



## Vakum Tüplü Solar Kolektörler için Ekonomik Kaplama Malzemesi ve Kaplama Metodu

### Economical Coating Material and Method for Vacuum Tube Solar Collectors

Çınar Öncel <sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Muğla, TÜRKİYE  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [cinaroncel@mu.edu.tr](mailto:cinaroncel@mu.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 06.07.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 27.01.2021

Atıf şekli/How to cite: ÖNCEL Ç. (2021). Vakum Tüplü Solar Kolektörler için Ekonomik Kaplama Malzemesi ve Kaplama Metodu. DEÜFMD 23(69), 781-786.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2021236907

#### Öz

Vakum tüplü güneş enerjisi sistemlerinde DC magnetron saçılımı metodu ile cam tüp üzerine alüminyum ve alüminyum nitrür kaplaması yapılmaktadır. Bu kaplama, gelen güneş ışınının %96 civarını soğurmakta (%4 civarını yansıtılmaktadır) ve dıştaki cam tüp ile arasında vakum olduğu için ısının tamamına yakınının iç cam tüpün içerisine iletmektedir. Bu kaplama malzemesinin özelliği, hem gelen güneş ışığının çok azını geri yansıtması, hem de ısı iletkenlik değerinin yüksek olmasıdır. Bu çalışmada kaplama malzemesine ve magnetron saçılımı kaplama metoduna alternatif olarak, çeşitli kaplama malzemeleri ile, püskürtme ve daldırma-kaplama metodları ile çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar, daldırma-kaplama metodu ile yapılan grafit kaplamanın, ticari alüminyum nitrür kaplamalı vakum tüplü sistemlerin veriminin %67'si kadar verime ulaştığını göstermiştir. Bu kaplamanın yüzey tutunma özelliğinin artırılarak, pahalı ekipmanlarla uygulanan DC magnetron saçılımı metodu olmadan, yeni nesil vakum tüplü solar kolektörler üretilebileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** grafit, vakum tüplü solar kolektör, kaplama metodu

#### Abstract

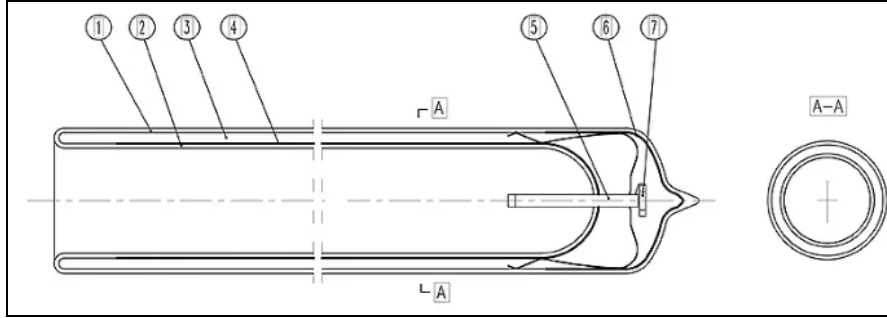
In vacuum tube solar collectors aluminum and aluminum nitride coating is conducted via DC magnetron sputtering. This coating absorbs 96% of the incoming solar energy and since there is vacuum between outer and inner glass tubes, almost all of the heat is transferred into the inner tube. The characteristics of the coating material is to reflect very few amount of incoming waves and to possess high thermal conductivity. In this study, several alternative coating materials and coating techniques such as dip coating and spray coating. The results showed that graphite coating via dip coating method could reach 67% of the commercial aluminum nitride coated vacuum tube systems. By increasing the surface adhesion of the graphite with dip coating showed that the results of this study may replace currently used DC magnetron sputtering technique and eliminate expensive equipments to take place in new generation vacuum tube solar collectors.

