

*Araştırma Makalesi - Research Article*

## Farklı Oranlarda Sürfaktan İçeren PbS İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

### Investigation of Physical Properties of PbS Thin Films Containing Surfactant in Different Ratios

Ersin Yücel<sup>1\*</sup>

*Geliş / Received: 28/02/2022*

*Revize / Revised: 07/04/2022*

*Kabul / Accepted: 20/04/2022*

#### ÖZ

Bu çalışmada, polikristal kurşun sülfür ince filmler, kokamid dietanolamin varlığında kimyasal banyo depolama tekniği kullanılarak cam altlıklar üzerinde başarılı bir şekilde biriktirilmiştir. Farklı oranlarda kullanılan kokamid dietanolaminin PbS ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerindeki etkileri X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), taramalı prob mikroskopisi (SPM) ve UV-görünür spektroskopi analizleri kullanılarak incelendi. XRD analizlerinden kokamid dietanolamin katkı miktarının artmasıyla PbS ince filmlerin kristal büyüklüklerinin 12.57 nm' den 5.43 nm' ye azaldığı elde edilmiştir. Ayrıca mikrogerilme ve dislokasyon yoğunluğu değerleri kokamid dietanolamin katkı miktarına bağlı olarak artmıştır. SEM analizi kokamid dietanolamin katkısının nanoyapılı PbS ince filmlerin yüzey morfolojilerini etkilediğini göstermektedir. SPM analizi kokamid dietanolamin katkısının artmasıyla ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığını göstermiştir. UV-görünür spektroskopi analizi ile %1 kokamid dietanolamin katkı miktarında PbS ince filmin optik geçirgenlik değerinin yaklaşık olarak 3 kat arttığı elde edilmiştir. Ayrıca, kokamid dietanolamin miktarına bağlı olarak PbS ince filmlerin optik bant aralığı değerleri 1.87 eV' tan 2.53 eV' a artmıştır.

**Anahtar Kelimeler-** *PbS, İnce Film, Sürfaktan, Kimyasal Banyo Depolama*

#### ABSTRACT

In the present study, polycrystalline lead sulfide thin films have been successfully deposited on glass substrates using chemical bath deposition technique in the presence of cocamide diethanolamine. The effects of cocamide diethanolamine used in different ratios on the structural, morphological, and optical properties of PbS thin films were investigated using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), scanning probe microscopy (SPM) and UV-visible spectroscopy analyses. From the XRD analysis, it was obtained that the crystal size of the PbS thin films decreased from 12.57 nm to 5.43 nm with the increase in the amount of cocamide diethanolamine additive. In addition, the microstrain and dislocation density values increased depending on the amount of cocamide diethanolamine additive. SEM analysis shows that cocamide diethanolamine additive affects the surface morphology of nanostructured PbS thin films. SPM analysis showed that the surface roughness values of the thin films increased with the increase of cocamide diethanolamine additive. By UV-visible spectroscopy analysis, it was obtained that the optical transmittance value of the PbS thin film increased approximately 3 times at the amount of 1% cocamide diethanolamine additive. In addition, the optical band gap values of PbS thin films increased from 1.87 eV to 2.53 eV depending on the amount of cocamide diethanolamine.

**Keywords-** *PbS, Thin Film, Surfactant, Chemical Bath Deposition*

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişimi: [eyucel@mku.edu.tr](mailto:eyucel@mku.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0001-8179-0179>)  
Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye

