

## Hegzagonal Bor Nitrür Nano Levha (h-BNNS) Katkılı Termal Macun Üretimi ve Performans Ölçümü

Arife YURDAKUL<sup>1\*</sup>, Çağlar SUBAŞI<sup>1</sup>, Ercan ŞENER<sup>1</sup>, Hilmi YURDAKUL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Alanya-Antalya.

\*Sorumlu Yazar

arife.yurdakul@alanya.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3126-7336>

caglarsubasi@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3867-6885>

ercan.sener@alanya.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0890-5301>

hilmi.yurdakul@alanya.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5555-951X>

Geliş Tarihi: 02.09.2019; Kabul Tarihi: 10.09.2019

### Öz

Günümüzde yüksek performans ile çalışan bilgisayarlar beraberinde ısı sorununu getirmektedir. Bu nedenle, bilgisayar sanayisinde soğutma sistemlerinin önemli bir yeri vardır. İşlemci ve soğutma plakalarının (heatsink) yüzeyleri mikro boyutta tamamıyla pürüzsüz değildir. Bu sebeple, termal iletimi ve yüzey etkileşimini arttırmak için termal macunların kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Halihazırda kullanılan termal macunlar genellikle düşük termal iletkenliğe sahiptir. Termal iletkenliği yüksek olan gümüş ile üretilen yüksek performanslı termal macunlar da mevcuttur. Fakat gümüş termal iletkenliği yükseltirken aynı zaman da elektriksel iletkenliği de yükseltmektedir. Bu da işlemci üzerinde kısa devre olmasına ve sistemin tamamen bozulmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada üretilen termal macunların yüksek termal iletkenliğinin yanısıra elektriksel olarak da yalıtkan üretilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, bilgisayar soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek termal iletkenlik sergileyebilecek termal macunu hegzagonal bor nitrür nano tabakalarından (h-BNNSs) üretilmiştir. Polimer matris olarak karboksimetil selüloz (CMC) seçilmiştir. Üretilen termal macunun X-ışını kristalografisi (XRD) analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ve donanım üzerinde performans testi uygulanmıştır.

### Anahtar kelimeler

Termal macun;  
Hegzagonal bor nitrür  
nano levha (h-BNNS);  
Karboksimetil selüloz  
(CMC); Taramalı  
Elektron Mikroskobu  
(SEM).

## Hexagonal Boron Nitride Nanosheet (h-BNNS) Doped Thermal Paste Production and Performance Measurement

### Abstract

Nowadays, high performance computers bring heat problem. Therefore, cooling systems play an important role in the computer industry. The surfaces of the processor and cooling plates (heatsink) are not completely smooth in micro-dimension. It has therefore been a necessary to use thermal pastes to enhance thermal conduction and surface interaction. Currently used thermal pastes have low thermal conductivity in general. High performance thermal pastes made of silver with high thermal conductivity are available in the market. While the silver increases thermal conductivity, it enhances electrical conductivity as well. This results give a failure in whole system and it makes short circuit on the processor. In this study, it is aimed to produce thermal pastes with high thermal conductivity as well as electrically insulator. For this purpose, the thermal paste was produced from hexagonal boron nitride

### Keywords

Thermal paste;  
Hegzagonal Boron  
Nitride Nanosheet (h-  
BNNS); Carboxymethyl  
cellulose  
(CMC); Scanning  
Electron Microscopy  
(SEM).

nano layers (h-BNNSs) for use in computer cooling systems. Carboxymethyl cellulose (CMC) was chosen as the polymer matrix. X-ray crystallography (XRD) analysis, scanning electron microscopy (SEM) analysis and performance testing of the thermal paste were performed.