**Keywords:** graphite, vacuum tube solar collector, coating method

## 1. Giriş

Vakum tüplü güneş enerjisi sistemleri, iki adet iç içe geçmiş ve arası vakuma alınmış cam tüplerden, içteki camın dış yüzeyine ısı iletkenliği ve ışın yansıtma kapasitesi düşük bir kaplama ile kaplı, vakum alındıktan sonra "degassing" yapmak için ve vakumun

sağlamlığını kontrol etmek için bir adet barium halkası ve barium halkasının aktive edildikten sonra oluşturduğu barium aynası, genellikle kullanılan ısı pompasından ve su deposundan ibarettir. Şekil 1'de ısı pompası ve su deposu dışındaki bileşenler temsili olarak gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Vakumlu cam tüpün şematik görüntüsü. 1-dış cam tüp, 2-iç cam tüp, 3-vakumlu bölge, 4-ısı soğuran ve ileten kaplama, 5-baryum halkasını sabit tutmak için metal ayaklar, 6-oluşan baryum aynası, 7- baryum halkası

Vakumlu tüpler üretilirken DC magnetron saçılımı ile en yaygın kullanılan, içteki tüpün üzerine alüminyum ve alüminyum nitrür kaplaması yapılır[1-4]. Bu kaplamanın soğurduğu enerji, gelen enerjinin %96'sı civarındadır[5]. İki tüpün arasındaki vakumdan ve kaplamanın yüksek oranda enerji soğurmasından dolayı güneşten gelen ısının büyük kısmı içteki tüpün içine transfer edilebilmektedir. Bu tekniğin temelleri 1900'lü yılların başlarına dayanmaktadır[6]. DC magnetron saçılımı ile kaplama işlemi vakum gerektiren ve yüksek enerji tüketen bir işlemdir. Bu kaplamanın alternatif ve doğa dostu bir kaplama ile yapılması hem maliyeti düşürecek, hem de enerji gereksinimini azaltan faydaları olacaktır. Bu alandaki çalışmalar genellikle kaplama metodu aynı kalacak şekilde, farklı malzeme veya malzeme grupları ile kaplamalar üzerindedir[2,5,7-9].

Ayrıca kaplama malzemesi olarak farklı malzemeler de denenebilir. Bu çalışmada kaplama metodu olarak püskürtme-kaplama ve daldırma-kaplama metodları çalışılmıştır. Kaplama malzemesi olarak da yüksek ısı iletkenliğine sahip grafit, hekzagonal bor nitrür (hBN), alüminyum nitrür (AlN) ve silikon karbür (SiC) çalışılmıştır. Bu malzemelerin ısı iletkenlik değerleri; SiC için 270 W/mK[10], AlN için 320 W/mK[10], hBN için x-y yönlerinde 121 W/mK, z yönünde 71 W/mK[11], grafit için

x-y yönlerinde 2000 W/mK, z yönünde 6.5 W/mK[12] şeklindedir.

Şekil 2'deki düzenek, kaplaması yapılan ve vakum altına alınan vakumlu tüplerin açık havada iç tüpün içinde ürettiği sıcaklığı ölçmek için kullanılmıştır. Bütün numunelerin ürettiği sıcaklıklar aynı koşullarda ölçülmüştür.

Bu çalışma, kaplama metodu ve kaplama malzemesi değiştirilerek vakum tüplü solar kolektör üretimi için yapılmış ilk çalışma olarak değerlendirilebilir. Mevcut kaplama teknolojisinin fiziksel sınırlamalarından dolayı iç tüpün sadece dış yüzeyi kaplanabilirken, kaplama metodunun değiştirilmesinden kaynaklı olarak iç tüpün iç yüzeyinin de kaplama alanı olarak kullanılması söz konusu olacaktır. Bu durum bir sonraki çalışma konusu olacaktır.

## 2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada iki farklı kaplama metodu ve dört farklı kaplama malzemesi kullanılmıştır. Bunlar püskürtme-kaplama ve daldırma-kaplama metodları, grafit, hBN, AlN ve SiC şeklindedir. Püskürtme-kaplama metodunda cam tüp döndürme hızı olarak 200 rpm seçilmiş, kaplama süreleri olarak 120 saniye, 20 saniye ve 10 saniye kullanılmıştır. Daldırma-kaplama metodunda çözelti içerisinde 1 tur döndürme

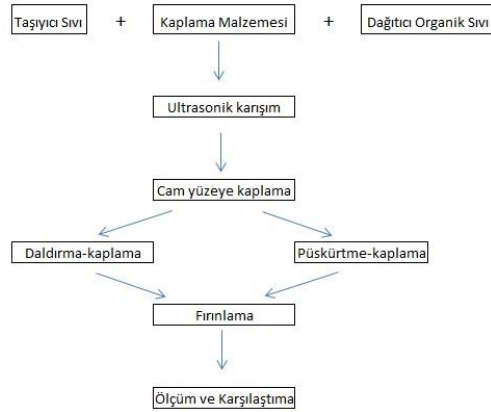
yapılmıştır. Bütün kaplamalardan önce çözelti 240 saniye sonikatörde bekletilmiştir.