## I. GİRİŞ

Kurşun sülfür (PbS) ince filmler IV-VI grubuna ait p-tipi yarıiletken malzemelerdir ve metal kalkojenit ince filmler arasında önemli bir yere sahiptir [1]. PbS, 300 K sıcaklıkta 0.41 eV direkt bant aralığına sahiptir. Kurşun sülfürün direkt bant aralığı 0.41 eV ile 2.3 eV aralığında değişebilir [2]. PbS ince filmler, fotodedektör ve gaz sensörü gibi uygulama alanlarına sahiptir. Ayrıca, güneş pilleri için bir soğurucu olarak ta kullanılmaktadır [3-5]. PbS ince filmler, kimyasal banyo depolama (CBD), ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR), sol-jel, kimyasal buhar biriktirme, elektrodepozisyon, vakum buharlaştırma, darbeli lazer biriktirme, sprey piroliz gibi yöntemlerle üretilmektedir [6-13]. PbS ince filmleri üretmek için kullanılan yöntemler arasında kimyasal banyo depolama yöntemi, geniş yüzeylere uygulanabilmesi, düşük sıcaklıkta üretilebilmesi ve düşük maliyetli olması gibi birçok avantaja sahiptir [6]. İnce filmlerin yüzey morfolojileri ve optik özellikleri fotovoltaj cihazların uygulamaları açısından önemlidir. İnce filmlerin üretiminde sürfaktan kullanılması ile filmlerin yüzey morfolojileri ve yüzey pürüzlülük değerleri değiştirilebilmektedir. Filmlerin yüzey morfolojilerindeki değişim optik özelliklerini etkilemektedir [1,14]. Sürfaktan kelimesi surface active agent sözcüklerinin harflerinden oluşan bir kısaltmadır ve yüzey aktif madde yerine kullanılır. Yüzey aktif madde suda veya sulu bir çözeltide çözündüğünde yüzey gerilimini etkileyen (çoğunlukla azaltan) kimyasal bileşiktir. Yüzey aktif maddeler aynı zamanda iki sıvı arasındaki yüzeyler arası gerilimi de etkiler [15]. Bu çalışmada, literatürde ilk kez PbS ince filmlerin üretiminde sürfaktan olarak kokamid dietanolamin kullanılmıştır. Farklı oranlarda kullanılan sürfaktanın PbS ince filmlerin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Kurşun sülfür ince filmler depozisyon çözeltisinde sürfaktan kullanılmadan ve %0.25, %0.50, %1.00 oranlarında sürfaktan kullanılarak kimyasal banyo depolama yöntemiyle üretilmiştir. PbS ince filmlerin üretimi için 2.5 mL, 0.5 M kurşun (II) asetat trihidrat, 3 mL, 1.0 M tiyoüre, 1 mL, 1.0 M trietanolamin ve 0,1 mL, 1.0 M tri-sodyum sitratın art arda eklenmesiyle kimyasal banyo hazırlandı. Tiyoüre sülfür kaynağı olarak, trietanolamin ve tri-sodyum sitrat ise kompleksleştirici olarak kullanılmıştır. Kimyasal banyo çözeltisine yüzey aktif madde olarak kokamid dietanolamin eklenmiştir. Kimyasal banyo çözeltisinin pH değeri 2.0 M NaOH ilave edilmek suretiyle 12.5 olarak belirlendi. PbS ince filmlerin (75 x 25 x 1 mm) boyutlarındaki cam yüzey üzerine depolama işlemi sonrasında tüm PbS kaplı filmler saf su ile yıkandı ve kurutuldu. XRD ölçümleri için Rigaku Smart Lab X-ışını kırınım ölçer kullanılmıştır. Sentezlenen PbS filmlerinin morfolojisini araştırmak için JEOL 5500/ OXFORD Inca-X SEM kullanıldı. Numunelerin optik özellikleri, UV-görünür spektrofotometre (Thermo Scientific Evolution 160) kullanılarak incelenmiştir. PbS ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri taramalı prob mikroskobu (Hysitron TI 950 TriboIndenter) ile ölçülmüştür.

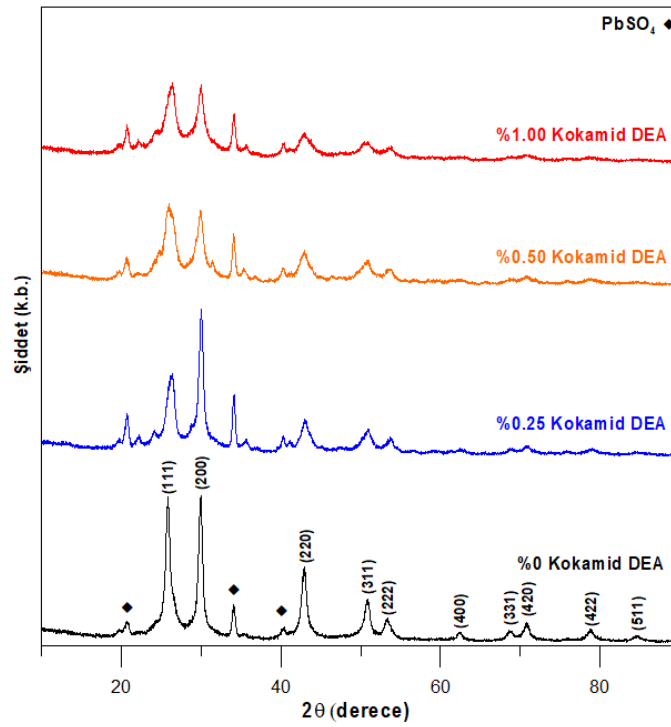
## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

### A. Yapısal Özellikler

PbS ince film depolama çözeltisinde sürfaktan olmadan üretilen filmin XRD deseni ile farklı oranlarda sürfaktan kullanılarak üretilen ince filmlerin XRD desenleri Şekil 1' de görülmektedir. Şekil 1' den tüm numunelerin XRD desenlerinin polikristal PbS faz yapısında olduğu görülmektedir. XRD desenlerinin incelenmesi sonucunda PbS ince filmlerin kübik yapıda oluştuğu ve Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS: 05-0592) verilerinin standart değerleriyle iyi bir uyum içinde olduğu elde edilmiştir. Ayrıca tüm numunelerde PbSO<sub>4</sub> fazı olduğu gözlenmiştir. PbSO<sub>4</sub> fazının kokamid dietanolamin katkılı numunelerde katkısız numuneye göre bir miktar arttığı görülmektedir. Kokamid dietanolamin konsantrasyonunun filmlerin tercih edilen kristalografik yönelimi üzerindeki etkilerini incelemek için, aşağıdaki denklem kullanılarak texture katsayıları TC<sub>(hkl)</sub> hesaplanmıştır [1].

$$TC_{(hkl)} = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{N^{-1} \sum_N I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}} \quad (1)$$

burada I<sub>(hkl)</sub> bir düzlemin ölçülen pik şiddetidir, I<sub>0(hkl)</sub> toz kırınım dosya kartından elde edilen standart pik şiddettir ve N, XRD piklerinin sayısıdır. Her bir numunenin (111), (200), (220) ve (311) yansıma piklerinin texture katsayıları Tablo 1' de listelenmiştir.



