



## Çok Katmanlı Piezoelektrik Seramiklerin Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimlerinin İncelenmesi

Investigation of The Temperature Dependent  
Changes of The Dielectric Properties of Multilayer  
Piezoelectric Ceramics

Mert GÜL<sup>1</sup>, Ayşe Gül TOKTAŞ<sup>2</sup>, Hakan GÜLEÇ<sup>3</sup>, Aydın DOĞAN<sup>4</sup>\*

\* Nanotech İleri Tek. Malz. Elk-Elkt. Sis. San. Tic. A.Ş., Eskişehir, Türkiye

<sup>1</sup> Malzeme Bil. Ve Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye  
• mertggg@gmail.com • ORCID > 0000-0001-8618-6261

<sup>2</sup> Malzeme Bil. Ve Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye  
• agakyurekli@gmail.com • ORCID > 0000-0002-5052-2574

<sup>3</sup> Nanotech İleri Tek. Malz. Elk-Elkt. Sis. San. Tic. A.Ş., Eskişehir, Türkiye  
• hkn.gulecc@gmail.com • ORCID > 0000-0002-1754-7470

<sup>4</sup> Malzeme Bil. Ve Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye  
• adogan@eskisehir.edu.tr • ORCID > 0000-0002-8122-2996

### Makale Bilgisi / Article Information

Makale Türü / Article Types: Araştırma Makalesi / Research Article

Geliş Tarihi / Received: 28 Haziran / June 2021

Kabul Tarihi / Accepted: 18 Ağustos / August 2021

Yıl / Year: 2021 | Cilt – Volume: 1 | Sayı – Issue: 1 | Sayfa / Pages: 33-41

**Atrf/Cite as:** Gül, M., Toktaş, A. G., Güleç, H. ve Doğan, A. "Çok Katmanlı Piezoelektrik Seramiklerin Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimlerinin İncelenmesi - Investigation of The Temperature Dependent Changes of The Dielectric Properties of Multilayer Piezoelectric Ceramics". Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi - Ondokuz Mayıs University Journal of Engineering Sciences And Technology, 1(1), September :33-41

**Sorumlu Yazar:** Mert GÜL

## ÇOK KATMANLI PİEZOELEKTRİK SERAMİKLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ:

Çok katmanlı piezoelektrik seramiklerin üretimleri, katmanlar arasında değerli metal içeren iletken bir yapı kullanılarak yapılmaktadır. Bu iletken yapılar platin, paladyum, gümüş, altın içerikli olabilmektedir. Yaygın olarak kullanılanlardan bir tanesi de gümüş/paladyum (Ag/Pd) dur. Değerli metalin oranı ise maliyetten dolayı düşürülmek istenmektedir. Bu çalışmada katkılı ve katkısız PZT-5A kompozisyonu kullanılarak 9/1, 7/3 ve 10/0 Ag/Pd içeriğine sahip çok katmanlı piezoelektrik seramikler üretilmiştir. Bu malzemelerin elektriksel özellikleri piezoelektrik seramiğin içeriğine ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada piezoelektrik PZT-5A kompozisyonun içeriğine  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkılanarak sinterleme sıcaklığı düşürülmüştür ve böylece farklı paladyum oranına sahip Ag/Pd elektrot kullanılarak çok katmanlı seramik üretimi yapılabilmektedir. Farklı içerikteki iç elektrot kullanılarak üretilen seramiklerin uygulama sıcaklığına bağlı değişimleri de farklılık göstermektedir. Bu çalışmada 9/1, 7/3 ve 10/0 Ag/Pd elektrot kullanılarak üretilen çok katmanlı piezoelektrik seramiklerin  $10^\circ\text{C}$ - $100^\circ\text{C}$  arasındaki sıcaklık değişimine bağlı olarak piezoelektrik ve dielektrik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre 10/0 Ag/Pd kullanılarak üretilen çok katmanlı

piezoelektrik seramiklerin sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri diğer içerikteki elektrot malzemeler kullanılarak üretilen çok katmanlı seramiklerden daha fazla değişime uğramıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çok katmanlı; Piezoelektrik; Sıcaklık; Dielektrik; PZT

## INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENT CHANGES OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF MULTILAYER PIEZOELECTRIC CERAMICS

