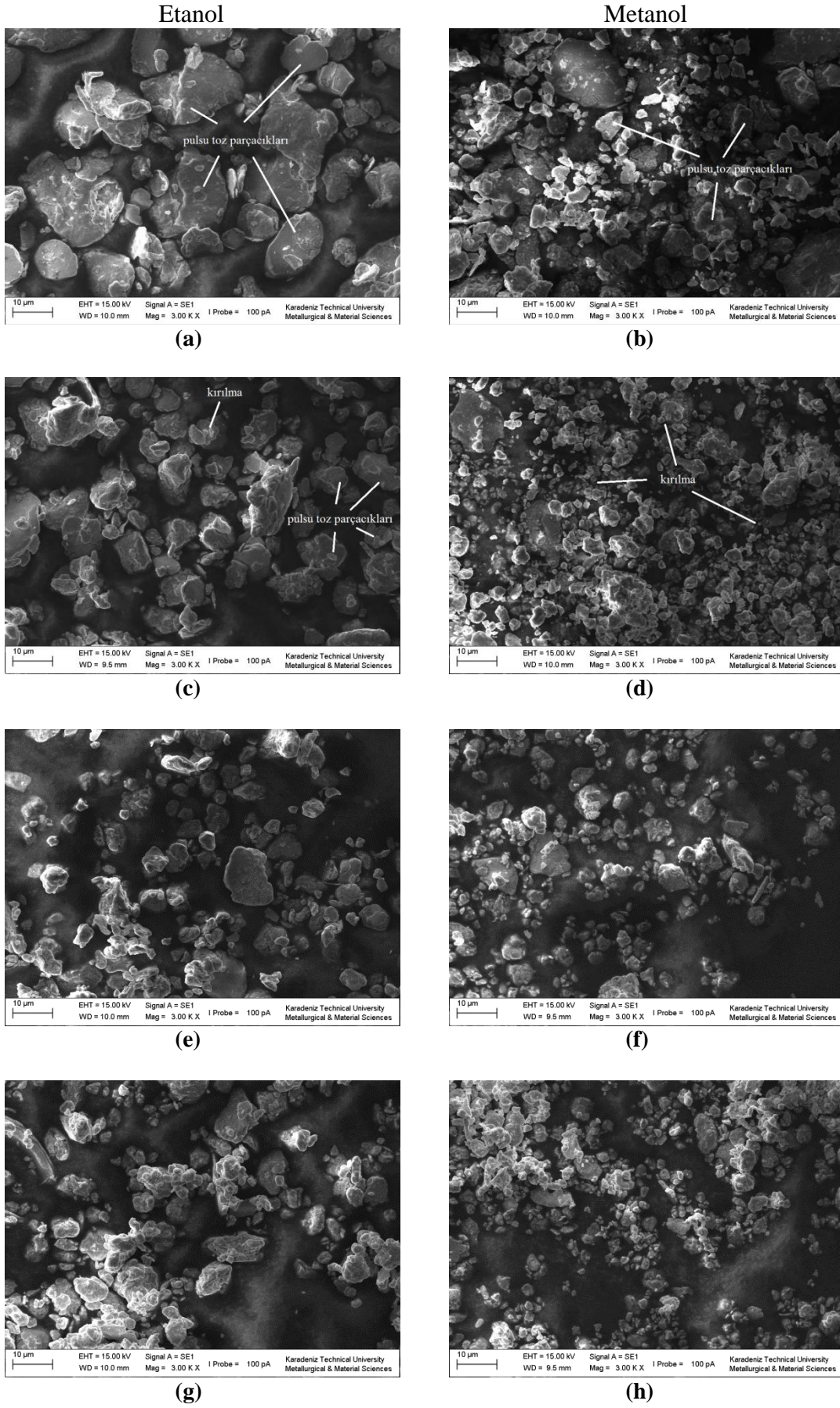
Kimyasal bileşim	Öğütme süresi (saat) ve ortalama toz boyutu (μm)						
	0	0.5	2	4	10	16	25
Cu25W (katkısız)	28.897	27.771	32.751	32.760	17.225	9.366	6.964
Cu25W-% 2 etanol	28.897	24.389	20.536	17.532	10.236	8.627	7.621
Cu25W-% 2 metanol	28.897	22.589	17.166	11.940	5.264	5.024	4.875