Şekil 1. Farklı kokamid dietanolamin konsantrasyonlarında elde edilen PbS filmlerin XRD desenleri

Tablo 1. PbS ince filmlerin kokamid dietanolamin miktarına bağlı  $TC_{(hkl)}$  değerleri ve pik şiddetleri.

Büyüme çözeltisindeki kokamid dietanolamin miktarı %	Pik şiddetleri		$TC_{(hkl)}$			
	(200)	(111)	(200)	(111)	(220)	(311)
0	2828	2808	1.42	1.41	0.74	0.44
0.25	2818	1615	1.95	1.12	0.53	0.40
0.50	1472	1597	1.36	1.47	0.67	0.50
1.00	1528	1572	1.45	1.49	0.61	0.45

Tablo 2. PbS ince filmlerin kokamid dietanolamin miktarına bağlı FWHM, kristal büyüklüğü, mikrogerilme, dislokasyon yoğunluğu ve bant aralığı değerleri.

Büyüme çözeltisindeki kokamid dietanolamin miktarı %	FWHM (radian)	Kristal büyüklükleri (D) (nm)	Mikrogerilme ( $\epsilon$ ) $\times 10^{-3}$	Dislokasyon yoğunluğu ( $\rho$ ) $\times 10^{15}$ ( $cm^{-2}$ )	Yasak enerji bant aralığı (eV)
0	0.01192	12.57	2.88	5.79	1.87
0.25	0.01256	11.93	3.03	6.43	2.06
0.50	0.02327	6.44	5.62	22.1	2.40
1.00	0.02757	5.43	6.66	31.0	2.53

Tüm numuneler içinde (200) düzleminin en yüksek (1.95)  $TC_{(hkl)}$  değerine sahip olduğu elde edilmiştir. Eğer filmlerin kristalografik yönelimi varsa texture katsayısının birden büyük olduğu literatürden bilinmektedir [1]. Buna göre tüm numuneler için (200) ve (111) düzlemlerinin tercihli yönelime sahip düzlemler olduğu söylenebilir. Ayrıca Tablo 1’ de tüm numunelerin (200) ve (111) düzlemlerinin pik şiddetleri verilmiştir. Sürfaktan miktarının artmasıyla, katkısız numuneye kıyasla (200) ve (111) düzlemlerinin pik şiddetlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi büyüme çözeltisindeki kokamid dietanolamin varlığının filmlerde bazı yapısal bozukluklara sebep olması olabilir [18]. PbS ince filmlerin XRD verileri kullanılarak elde edilen FWHM, kristal

büyüklüğü, mikrogerilme, dislokasyon yoğunluğu ve bant aralığı değerleri Tablo 2' de verilmiştir. Numunelerin kristal büyüklüğü (D) Debye-Scherrer denklemi ile hesaplanmıştır [2].

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2)$$

Mikrogerilme ( $\epsilon$ ) ve dislokasyon yoğunluğu ( $\rho$ ) değerleri ise aşağıdaki ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır [2].

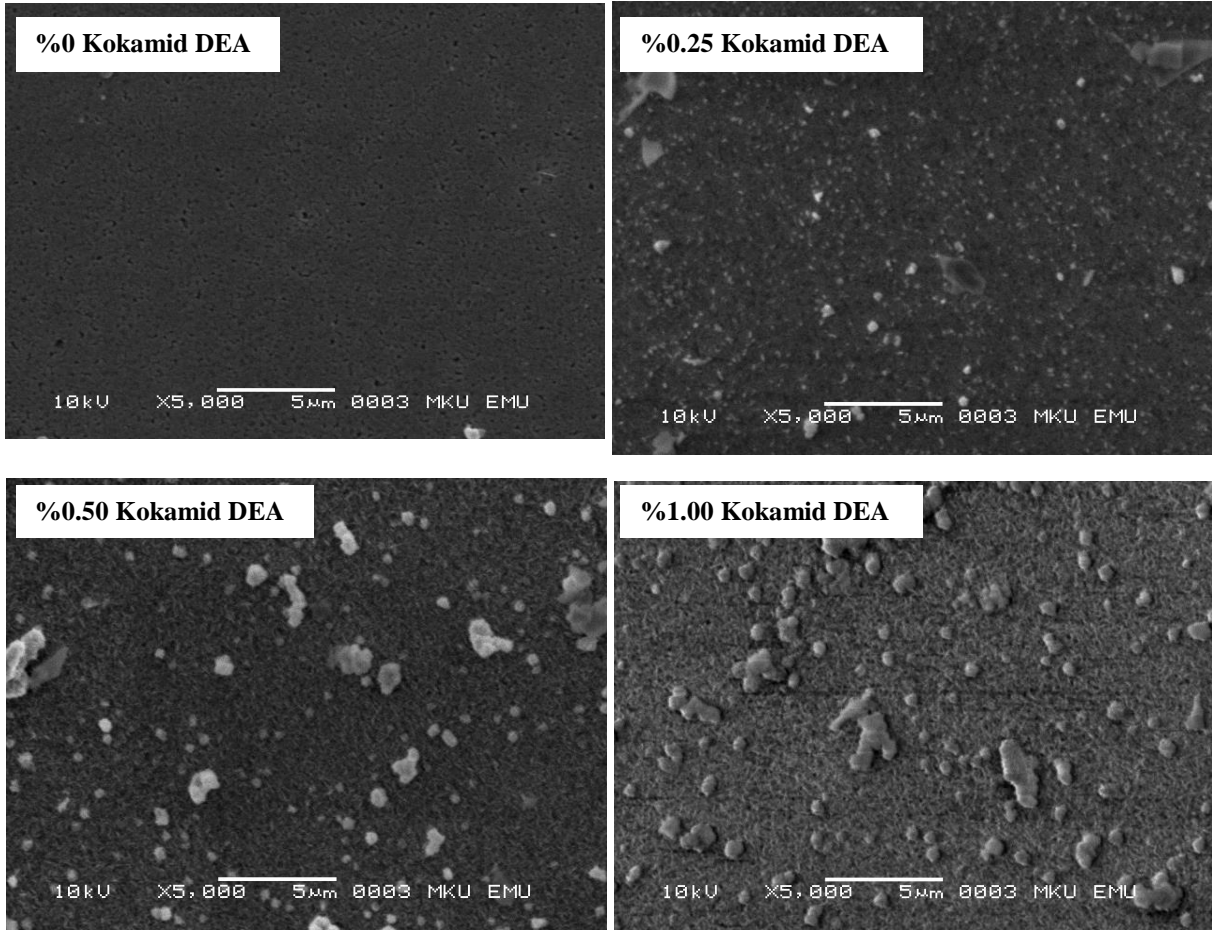
$$\epsilon = \frac{\beta \cos\theta}{4} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{15\epsilon}{aD} \quad (4)$$