ABSTRACT:

The production of multilayer piezoelectric ceramics is made using a conductive structure containing precious metals between layers. These conductive structures can contain platinum, palladium, silver and gold. One of the commonly used ones is silver/palladium (Ag/Pd). The ratio of precious metals is desired to be reduced due to cost. In this study, multilayer piezoelectric ceramics with 9/1, 7/3 and 10/0 Ag/Pd contents were produced using doped and undoped PZT-5A composition. The electrical properties of these materials vary depending on the content of the piezoelectric ceramic and the sintering temperature. In this study, the sintering temperature was reduced by adding  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  to the piezoelectric PZT-5A composition and thus multilayer ceramic production could be made by using Ag/Pd electrode with different palladium ratio. Variations of ceramics produced using inner electrodes with different contents also differ depending

on the application temperature. In this study, piezoelectric and dielectric properties of multilayer piezoelectric ceramics produced with 9/1, 7/3 and 10/0 Ag/Pd were investigated depending on the temperature change between  $10^\circ\text{C}$ - $100^\circ\text{C}$ . According to the results obtained from the study, the temperature dependent dielectric properties of the multilayer piezoelectric ceramics produced with 10/0 Ag/Pd electrode have changed more than the multilayer ceramics produced using other electrode material.

**Keywords:** Multilayer; Piezoelectric; Temperature; Dielectric; PZT

## Öne çıkanlar

Çok katmanlı piezoelektrik seramikler yüksek hassasiyet ve yüksek mekanik mukavemet isteyen uygulamalarda kullanılabilmektedir. Bu çalışmada çok katmanlı piezoelektrik seramikler düşük sıcaklıkta sinterlenebilen katkılı PZT-5A kompozisyonlar ve farklı Ag/Pd içeriğine sahip elektrotlar kullanılıp şerit döküm yöntemiyle üretilerek sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir. Burada Ag/Pd oranı iletken özellik kazanması için gerekli olan sinterleme sıcaklığını değiştirmektedir. Bu sebeple eniyileştirme yapılarak farklı sıcaklıkta yapılan uygulamalar için çalışma gerçekleştirilmiştir

## GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler havacılık, uydur ve uzay teknolojileri, savunma sanayi, otomotiv ve biyomedikal uy-

gulamalar, imalat sanayi ve elektrik-elektronik sektörü gibi birçok sektörde sensör ve aktüatör olarak kullanım alanına sahiptir. Piezoelektrik seramikler, ultrasonik görüntüleme, su altı görüntüleme, dizel injeksiyon sistemleri ve hassas deplasman kontrol uygulamaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu uygulamalardaki ihtiyaçlara yönelik olarak yüksek mekanik dayanıma ve düşük sürüm voltajına sahip piezoelektrik seramiklere gereksinim duyulmuştur. Çok katmanlı seramikler bu ihtiyaçtan doğmuştur [1]. 10-300 mikron kalınlığında seramik-polimerik katmanlar şerit döküm yöntemiyle üretildikten sonra elektrotlanarak üstüste getirilir. Bu katmanlı yapı sinterlenip terminasyonu yapıldıktan sonra polarize edilir ve çok katmanlı seramikler böylece üretilmiş olur. Bu seramiklerin üretimleri, katmanlar arasında değerli metal içeren iletken bir yapı kullanılarak yapılmaktadır. Bu iletken yapılar platin, paladyum, gümüş, altın içerikli olabilmektedir. Ag/Pd karışımı ise maliyet düşürme çalışmaları kapsamında çok katmanlı seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır [2].

Aktüatör uygulamalarında kullanılan piezoelektrik malzemelerin farklı sıcaklık uygulamalarına bağlı olarak elektriksel özelliklerinde düşüş meydana gelmektedir. Kurşun içerikli PZT tabanlı malzemelerin sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerinin davranışları uzun yıllardır araştırılmaktadır. Aktüatör uygulamalarında sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerin değişimi davranışı tahmin edilebilir malzemeler geliştirilerek ürün kayıpları belirlenebilir.