**Şekil 2.** Kaplaması yapılmış ve vakuma alınmış tüplerin sıcaklık ölçme düzeneği

Kaplama çözeltilerinde toz:kür ajanı:polimer:hekzan oranları Tablo 1’de verilmiştir. İki numunede ise kaplama yapıldıktan ve kurutulduktan sonra 450°C’de 30 dakika fırınlama yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablodaki kodlardan S, A, B ve G; sırasıyla SiC, AlN, hBN ve grafit tozları ile yapılan kaplamaları göstermektedir. Ortalama olarak tozların parçacık büyüklükleri; SiC 0.8 mikrometre, AlN 0.5 mikrometre, hBN 1 mikrometre ve grafit 10-20 mikrometre şeklindedir. Grafitin daha küçük boyutta seçilmemesinin sebebi, 10 mikrometre ve daha

büyük kristal boyutlarında ısı iletkenliğinin teorik limitlere ulaşabildiğinin rapor edilmesidir[12]. Polimer olarak belirtilen malzeme Silyard 184 kodlu polidimetilsiloksan (PDMS), kür ajanı ise Silyard 184 kür ajanıdır. Çözücü olarak yüksek saflıkta hekzan kullanılmıştır. Kaplamaların ışık soğurma yüzdeleri Solarsan A.Ş. firmasının arge laboratuvarında bulunan optik emilim ve emisyon cihazı ile ölçülmüştür. Deneysel işlemlerle ilgili şematik akış şeması Şekil 3’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Deneysel işlemleri gösteren akış şeması

**Tablo 1.** Cam tüplere yapılan kaplamaların parametreleri

Numune Kodu	Kaplama Metodu	Cam Tüp Döndürme Hızı	Kaplama Süresi	Sonikatör Süresi	Toz-Kür ajanı-Polimer-Hekzan miktarları	Fırınlama sıcaklığı
G1	Daldırma	1 tur döndürme	10 saniye	240 saniye	67.5gr-1.38gr-13.8gr-190ml	450°C-30 dk
G1	Daldırma	1 tur döndürme	10 saniye	240 saniye	67.5gr-1.38gr-13.8gr-190ml	yapılmadı
S1	Püskürtme	200 rpm	120 saniye	240 saniye	2gr-0.05gr-0.5gr-50ml	yapılmadı
S2	Püskürtme	200 rpm	20 saniye	240 saniye	4gr-0.1gr-1gr-75ml	yapılmadı
S3	Daldırma	1 tur döndürme	10 saniye	240 saniye	18gr-0.4gr-4gr-75ml	450°C-30 dk
S3	Daldırma	1 tur döndürme	10 saniye	240 saniye	18gr-0.4gr-4gr-75ml	yapılmadı
A1	Daldırma	1 tur döndürme	10 saniye	240 saniye	67.5gr-1.38gr-13.8gr-190ml	yapılmadı
A2	Püskürtme	200 rpm	120 saniye	240 saniye	6gr-0.15gr-1.5gr-75ml	yapılmadı
B1	Püskürtme	200 rpm	120 saniye	240 saniye	4gr-0.92gr-9.2gr-190ml	yapılmadı
B2	Daldırma	1 tur döndürme	10 saniye	240 saniye	45gr-0.92gr-9.2gr-190ml	yapılmadı
B3	Daldırma	1 tur döndürme	10 saniye	240 saniye	45gr-0.92gr-9.2gr-380ml	yapılmadı

Kaplama yapılan cam tüplerin ışığı soğurma kapasiteleri optik soğurma ve yayma spektroskopu ile ölçülmüştür. Bu değerlere göre en iyi sonucu veren numunelerin ürettiği sıcaklık değerleri Şekil 2’deki düzeneğe ölçülmüştür. Referans olarak ticari olarak piyasada kullanılan, DC magnetron saçılımı ile kaplanmış AlN/Al kaplamalı bir tüp kullanılmıştır. Ayrıca bir de kaplama

yapılmamış vakumlu cam tüpün ürettiği sıcaklık ölçülmüştür. Ticari tüplerin ebatları dış tüp için 1800 mm boy 58 mm dış çap, iç tüp için 1500 mm boy, 47 mm dış çap ve 1.6 mm cam kalınlığı olacak şekilde ve araları  $5 \times 10^{-3}$  Pa vakumda olacak şekilde üretilmektedir.