Burada,  $\lambda$  = gelen X-ışınının dalga boyu (1.54056 Å),  $\beta$ =yarı pik genişliği,  $\theta$ =Bragg açısı ve  $a$ = örgü parametresidir. Sürfaktan miktarının artmasıyla PbS ince filmlerin kristal büyüklüklerinin 12.57 nm' den 5.43 nm' ye azaldığı elde edilmiştir. Metal-kalkojenit ince filmlerin üretiminde kullanılan deney koşullarının ince filmlerin kristal büyüklükleri üzerinde önemli rol oynadığı ve farklı sürfaktanların nanoparçacıkların büyüklüğünü değiştirebildiği bilinmektedir. Büyüme çözeltilisindeki kokamid dietanolamin varlığı çekirdeklenme sürecini etkileyerek daha küçük kristallerin oluşumuna yol açmış olabilir [1,19,20]. Ayrıca, artan sürfaktan katkısıyla numunelerin mikrogerilme ve dislokasyon yoğunluğu değerleri artmaktadır. Bu artış kristal büyüklüklerindeki azalmaya bağlanabilir. Film büyüme çözeltilisinde artan kokamid dietanolamin miktarına bağlı olarak piklerde genişleme gözlenmiştir. Piklerdeki genişleme kristal büyüklüklerindeki azalma ile ilişkilendirilebilir. Kristal büyüklüklerinin azalması tane sınırında bir artışa neden olabilir ve bunun sonucunda yapıdaki mikrogerilme ve dislokasyon yoğunluğu artabilir [1,19,21].