Farklı fazlardaki kompozisyonlara ve Morfotropik Faz sınırı kompozisyonlarındaki sıcaklık değişiminin elektriksel özelliklere etkisini görmek üzere PZT ince filmler üzerinde yapılan çalışmada dielektrik sabite ve  $d_{33}$  değerinin arttığına ancak 30/70 oranında Zr/Ti içeren kompozisyonun değerinin diğer kompozisyonlara nazaran daha az olduğu görülmüştür. Bu durum Curie sıcaklığının daha yüksek olmasıyla açıklanmıştır [3]. Nb-Li içeren PZT kompozisyonunda dielektrik sabite değeri oda sıcaklığında 1800 değerinden 250°C'de 4000 değerine,  $d_{33}$  değeri ise 330 pC/N değerinden 680 pC/N değerine ulaşmıştır [4]. PZT-5H kompozisyonunda 0-40°C arasındaki dielektrik sabite değişiminin %33 değerine ulaşabileceği [5] belirtilmiştir. PZT tabanlı PZT-4, PZT-5A ve PZT-5H tip piezoelektrik seramiklerde yapılan çalışmalarda dielektrik sabitesi değeri PZT-5H seramiklerde düşük sıcaklıklarda daha fazladır. Koersif elektrik alan değerleri düşmüş olup, PZT-5H tip seramiklerde düşüşün daha fazla olduğu görülmektedir [6]. Bunun yanında çok katmanlı seramiklerin de sıcaklığa bağlı elektriksel özellikleri değişimlerine yönelik çalışmalar mevcuttur [7]. Ancak hem kompozisyonel içeriği farklı hem de iç elektrot pişirim sıcaklığı farklı olarak üretilen yekpare (bulk) seramik ve çok katmanlı seramiklerde bu değişim incelenmemiştir. Bu çalışmada ise sıcaklık farklılığının iç elektrottan mı yoksa kompozisyonundan mı kaynaklandığını görmek üzere hem kompozisyonundan üretilen peletlerde sıcaklık çalışması yapılmış hem de farklı iç elektrot kullanılarak üretilen çok katmanlı seramiklerin sı-

caklığa bağlı davranışları incelenmiştir. Bu sayede farklılığın kompozisyonel özelliklerden, iç elektrot malzemesinden veya bu ikisinin etkileşiminden kaynaklanma oranı gözlenebilecektir.

### MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada ticari olarak kullanılan PZT-5A tozuna 0.1wt% ve 0.2 wt% oranlarında  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkılanmıştır. Elde edilen kompozisyonlar 24 saat boyunca etanol ortamında bilyalı değirmende zirkon bilyalarla karıştırma-öğütme işlemine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen kompozisyon karışımları döner kurutucuda kurutulmuş ve preslenebilmesi için PVA bağlayıcı eklenmiştir. Bağlayıcısı eklenen toz kompozisyonları ve PZT-5A tozu 1.5 ton/cm<sup>2</sup> oranında ön şekillendirilmiş ve sonrasında 200 MPa eşeksenli olarak preslenmişlerdir. Bu presleme sonrasında elde edilen pelet numuneler; PZT-5A için 1250°C-2saat, 0.1wt%  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkılanmış numuneler 975°C-4 saat ve 0.2wt%  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkılanmış numuneler ise 875°C-4saat alumina pota içerisinde sinterlenmişlerdir. Sinterlenme sonucunda elde edilen peletler yüzey paralelliği sağlandıktan sonra iletken özellik sağlanması için elektrotlanmışlardır. Elektrotlanan numuneler 2.4 kV/mm değerinde 90-100 °C sıcaklıktaki yağ banyosu içerisinde polarize edildikten sonra elektriksel ölçümleri Agilent 4294A kazanç-faz analizöründe yapılmıştır.  $d_{33}$  değerleri ise Sinocera YE2370  $d_{33}$  metre kullanılarak yapılmıştır.