Tablo 1'deki kodlardan G1 kodlu numuneler, grafit ile kaplanmış cam tüpün kaplamadan sonra 450°C'de 30 dakika fırınlanan ve fırınlanmayan numuneleri karşılaştırmak için yapılmıştır. S1 ve S2 numuneleri, SiC ile püskürtme ile kaplanan numunelerin kaplama sürelerinin karşılaştırılması için yapılmıştır. S3 kodlu numuneler daldırma kaplama metodu ile üretilmiştir. Bir tanesi kaplamadan sonra 450°C'de 30 dakika fırınlanmış, diğeri fırınlanmamıştır. A1 kodlu numune, AlN'nin daldırma kaplama ile kaplanan numuneyi, A2 kodlu numune AlN'nin püskürtme kaplama metodu ile kaplanan numuneyi göstermektedir. B1 kodlu numune, hBN tozlarının püskürtme kaplama metodu ile, B2 ve B3 kodlu numuneler hBN tozlarının daldırma kaplama metodu ile ve farklı hekzan oranları ile kaplanan numuneleri göstermektedir.

### 3. Bulgular

Yapılan güneş ışını soğurma testlerinden sonra her kaplama malzemesinin farklı koşullardaki ışın soğurma yüzdeleri her örnekten 5 ölçüm ortalaması alınarak karşılaştırılmıştır. Tablo 2'de sonuçlar verilmiştir. Grafitle kaplanan ve sonrasında ısı işlem uygulanan numunede ortalama %76 ışın soğurması gerçekleşirken, ısı işlem yapılmayan numunede bu oran %80'e çıkmıştır. Ticari ve DC magnetron saçılımı ile AlN/Al kaplanan numunelerde bu oran %96 civarında çıkmaktadır. SiC kaplamalı numunelerde farklı koşullara rağmen bütün sonuçlar %69-%70 bandında çıkmıştır. AlN tozu ile kaplanan numunelerde ışın soğurma kapasitesi daha da düşmüş, %56-57 civarında çıkmıştır. Isı iletkenlik değeri diğerlerine göre daha az olan hBN tozu ile kaplanan numunelerde

ise oldukça düşük ısı soğurma kapasitesi (%8) ile karşılaşmıştır. sıcaklık ölçüm deneyleri 3 farklı numune ile yapılmıştır; (i) grafit ile kaplanan numune, (ii) DC magnetron saçılımı ile AlN/Al kaplaması yapılan ticari numune ve (iii) kaplama yapılmamış vakumlu tüp. Yapılan 30 dakikalık ölçümler sonucunda ticari vakumlu tüpün iç sıcaklığı 180°C'ye, grafit kaplı vakumlu tüpün iç sıcaklığı 120°C'ye, kaplamasız vakumlu tüpün iç sıcaklığı da 40°C'ye çıkmıştır. Deneyler sırasındaki hava sıcaklığı 20°C olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlardan anlaşıldığı üzere daldırma-kaplama yöntemiyle ve belirtilen parametrelerle grafit kaplanan vakumlu tüp, ticari ürünün 60°C altında kalmış, kaplamasız tüpe oranla çok yüksek değer vermiştir.

Grafit kaplı numunelerde bir numune de tüpün içinden kaplama yapılarak deneme yapılmıştır. Çıkan sonuçlar içten veya dıştan kaplamanın sonuçlarda ölçülebilir bir fark yaratmadığı yönündedir. İç tüpün içten ve dıştan kaplı, ticari ve kaplanmamış tüplerin görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Soldan sağa sırasıyla dıştan grafit, içten grafit kaplamalı tüpler, ticari tüp ve kaplamasız tüp görüntüleri