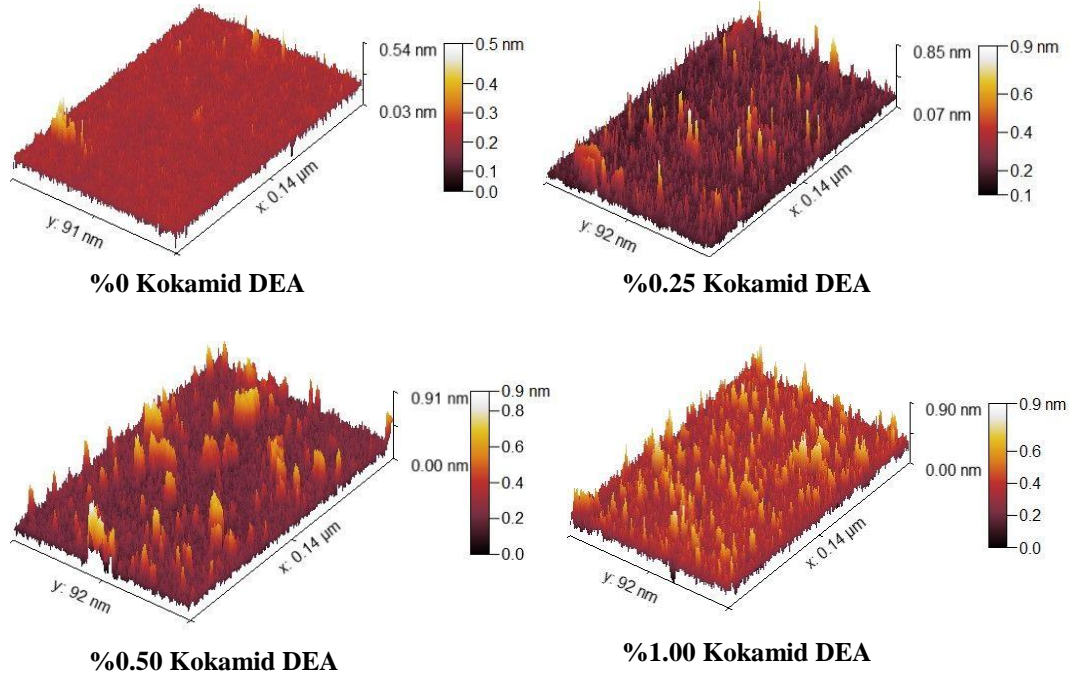
### **B. Morfolojik Özellikler**

Şekil 2' de numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde sürfaktan miktarının artmasıyla filmlerin yüzey morfolojilerinin etkilendiği görülmektedir. Katkısız olarak hazırlanan PbS ince filmin yüzeyi homojen bir yapıdadır fakat film yüzeyinde bazı boşluklar olduğu görülmektedir. Kokamid dietanolamin katkılı ince filmlerin daha sıkı yapıda olduğu ve film yüzeyinde boşlukların olmadığı elde edilmiştir. Sürfaktanlar ince filmlerin yüzey morfolojilerinin kontrol edilmesinde etkili maddeler olarak kabul edilmektedir [22]. Büyüme çözeltilisindeki kokamid dietanolamin konsantrasyonunun artmasıyla çekirdeklenme hızına bağlı olarak PbS nanoparçacıkların yoğunlaşmasının arttığı ve film yüzeyindeki boşlukların azaldığı söylenebilir.



Şekil 2. PbS ince filmlerin kokamid dietanolamin miktarına bağlı SEM görüntüleri

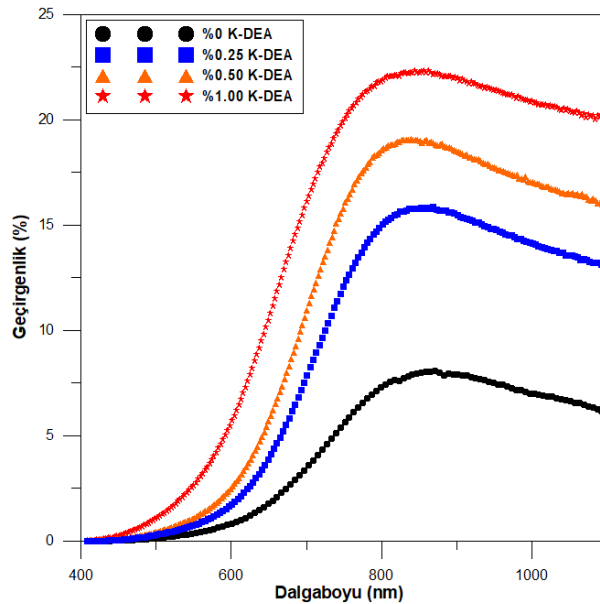
İnce filmlerin yüzey morfolojisini analiz etmenin alternatif yöntemlerinden biri taramalı prob mikroskobu (SPM) yöntemidir. PbS ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri taramalı prob mikroskobu ile ölçülmüştür. Şekil 3 PbS ince filmlerin üç boyutlu SPM görüntülerini göstermektedir. %0, %0.25, %0.50 ve %1.00 katkı oranlarına sahip numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla, 15.71 nm, 30.96 nm, 47.69 nm ve 58.27 nm olarak elde edilmiştir. Sürfaktan katkı oranına bağlı olarak artan yüzey pürüzlülüğü ince filmlerin üretiminde kullanılan sürfaktanın bu ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerlerini değiştirebildiğini göstermiştir.



Şekil 3. PbS ince filmlerin kokamid dietanolamin miktarına bağlı SPM görüntüleri

### C. Optik Özellikler

PbS ince filmlerin farklı oranlardaki sürfaktan kokamid dietanolamin miktarına bağlı olarak, 400 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığındaki optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4’ te gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi %0, %0.25, %0.50 ve %1.00 katkı oranlarına sahip numunelerin 400 nm ile 1100 nm aralığındaki optik geçirgenlik değerleri sırasıyla %8.3, %16, %19.3 ve %22.6 olarak elde edilmiştir. PbS ince filmlere yapılan sürfaktan katkısının filmlerin optik geçirgenlik değerlerini artırdığı elde edilmiştir. Filmlerin optik geçirgenlik spektrumları incelendiğinde 400 nm ile 650 nm aralığında gözlenen absorpsiyon kenarının kokamid dietanolamin konsantrasyonunun artmasıyla daha kısa dalga boylarına doğru kaydığı gözlemlenebilir. Absorpsiyon kenarındaki bu kayma optik bant aralığının arttığını göstermektedir [1,16].