### Çok Katmanlı Seramik Üretimi

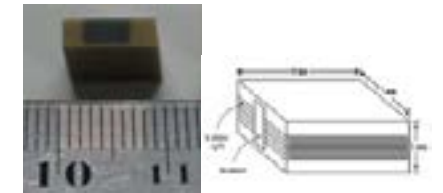
Plastikleştirici, bağlayıcı ve köpük giderici olarak adlandırılan polimerik malzemeler ve kompozisyon üretimi sonucu elde edilen PZT toz karışımları şerit döküm çamuru hazırlamak üzere 24 saat boyunca bilyalı sistemde karıştırılmışlardır. Şerit döküm cihazı kullanılarak 55-65 mikron kalınlığında dökülüp kurutularak elde şeritler daha sonra 7/3 Ag/Pd (Gümüş paladyum), 9/1 ve 10/0 elektrot pasta ile elektrotlanmışlardır. Elektrotlanan şeritler 50 Bar basınçla üstüste getirilmiş, 60°C sıcaklık altında yapışmaları sağlanmıştır. Elde edilen katmanlanmış yığınlar elektrot desenine uygun şekilde kesilmişlerdir. Kesilen ham malzemeler 50°C sıcaklık altında 15 MPa basınçla birlikte 3 dk boyunca yoğunlaştırılmışlardır. Yoğun haldeki farklı Ag/Pd oranındaki elektrotlara sahip ham seramikler 875°C-1120°C aralığındaki farklı sıcaklıklarda 4 saat boyunca sinterlenmişlerdir. Çok katmanlı seramik üretim akım şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çok katmanlı seramik üretim akım şeması [8]

Çok katmanlı seramik üretiminde kullanılan metal tabanlı iç elektrot ve seramiklerin ısı genleşme katsayıları farklıdır. Bu farklılık sinterleme esnasında malzemelerde laminasyon problemlerine, çatlaklara ve kırılmalara sebep olmaktadır. Bu hatalar çok katmanlı seramiklerde güvenlik problemlerini ortaya çıkarmaktadır.

Sinterleme sonrasında elde edilen seramiklerin önce yüzey işlemleri yapıldıktan sonra dış terminasyon elektrotları yapılmıştır. Elektriksel bağlantıları yapılan seramikler 60°C'de 5 dakika süresince polarize edilmişlerdir. Agilent 4294 A Kazanç-Faz analizöründe elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Şekil 2'de, sinterlenerek yüzey işlemleri yapılan çok katmanlı seramik ve şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2. Elde edilen çok katmanlı seramik ve şematik görünümü

### Sıcaklık Testleri

Sıcaklık testleri için Polyscience yağ banyosu içerisine tüp daldırılarak sıcaklık değişimleri oluşturulmuştur. Bu tüp içerisine ayrıca termokupl daldırılarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu esnada sıcaklık istenilen değerlere ulaşınca Agilent 4294 A cihazında 1 kHz değerinde kapasitans ölçümleri

yapılmıştır. Dielektrik sabite değeri şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$K^T = \frac{tC}{A\epsilon_0} \quad (1)$$

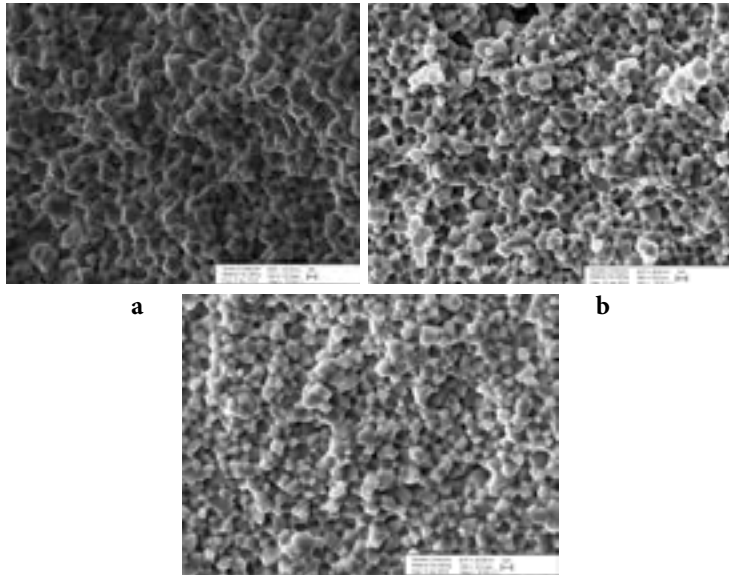
Burada  $t$  (m) numunenin kalınlığı,  $C$  (nF) kapasitansı,  $A$  (m<sup>2</sup>) yüzey alanı,  $\epsilon_0$  ise havanın dielektrik sabitesi ( $8,85 \times 10^{-12}$  F/m) alan ve kalınlık değeri aynı olan numunelerde belirleyici özellik olarak sunulmuştur.