**Şekil 2.** Etanol ve metanol katkılarının Cu25W toz karışımının ortalama toz boyutuna etkisi.

Etanol ve metanol katkılarının 2, 10, 16 ve 25 saatlik öğütme süreleri sonunda Cu25W toz morfolojisine etkisini gösteren SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. İlk 2 saatlik öğütme süresi sonundaki toz morfolojileri incelendiğinde etanol katkıli numunede (Şekil 3a) metanol katkıli numuneye (Şekil 3b) göre daha yüksek oranda pulsu yapıların mevcut olduğu görülmektedir. Bu durum parçacık boyut analizi sonuçlarına da yansımış ve 2 saatlik öğütme süresi sonunda etanol ve metanol kullanılması sonucunda toz boyut değerleri başlangıç boyutu olan 28.897 μm değerinden sırasıyla 20.536 ve 17.166 μm değerlerine düşmüştür. Aradaki boyut farkı özellikle soğuk kaynak etkisinin kırılmaya göre baskın olmasıyla belirginleşen pulsu yapıların çoğunlukta olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum çoğunlukla sünek metal tozlarının öğütülmesi sırasında meydana gelen soğuk kaynak eğiliminin, toz parçacıklarının kırılmasını engelleyici bir düzen oluşturmasıyla ilişkilidir (Suryanarayana, 2004). Toz parçacıkları arasındaki soğuk kaynak etkisini en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için özel kimyasallar, yağlayıcılar veya yüzey işlemcileri olarak da bilinen işlem kontrol katkılarının kullanımı büyük önem taşımaktadır. Özellikle ilk 2 saatlik öğütme işlemi sonunda elde edilen toz morfolojileri

incelendiğinde takviye parçacıklarının matris tozları üzerinde yeterince homojen dağılmadığı görülmektedir. Artan öğütme süresi ile birlikte, özellikle de 10 saate kadar kırılma etkisinin bilyeli öğütmede soğuk kaynak etkisine göre daha hakim olduğu gözlenmiştir. Söz konusu süre sonunda Tablo 1'den de görüleceği üzere toz boyut değerlerinin etanol katkıli numune için 10.236 μm ; metanol katkıli numune içinse 5.264 μm değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Şekil 3c'de pulsu yapılarıdaki azalma dikkat çekerken, Şekil 3d'de ise daha etkin bir kırılma sonucu dengeli bir öğütme işleminin gerçekleştiği görülmektedir. 10 saatlik öğütme süresinin üzerinde etanol katkıli numunede kademeli bir değişim gözlenirken (Şekil 3e ve g), metanol katkıli numunede ise önemli bir değişime rastlanmamıştır (Şekil 3f ve h).

25 saatlik öğütme süresi sonunda toz boyut değerlerinin etanol ve metanol kullanımı için sırasıyla 7.621 ve 4.875 μm değerlerinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 16-25 saatlik öğütme süresi aralığında toz boyutlarında kayda değer bir boyut küçülmesi gözlenmediği de dikkate alınarak 25 saatlik öğütme süresinin takviye-matris etkileşimi açısından yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Etanol ve metanol katkılarının Cu25W toz morfolojisine etkisi; (a-b): 2, (c-d): 10, (e-f): 16 ve (g-h): 25 saatlik öğütme süresi.

Öğütme işlemine tabi tutulan tozlarda özellikle ilk 2 saatlik öğütme süresi sonunda plastik deformasyonu gösteren pulsu morfolojinin; 10 saatlik öğütme süresi sonunda kırılma sonucu oluşan düzensiz morfolojinin; 25 saatlik öğütme süresi sonunda ise kırılma ve soğuk kaynak olayları arasındaki dengenin sağlanması ile birlikte sistemin kararlı hale geldiğini gösteren eş eksenli morfolojinin hakim olduğu gözlemlenmiştir. Toz boyut değerlerinin ve Şekil 3g ve h'deki SEM görüntülerinin birlikte değerlendirilmesi sayesinde metanol kullanımının Cu25W toz boyutu ve morfolojisi üzerinde etanole göre daha olumlu bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Öğütme süresi ile birlikte artan ortam sıcaklığına bağlı olarak, işlem kontrol katkıları ergime veya buharlaşmaya maruz kalabilmektedir. Ayrıca kimyasal bileşime göre değişim gösteren hidrojen, karbon ve oksijen elementlerinin toza karışarak dağılım sertleştirilmesine katkıda bulunduğu; bazı durumlarda ise hidrojenin tozu gevreklettiği ve böylelikle de daha düşük boyutlu toz üretimine yardımcı olduğu belirtilmiştir (Suryanarayana, 2004). Bu bilgilerin ışığında etanol ve metanol kullanımına bağlı olarak son toz boyutlarında gözlemlenen değişim, iki işlem kontrol katkısının kimyasal ve ısıl kararlılıkları arasındaki farka dayandırılmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, bilyeli öğütme yöntemi kullanılarak Cu25W kompozit tozunun sentezlenmesi üzerine etanol ve metanol gibi iki farklı işlem kontrol katkısının kullanımının etkisi incelenmiştir. Öğütme süresinin artmasıyla birlikte her iki toz karışımında da ortalama toz boyutu değerlerinde kademeli bir azalma ortaya çıkmıştır. Özellikle metanol katkılı toz karışımlarında ortalama toz boyutu değerlerinde etanol katkılı numunelere göre daha etkili bir kırılma gözlenmesi sonucunda daha düşük toz boyut değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak Cu25W kompozitinin sentezinde % 2'lik ağırlık oranı için, metanol kullanımının etanol kullanımına göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklar