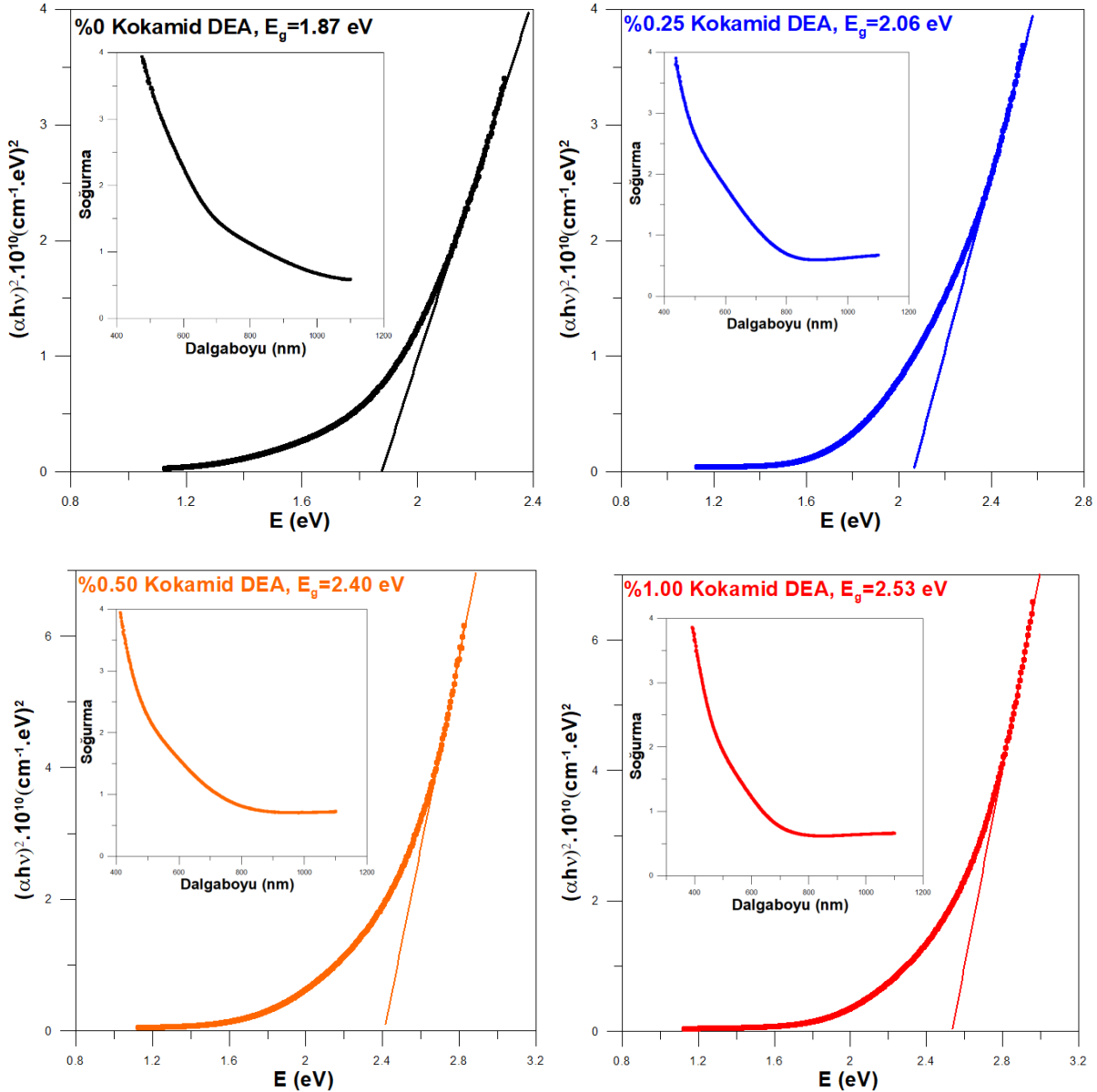


Şekil 4. Farklı kokamid dietanolamin konsantrasyonlarında elde edilen PbS filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Filmlerin optik bant aralığı değerleri Tauc denklemini kullanılarak hesaplanmıştır [6,7].

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^n \quad (5)$$

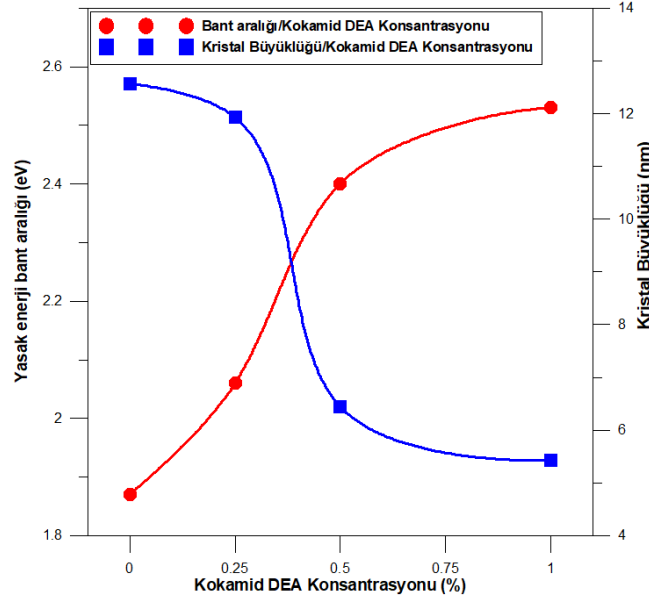
burada,  $\alpha$ =soğurma katsayısı,  $h$ =Planck sabiti,  $\nu$ =foton frekansı,  $C$ =sabit sayı  $E_g$  optik bant aralığı değeri ve  $n$  optik geçiş türüne bağlı bir sayıdır. Burada PbS yarıiletken malzemesi doğrudan bant geçişine sahip olduğu için  $n$  değeri 1/2 olarak alınmıştır. Şekil 5 tüm numuneler için  $(\alpha h\nu)^2$  nin  $h\nu$  ye göre çizilen grafiklerini ve optik soğurma spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 5. PbS ince filmlerin kokamid dietanolamin miktarına bağlı optik bant aralığı spektrumları