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Lityum atomunun atom boyutu yaklaşık olarak ( $0,74^\circ$ ) olarak verilmektedir. Literatürde yer alan bilgilere göre  $ABO_3$  perovskit yapısında B yerleşimine atom boyutu yakın olan  $Ti^{4+}$  atomunun ( $0,61A^\circ$ ) yerine yerleşerek, latis boyunun uzamasına ve tetragonallığın

artmasına neden olmaktadır. X-ışını deseni sonuçları bu bulguyu desteklemektedir [9].  $Li_2CO_3$  katkısıyla birlikte mikroyapıda da belirgin değişimler bulunduğu kayıtlara geçmiştir [10]. Yapılan çalışmada katkısız ve katkılı seramiklerin mikroyapısında değişimler elektron mikroskobu aracılığıyla incelenmiştir (Şekil 3).

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde  $Li_2CO_3$  katkısıyla birlikte sıvı faz kalıntılarının tane aralarında olduğu görülmektedir. Ayrıca literatürle de uyumlu olarak  $Li_2CO_3$  katkısı yapıldığında tane boyutunun düştüğü görülmektedir. Bunun yanında  $Li_2CO_3$  katkısıyla birlikte yapıda yer yer boşlukların olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeninin ise  $Li_2CO_3$  uçuculuğu olduğu söylenmektedir [11].



Şekil 3. Katkısız ve katkılı PZT-5A kompozisyonları sinterleme sonrası elde edilen elektron mikroskobu görüntüleri a) katkısız PZT-5A seramik b) 0.1%  $Li_2CO_3$  katkılı yekpare PZT-5A seramik c) 0.2%  $Li_2CO_3$  katkılı yekpare PZT-5A seramik.

Tablo 1. Lityum katkılı ve katkısız kompozisyonla üretilen yekpare pelet numunelerin elektriksel özellikleri

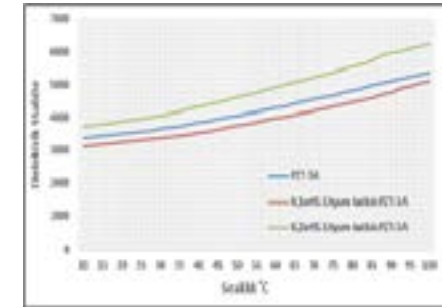
| $Li_2CO_3$ katkısı% | Sıcaklık (°C) | $d_{33}$ (pC/N) | $Q_E$ | $\tan \delta$ | $k_t$ | $Q_m$ | $K^T$ |
|---------------------|---------------|-----------------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| 0.0                 | 1250°C        | 600             | 58    | 0.0172        | 0.65  | 66    | 3881  |
| 0.1                 | 975°C         | 580             | 53    | 0.0188        | 0.60  | 64    | 3435  |
| 0.2                 | 875°C         | 710             | 42    | 0.0238        | 0.64  | 49    | 3990  |

Katkısız ve katkılı kompozisyonlar kullanılarak üretilen peletlerin piezoelektrik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Bu tabloya göre farklı  $Li_2CO_3$  katkılarını ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen pelet seramiklerin özellikleri nispeten çok büyük farklılık göstermektedir.  $d_{33}$  değerleri 580 ile 710 pC/N aralığında değişmektedir. Kapling sabitesi olarak adlandırılan  $k_t$  değeri ise  $0.6^\circ$  dan büyüktür. Dielektrik sabitesi değeri olan  $K^T$  değeri 3500 ve üzerindedir. Kayıp faktörü olan  $\tan \delta$  değerleri birbirine yakındır. Mekanik kalite faktörü değeri olarak adlandırılan  $Q_m$  değeri, katkısız kompozisyon değerine nispeten yakındır. Bu sonuca bakılarak uygulama alanlarında birbirlerinin yerine kullanılabileceklerdir. Pelet numunelerin dielektrik sabite değerinin sıcaklığa bağlı değişimi karşılaştırmalı olarak Şekil 4'te verilmektedir.