**Tablo 2.** Cam tüplere yapılan kaplamaların güneş ışını soğurma deneylerinin sonuçları

Kaplama Malzeme	Işın Soğurma Yüzdesi					Ortalama	Standart Sapma
	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5		
G1-450°C	76.1	75.9	77.4	78.3	73.7	<b>76.28</b>	1.56
G1	80.7	80.9	79.9	80.4	78	<b>79.98</b>	1.05
S1	66.9	64.3	63.6	72.2	78	<b>69</b>	5.42
S2	67.7	65.4	64.6	72.5	80	<b>70.04</b>	5.69
S3	65.7	62.6	62.1	70.5	83.9	<b>68.96</b>	8.05
S3-450°C	66.4	64.1	62.8	71.2	80.2	<b>68.94</b>	6.32
A1	52.3	54.4	53.3	57.4	60.6	<b>55.6</b>	3.03
A2	54	56	54.8	59.4	62.4	<b>57.32</b>	3.14
B1	3.1	7.1	5.7	9.8	15.1	<b>8.16</b>	4.09
B2	2.1	6.7	5.3	10	16.6	<b>8.14</b>	4.93

#### 4. Tartışma ve Sonuç

hBN için bu kadar düşük değer elde etmemizin sebebi, güneş ışınlarının yansıtma kapasitesinin yüksek olması olabilir. hBN kristallerinin düşük dalgaboylu UV dalgalarını soğurduğunu, daha büyük dalgaboylarını soğurmadığını rapor eden çalışma bu fikrimizi doğrulamaktadır[13].

AlN ve SiC tozları ile yapılan kaplamaların soğurduğu enerji oranlarının sırasıyla %56-57 ve %69-70 olmasının birkaç sebebi olabilir. Bunlardan birisi, hBN'de olduğu gibi ışın yansıtma kapasiteleri, diğeri ise tozların cam yüzeyi ile yaptıkları toplam kontakların yüzey alanının düşüklüğü olabilir. DC magnetron saçılımı ile yapılan AlN kaplamasında %96 ışın soğurması, hem kaplamanın toz kaplamaya göre daha yüksek yüzey alanı oluşturması, hem de AlN kaplamasının altında çok yüksek (neredeyse %100) infrared dalgaboyunu yansıtması olabilir. Vakum ile Al arasında kalan AlN kaplaması, Al'den yansıyan IR ile daha da fazla ısınacaktır.

Bütün numunelerde en yüksek değer olarak %80 ışın soğurma kapasitesi gösteren grafit kaplı numunelerin 2 eksendeki çok yüksek ısı iletkenliğinin bu performansın en önemli etkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca seçilen parçacık büyüklüğü de grafitin teorik limitlerine yakın kapasitesini kullanmamıza yardımcı olmuş olabilir.

Bu sonuçlardan sonra grafit kaplamanın performansının iyileştirilmesi ve ticari ürün ile aynı sıcaklık değerini sağlaması için bazı çalışmalar yapılabilir. Bunlardan biri, grafitin cam yüzeyine temas ettiği alanı arttırmaktır. Bu şekilde sistemin performansının artacağı düşünülmektedir. Ayrıca ticari üründe olan Al

yansıtıcı yüzey de eklenirse bu yüzden de bir performans artışı beklenmektedir. Bu çalışmalar, şu anda devam eden TÜBİTAK projemizin konusudur ve çalışmalarımız devam etmektedir.

Sonuç olarak iki farklı kaplama yöntemi ve dört farklı kaplama malzemesi ile yapılan vakumlu tüp performans denemelerinde daldırma-kaplama ve püskürtme-kaplama metodları arasında belirgin bir farka rastlanmamıştır. Kaplama malzemesi olarak kullanılan grafit, hBN, AlN ve SiC arasından en yüksek ışın soğurma kapasitesi grafit kaplamalı tüplerde %80 olarak gerçekleşmiştir. Kaplama yapılan numunelerde kaplama sonrası ısıl işlem yapılmayan numuneler ile yapılan numuneler arasında büyük farklılık görülmemiştir. Grafit kaplı numunelerde ısıl işlem yapılmayan numune, ısıl işlem yapılan numuneye göre daha fazla ışın soğurma kapasitesi göstermiştir.