Şekilden görüldüğü gibi katkısız PbS numunesinin optik bant aralığı 1.87 eV olarak elde edilmiştir. Kokamid dietanolamin katkı miktarının artmasıyla %0.25, %0.50 ve %1.00 katkı oranlarına sahip numuneler için optik bant aralığı değerleri sırasıyla, 2.06 eV, 2.40 eV ve 2.53 eV olarak elde edilmiştir. PbS ince filmlerin optik bant aralığındaki bu artış filmlere yapılan sürfaktan kokamid dietanolamin katkısının filmlerin optik özelliklerini önemli derecede etkilediğini göstermektedir. Optik bant aralığındaki bu artış filmlerin kristal büyüklüğünün azalmasıyla ilgili olabilir. İnce filmlerin kristal büyüklüğü ile ilgili, XRD analizinden elde edilen sonuçlar ince

film numunelerinin optik bant aralığındaki artışı doğrulamaktadır. Ayrıca PbS ince film oluşumu sırasında çözeltide homojen çekirdeklenme meydana geldiği ve çözeltideki homojen çekirdeklenmenin filmde pürüzlü bir yüzey oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir [23]. SPM analizi ile elde edilen sonuçlar, büyüme çözeltisinde artan kokamid dietanolamin miktarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermiştir. Şekil 6’ da PbS ince filmlerin optik bant aralığı ve kristal büyüklüğü arasındaki ters davranış gösterilmektedir.



Şekil 6. PbS ince filmlerin kokamid dietanolamin konsantrasyonlarının bir fonksiyonu olarak optik bant aralığı ve kristal büyüklüğü değişimi

PbS ince filmlerin artan kokamid dietanolamin miktarına bağlı olarak kristal büyüklüğünün azalmasına karşılık optik bant aralığının artması kuantum hapsi etkisi ile açıklanabilir. Nanoyapılı malzemelerin kristal büyüklüğü Bohr eksiton çapından (~36 nm) daha küçükse kuantum hapsi etkisi optik bant aralığı değerlerinin artmasına sebep olur [2,17]. Ayrıca, Şekil 5’ teki optik soğurma spektrumlarından görüldüğü gibi üretilen PbS ince filmlerde gözlenen görünür aralıktaki yüksek absorpsiyon, bu filmlerin güneş enerjisi soğurucuları olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada nanoyapılı PbS ince filmler cam altlıklar üzerinde farklı sürfaktan kokamid dietanolamin konsantrasyonlarında kimyasal banyo depolama yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Farklı oranlardaki (%0.25, %0.50, %1.00) kokamid dietanolamin katkısının PbS ince filmlerin yapısal, optik, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisi özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. XRD analizi ile ince filmlerin kübik PbS faz yapısında olduğu ve (200) ve (111) düzlemlerinin tercihli yönelime sahip düzlemler olduğu elde edilmiştir. Ayrıca, kokamid dietanolamin katkı miktarının artmasıyla PbS ince filmlerin kristal büyüklüklerinin 12.57 nm’ den 5.43 nm’ ye azaldığı ve mikrogerilme ile dislokasyon yoğunluğu değerlerinde arttığı elde edilmiştir. SPM analizinden, sürfaktan katkısının artmasıyla ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 15.71 nm’ den 5.827 nm’ ye arttığı elde edilmiştir. SEM analizinden sürfaktan katkılı ince filmlerin daha sıkı yapıda olduğu ve film yüzeyinde boşlukların olmadığı elde edilmiştir. Optik analizlerden sürfaktan katkı miktarının artmasıyla PbS ince filmlerin optik bant aralığı değerlerinin 1.87 eV’ tan 2.53 eV’ a optik geçirgenlik değerlerinin %8.3’ ten %22.6’ ya arttığı elde edilmiştir. Sonuç olarak, sürfaktan kokamid dietanolamin katkısının PbS ince filmlerin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri üzerinde önemli etkisinin olduğu ve filmlerin optik bant aralığı değerlerini önemli ölçüde artırdığı elde edilmiştir. Bu sonuçlar kokamid dietanolamin katkılı PbS ince filmlerin güneş pili uygulamalarında soğurucu malzeme olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Yücel, E. (2019). Using of CAPB as a surfactant to improve the surface morphology and optical features of PbS films. *Superlattices and Microstructures*, 135, 106287.