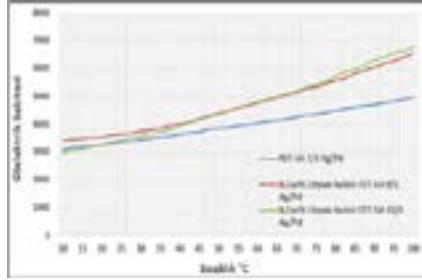
Piezoelektrik malzemelerin özellikleri iki farklı mekanizmanın kombinasyonu ile açıklanır. Tek domainin hareketi içsel katkılar olarak adlandırılır. Malzemenin domain hareketi gibi diğer bileşenlerinin etkisine ise dışsal katkılar denmektedir. İçsel katkılarının etkisi hacme uygulandığında çok küçük olmaktadır. Ancak dışsal katkılarının etkinliği özellikle domain duvarı hareketliliği, atomların sahip olduğu enerji ile ilgili olduğundan sıcaklık arttıkça atomların

enerjileri artar. Bu etkiyle birlikte domain duvarı hareketliliği de artar [12]. Sıcaklık etkisiyle birlikte dielektrik sabitesi artması dielektrik malzemelerde bilinen bir fenomendir [13]. Burada sıcaklığa bağlı olarak değişimin nasıl olduğu ve yüzde değeri takip edilmektedir. Lityum katkısı arttıkça malzemenin tane aralarındaki boşlukların arasına sıvı faz yerleşmekte ve bunun sonucunda dielektrik sabite değeri artmaktadır.  $Li_2CO_3$  katkısıyla sıcaklığa bağlı olarak değişim artmaktadır. Katkısız PZT-5A kompozisyonunda değişim %58 iken, %0.1  $Li_2CO_3$  katkı yapıldığında %63 değerine %0.2  $Li_2CO_3$  katkı yapıldığında ise %67 değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4. Farklı  $Li_2CO_3$  katkılı pelet numunelerin dielektrik sabite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Çalışmanın devamında katkılı ve katkısız PZT-5A kompozisyonu kullanılarak üretilen farklı iç elektrotlara sahip çok katmanlı seramiklerin sıcaklığa bağlı olarak değişimi incelenmiştir.



**Şekil 5.** Farklı iç elektrot kullanılarak üretilen çok katmanlı seramiklerin dielektrik sabite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Katkısız PZT-5A ve 7/3 Ag/Pd kullanarak üretilen çok katmanlı seramiklerde değişim %48 iken, %0.1  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkı yapıldığında ve %91 değerine %0.2  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkı yapıldığında ise %128 değerine ulaşmaktadır. Değişim oranları tablo halinde verilmektedir (Tablo 2).

Tablodan görüldüğü üzere sıcaklık

**Tablo 2.** Farklı özelliklerdeki yekpare ve çok katmanlı seramiklerin sıcaklığa bağlı Dielektrik Sabite değişimi

| Özellikler                            |                     | % Değişim |                      |
|---------------------------------------|---------------------|-----------|----------------------|
| Katkı oranı                           | Kullanılan elektrot | Yekpare   | Çok Katmanlı Seramik |
| Katkısız                              | 7/3 Ag/Pd           | 58        | 48                   |
| %0.1 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ katkılı | 9/1 Ag/Pd           | 63        | 91                   |
| %0.2 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ katkılı | 10/0 Ag/Pd          | 67        | 128                  |

## SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı Ag/Pd oranındaki iç elektrotlara sahip PZT-5A kompozisyonu kullanılarak üretilen çok katmanlı piezoelektrik seramiklerin sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Bu kapsamda farklı Ag/Pd içerik oranına ve bu sebeple farklı sin-

terleme sıcaklığına sahip çok katmanlı piezoeseramik üretimi için daha düşük sinterleme sıcaklığına sahip PZT-5A kompozisyonu geliştirilmiştir. Farklı Ag/Pd içeriğindeki elektrot pastaların etkilerini gözlemlemek üzere piezoelektrik seramik pelet numuneler üretilmiş ve bunların sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri de incelenmiştir. Bu

terleme sıcaklığına sahip çok katmanlı piezoeseramik üretimi için daha düşük sinterleme sıcaklığına sahip PZT-5A kompozisyonu geliştirilmiştir. Farklı Ag/Pd içeriğindeki elektrot pastaların etkilerini gözlemlemek üzere piezoelektrik seramik pelet numuneler üretilmiş ve bunların sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri de incelenmiştir. Bu