Bıyık, S., 2017. Characterization of Nanocrystalline Cu25Mo Electrical Contact Material Synthesized via Ball Milling. *Acta Physica Polonica A*, 132, (3), 886-888.

Bıyık, S. ve Aydın, M., 2017/1. Fabrication and Arc-Erosion Behavior of Ag8SnO₂ Electrical

Contact Materials under Inductive Loads. *Acta Physica Polonica A*, 131, (3), 339-342.

- Bıyık, S. ve Aydın, M., 2017/2. Optimization of Mechanical Alloying Parameters of Cu25W Electrical Contact Material. *Acta Physica Polonica A*, 132, (3), 909-912.
- Bıyık, S. ve Aydın, M., 2016. Investigation of the Effect of Different Current Loads on the Arc-Erosion Performance of Electrical Contacts. *Acta Physica Polonica A*, 129, (4), 656-660.
- Bıyık, S., Arslan, F. ve Aydın, M., 2015. Arc-Erosion Behavior of Boric Oxide-Reinforced Silver-Based Electrical Contact Materials Produced by Mechanical Alloying. *Journal of Electronic Materials*, 44, (1), 457-466.
- Bıyık, S. ve Aydın, M., 2015. The Effect of Milling Speed on Particle Size and Morphology of Cu25W Composite Powder. *Acta Physica Polonica A*, 127, (4), 1255-1260.
- Cosovic, V., Talijan, N., Zivkovic, D., Minic, D. ve Zivkovic, Z., 2012. Comparison of Properties of Silver-Metal Oxide Electrical Contact Materials. *Journal of Mining and Metallurgy*, 48, (1), 131-141.
- Dong, L.L., Chen, W.G., Deng, N., Song, J.L. ve Wang, J.J., 2017. Investigation on Arc Erosion Behaviors and Mechanism of W70Cu30 Electrical Contact Materials Adding Graphene. *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 923-930.
- Feng, Y., Yuan, H.L. ve Zhang, M., 2005. Fabrication and Properties of Silver-Matrix Composites Reinforced by Carbon Nanotubes. *Materials Characterization*, 55, 211-218.
- Li, H.Y., Wang, X.H., Liu, Y.F. ve Guo, X.H., 2017. Effect of Strengthening Phase on Material Transfer Behavior of Ag-based Contact Materials under Different Voltages. *Vacuum*, 135, 55-65.
- Pandey, A., Verma, P. ve Pandey, O.P., 2008. Comparison of Properties of Silver-Tin Oxide Electrical Contact Materials Through Different Processing Routes. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 15, 236-240.
- Shi, Q., Yang, J., Peng, W.X., Dong, J.Z., Chu, Y.Q., Tang, H. ve Li, C.S., 2015. Synergetic Effect of NbSe₂ and Cr₂Nb on the Tribological and Electrical Behavior of Cu-based Electrical Contact Composites. *Rsc Advances*, 5, (122), 100472-100481.
- Suryanarayana, C., 2004. *Mechanical Alloying and Milling*. CRC Press, Boca Raton, FL, 488p.

Yusefi, A. ve Parvin, N., 2017. Fabrication of Three Layered W-Cu Functionally Graded Composite via Spark Plasma Sintering. *Fusion Engineering and Design*, 114, 196-202.

Zhu, S., Liu, Y., Tian, B., Zhang, Y. ve Song, K., 2017. Arc Erosion Behavior and Mechanism of Cu/Cr20 Electrical Contact Material. *Vacuum*, 143, 129-137.