- [2] Yücel, E., & Yücel, Y. (2017). Fabrication and characterization of Sr-doped PbS thin films grown by CBD. *Ceramics International*, 43, 407-413.
- [3] Shu, L.L., Guang T.F., Shao H.X., & Xu D.G. (2021). High-performance visible-near IR photodetectors based on high-quality Sn<sup>2+</sup>-sensitized PbS films. *Journal of Alloys and Compounds*, 883, 160860.
- [4] Patil, S.V., Deshmukh, P.R., & Lokhande, C.D. (2011). Fabrication and liquefied petroleum gas (LPG) sensing performance of p-polyaniline/n-PbS heterojunction at room temperature. *Sensors and Actuators B*, 156, 450-455.
- [5] Patel, J., Mighri, F., Ajji, A., Tiwari, D., & Chaudhuri, T.K. (2014). Spin-coating deposition of PbS and CdS thin films for solar cell application. *Appl. Phys. A*, 117, 1791-1799.
- [6] Yücel, E., Yücel, Y., & Beleli, B. (2015). Optimization of synthesis conditions of PbS thin films grown by chemical bath deposition using response surface methodology. *Journal of Alloys and Compounds*, 642, 63-69.
- [7] Yücel, E., Yücel, Y., & Beleli, B. (2015). Process optimization of deposition conditions of PbS thin films grown by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method using response surface methodology. *Journal of Crystal Growth*, 422, 1-7.
- [8] Martucci, A., Fick, J., Leblanc, S.E., Locascio, M., & Hache, A. (2004). Optical properties of PbS quantum dot doped sol-gel films. *J. Non-Cryst. Solids*, 345, 639-642.
- [9] Akhtar, J., Afzaal, M., Vincent, M.A., Burton, N.A., Hillier, I.H., & O'Brien, P. (2011). Low temperature CVD growth of PbS films on plastic substrates. *Chem. Commun.*, 47, 1991-1993.
- [10] Sharon, M., Ramaiah, K.S., Kumar, M., Neumann-Spallart, M., & Levy-Clement, C. (2011). Electrodeposition of lead sulphide in acidic medium. *J. Electroanal. Chem.*, 66, 265-269.
- [11] Kumar, S., Sharma, T.P., Zulfequar, M., & Husain, M. (2003). Characterization of vacuum evaporated PbS thin films. *Physica B*, 325, 8-16.
- [12] Rebhi, A., Hajjaji, A., Leblanc-Lavoie, J., Aouida, S., Gaidi, M., Bessais, B., & El Khakani, M.A. (2021). Effect of the Helium Background Gas Pressure on the Structural and Optoelectronic Properties of Pulsed-Laser Deposited PbS Thin Films. *Nanomaterials*, 11, 1254.
- [13] Paulraj, K., Ramaswamy, S., Yahia, I.S., Alshehri A.M., Somaily H.H., Kim, H.S., & Kathalingam, A. (2020). Praseodymium doped PbS thin films for optoelectronic applications prepared by nebulizer spray pyrolysis. *Appl. Phys. A*, 126, 503.
- [14] Nikam, S.S., Suryawanshi, M.P., Gaikwad, M.A., Kim J.H., & Moholkar A.V. (2017). Photoelectrochemical performance of surfactant (polyvinyl alcohol) assisted PbS thin films grown by chemical route. *J Mater Sci: Mater Electron*, 28, 5165-5173
- [15] Bakshi, M.S. (2016). How Surfactants Control Crystal Growth of Nanomaterials. *Cryst. Growth Des.*, 16, 1104-1133.
- [16] You, Q., Cai, H., Hu, Z., Liang, P., Prucnal, S., Zhou, S., Sun, J., Xu, N., & Wu, J. (2015). Blue shift in absorption edge and widening of band gap of O by Al doping and Al-N co-doping. *Journal of Alloys and Compounds*, 644, 528-53
- [17] Khan, A.W., Ahmad, S., Hassan, M.M., & Naqvi, A.H. (2014). Structural phase analysis, band gap tuning and fluorescence properties of Co doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Opt. Mater.* 38, 278-285.
- [18] Yücel Y., & Yücel E. (2018). Synthesis and characterization of lead sulfide thin films by coumarin assisted CBD method. *Optik*, 164, 263-270
- [19] Yücel Y., & Yücel E. (2018). Modification of Morphological, Structural and Optical Properties of CBD-Based Growth of PbS Films on Glass Substrates by Addition of Saccharin. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 22, 134-140

- [20] Vanalakar S.A., Suryawanshi M.P., Mali V., Moholkar A.V., Kim J.Y., Patil P.S., & Kim J.H. (2014) Simplistic surface active agents mediated morphological tweaking of CdS thin films for photoelectrochemical solar cell performance. *Curr. Appl. Phys.*, 14, 1669-1676.
- [21] Zhang L., & Xiang Y. (2018) Motion of grain boundaries incorporating dislocation structure. *J. Mech. Phys. Solids*, 117, 157-178.
- [22] Zhuang M.X., Wei A.X., Zhao Y., Liu J., Yan Z.Q., & Liu Z. (2015) Morphology-controlled growth of special nanostructure CuInS<sub>2</sub> thin films on an FTO substrate and their application in thin film solar cells *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 806-814.
- [23] Zhang L., Jiang J., Wang W., Huang X., Yuan Q., Hong R., & Cha L. (2018) Growth process and properties of CdS thin films prepared by chemical bath deposition at different pH values *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 7637-7643.