çalışmada çıkan sonuçlara göre sinterleme sıcaklığını düşüren  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  katkısı dielektrik sabite değişiminde %10 luk bir değişime yol açmaktadır. 10/0 Ag/Pd iç elektrot pasta ise %60 oranında dielektrik sabite değişimine sebebiyet vermektedir. Bu oranlardaki malzemeler kullanılırsa kompozisyonel içeriğin sıcaklığa bağlı değişimlerinin de incelenmesi gerekmektedir. Özellikle dizel enjeksiyon sistemlerinde ve hassas deplasman kontrolü gereken sistemlerde çok katmanlı seramiklerin ve sistem tasarımlarının sıcaklık farklılıklarına uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Uygulamalarda bu etki gözönünde bulundurulmalıdır.

## Teşekkür

Deneysel çalışmalarda yardımcılarından ötürü Nebahat Bıyıklı'ya, Ali Bıyıklı ve Görkem Hatipoğlu'na teşekkürler.

## KAYNAKLAR

1. Uchino K., Takahashi S., "Multilayer Ceramic Actuators, Current Opinion, Ceramics, Composites and Intergrowths, ss. 698- 705, 1996.
2. I.H. Im, H.S. Chung, D.S. Paik, C.Y. Park, J.J. Park, S.G. Bae "Multilayer piezoelectric actuator with AgPd internal electrode" Journal of the European Ceramic Society, c.20, ss. 1011-1015, 2000.
3. H. Maiwa, S.H. Kim, N. Ichinose "Temperature dependence of the electrical and electromechanical properties of lead zirconate titanate thin films" Applied Physics Letters c. 83, ss. 4396, 2003.
4. C. Miclea, C. Tanasoiu, L. Amarande, M. Cioanher, L. Trupina, C.T. Miclea, C.David "Temperature Dependence Of The Main Piezoelectric Parameters Of A Nb-Li Doped Pzt Ceramic" 2006 International Semiconductor Conference, ss. 279-282, 2006.
5. M. G. Cain. Characterisation of Ferroelectric Bulk Materials and Thin Films, London, UK, Springer, 2014.
6. M. W. Hooker "Properties of PZT-Based Piezoelectric Ceramics Between -150 and 250°C" NASA / CR- 1998-208708.
7. J. Pritchard, C. R. Bowen, F. Lowrie "Multilayer actuators: review" British Ceramic Transactions, c.100, ss. 265-274, 2001.
8. M. Gül. Çok katmanlı Piezoelektrik Seramiklerin Tasarımı, Üretimi ve Elektriksel Yorulma Davranışlarının Karakterizasyonu. PhD, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2019.
9. L.D. Vuong, P.D. Gio "Effect of  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  addition on the sintering behavior and physical properties of PZT-PZN-PMnN ceramics" International Journal of Materials Science and Applications, c.2, ss. 89-93, 2013.
10. Y.D. Hou, L.M. Chang, M.K. Zhu, X.M. Song, H. Yan "Effect of  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  addition on the dielectric and piezoelectric responses in the low-temperature sintered 0.5PZN-0.5PZT systems" Journal Of Applied Physics, c. 102, ss. 084507, 2007.
11. J. Yoo, C. Lee, Y. Jeong, K. Chung, D. Lee, D. Paik. "Microstructural and piezoelectric properties of low temperature sintering PMN-PZT ceramics with the amount of  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  addition." Materials Chemistry and Physics, c.90, ss.386-390, 2005.
12. S Davoudi. Effect of Temperature and Thermal Cycles on PZT Ceramic Performance in Fuel Injector Applications. MSc, University of Toronto, Canada, 2012.
13. A.J. Moulson, J.M. Herbert. Electroceramics, 2nd ed. West Sussex, İngiltere, John Wiley & Sons Ltd, 2003.