Grafit kaplı vakumlu tüplerin 20°C ortam sıcaklığında açık havada ve 30 dakikada ürettiği sıcaklık 120°C olarak rapor edilmiş, bu değer artırılması ve ticari ürünün performansını yakalaması için çalışma önerileri sunulmuştur. Kaplama kalınlığı ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Kaplama kalınlığının sonuçları etkileyebileceği ve optimum kalınlığın bulunabileceği düşünülmektedir, dolayısıyla bir sonraki çalışmada incelenmesi gereken konulardan birisidir.

Daldırma-kaplama metodu ile grafit kaplanarak üretilen vakumlu tüplerin, DC magnetron saçılımı ile üretilen vakumlu tüplere göre çok daha düşük maliyetlerle ve daha doğa dostu şekilde üretilebileceği, çalışmanın geliştirilmesi

gerektiğinin en büyük göstergesi olarak tespit edilmiştir.

### Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 2150428 numaralı TEYDEB 1512 programı desteği ile fonlanmıştır.

### Kaynakça

- [1] Y. Shi, X. Yang 1999. Selective absorbing surface for evacuated solar collector tubes, *Renew. Energy. Cilt.* 16, s. 632–634. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00240-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00240-7).
- [2] Y. Zhiqiang, G.L. Harding 1984. Optical properties of d.c. reactively sputtered thin films, *Thin Solid Films. Cilt.*120, s.81–108. doi:[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(84\)90364-X](https://doi.org/10.1016/0040-6090(84)90364-X).
- [3] G.L. Harding, Y. Zhiqiang, S. Craig, S.P. Chow 1984. Sputtered solar selective absorbing surfaces based on aluminum and stainless steel composites, *Sol. Energy Mater. Cilt.*10, s.187–207. doi:[https://doi.org/10.1016/0165-1633\(84\)90060-1](https://doi.org/10.1016/0165-1633(84)90060-1).
- [4] S. Hou, Z. Xue, Y. Shi, Z. Yin 1992. Improvements in vacuum collector tubes with graded Al-N/Al absorbing surfaces, in: *Proc.SPIE. doi:*10.1117/12.130490.
- [5] Q.-C. Zhang 2000. Recent progress in high-temperature solar selective coatings, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells. Cilt.*62, s.63–74. doi:[https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00136-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00136-1).
- [6] N. Selvakumar, H.C. Barshilia 2021. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells. Cilt.*98, s.1–23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.028>.
- [7] Q.-C. Zhang 1997. Direct current magnetron sputtered W-AlN cermet solar absorber films, *J. Vac. Sci. Technol. A. Cilt.*15, s.2842–2846. doi:10.1116/1.580837.
- [8] Q.-C. Zhang 1998. Metal-AlN cermet solar selective coatings deposited by direct current magnetron sputtering technology, *J. Phys. D. Appl. Phys. Cilt.* 3,1 s. 355–362. doi:10.1088/0022-3727/31/4/003.
- [9] Q.-C. Zhang 1998. Stainless-steel-AlN cermet selective surfaces deposited by direct current magnetron sputtering technology, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells. Cilt.*52, s.95–106. doi:[https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00274-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00274-2).
- [10] D.D.L. Chung 2001. Materials for thermal conduction, *Appl. Therm. Eng. Cilt.* 21, s. 1593–1605. doi:[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00042-4).
- [11] K.C. Yung, H. Liem 2007. Enhanced thermal conductivity of boron nitride epoxy-matrix composite through multi-modal particle size mixing, *J. Appl. Polym. Sci. Cilt.*106 s.3587–3591. doi:10.1002/app.27027.
- [12] G. Fugallo, A. Cepellotti, L. Paulatto, M. Lazzeri, N. Marzari, F. Mauri 2014. Thermal Conductivity of Graphene and Graphite: Collective Excitations and Mean Free Paths, *Nano Lett. Cilt.* 14, s. 6109–6114. doi:10.1021/nl502059f.
- [13] T.Q.P. Vuong, G. Cassabois, P. Valvin, E. Rousseau, A. Summerfield, C.J. Mellor, Y. Cho, T.S. Cheng, J.D. Albar, L. Eaves, C.T. Foxon, P.H. Beton, S. V Novikov, B. Gil 2017. Deep ultraviolet emission in hexagonal boron nitride grown by high-temperature molecular beam epitaxy, *2D Mater. Cilt.*4, s.21023. doi:10.1088/2053-1583/aa604a.