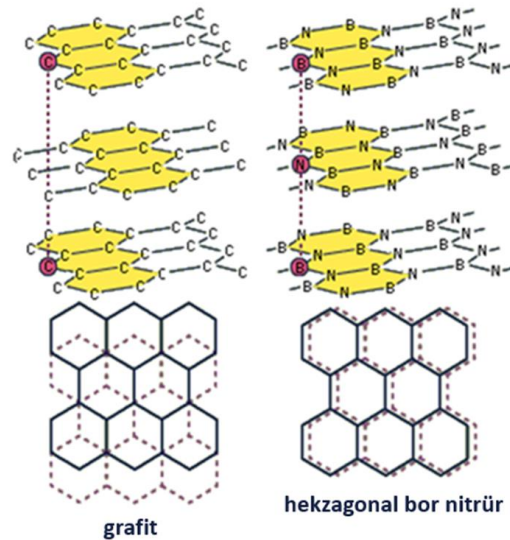
© Afyon Kocatepe Üniversitesi

## 1. Giriş

Termal macun (termal jel, termal bileşen, ısı macunu, soğutucu macun, ısı transfer bileşeni, ısı transfer macunu ya da soğutucu bileşen olarak da adlandırılır) işlemcilerin düz ve pürüzsüz olmayan yüzeylerinden dolayı soğutucu ile arasında oluşan mikroskobik hava boşluklarını doldurarak ısı iletkenliğini artıran, macuna yakın özelliklere sahip sıvı bir maddedir. Termal macun, havadan çok daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir (iletkenliği metalden daha azdır). Bilgisayar ve elektronik endüstrisinde bileşenlerin ısı dağılımını sağlamak için soğutucu ile bileşen arasında uygulanır. Seramik tabanlı termal macun; 'silikon macunu' veya 'silikon ısı bileşeni' olarak da tarif edilebilen sıvı ya da jelatinimsi silikon seramik tozundan oluşur. Bu amaçla en sık kullanılan seramikler berilyum oksit (BeO), alüminyum nitrür (AlN), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), çinko oksit ve silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) şeklindedir. Burada, ısı iletkenliği ve uygunluk (maddenin düzgün olmayan yüzeylerini uyumlaştırma özelliği) termal macunun önemli özelliklerindedir (Chung, 2001).

Bunun yanı sıra, elektrik-elektronik uygulamalarına yönelik yapılan çok çeşitli çalışmalarda ise h-BN'ün yüksek ısı iletkenliği ile birlikte ilave olarak yüksek elektriksel yalıtıcılık ve alışılmadık mükemmel bir ısı şok özelliği de sergilediği bildirilmiştir (Ertug 2013; Bhimanapati et al. 2016). h-BN düşük reaktifliği ve birçok uygulaması olan inorganik bir malzemedir. Daha ötesinde ısı, elektriksel, mekanik ve fiziksel özellikler gibi çok geniş bir malzeme niteliklerine sahip olması nedeniyle birçok uygulaması vardır. Farklı uygulamalar ile kullanılmasını sağlayacak şekilde bu niteliklerin çok çeşitli bileşimleri içerir. Tek atom kalınlığındaki iki boyutlu grafen, sahip olduğu üstün özelliklerinden dolayı kimya, fizik, malzeme ve diğer ilgili bilim dallarında kısa zamanda ilgi odağı olmuştur. Son on yıl içerisinde grafenin sentezi, özellikleri ve

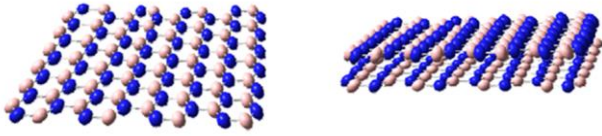
uygulamaları yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Grafenin keşfi aynı zamanda diğer iki boyutlu inorganik esaslı malzemelere olan ilgiyi de artırmıştır. MoS<sub>2</sub> ve WSe<sub>2</sub> gibi kalgojenitler ve özellikle h-BN'ün tek veya birkaç tabakalı yapılarının oldukça ilginç özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Böylece grafene benzer bu dikkat çekici inorganik nanotabakalı yapılar (Şekil 1) şuan elektronik sanayinden, batarya, süperkapasitör, kataliz, radyasyon ve gaz ölçümü gibi birçok uygulamalar için üstün özellikli aday malzemeler konumuna gelmiştir (Rao et al. 2013; Wang et al. 2017).



**Şekil 1.** Grafen ve bor nitrür tabakalarının birbirine benzeyen yapıları (Greenwood and Earnshaw, 1984).

Beyaz grafen olarak bilinen h-BN nanolevhalar (BNNSs), (002) düzlemindeki tek ve/veya birkaç tabakalı hekzagonal BN (h-BN)'dür (Şekil 2). BNNS'lar grafen ile benzer kristallografik yapıdadırlar (Şekil 1). Grafen ile benzer BN kristal yapısındaki daha güçlü bir B-N bağı, özellikle mekanik ve ısı uygulamalarda bu malzemeye üstün özellikler kazandırmaktadır. BN tabakaların ısı iletkenliği 1700-2000 W/mK'dir. BN'ün termal ve kimyasal kararlılığı grafenden daha yüksektir. Diğer

tarafından, B'dan N atomlarına önemli bir yük transferi bulunmaktadır. Böylece, kısmi olarak iyonik sp<sup>2</sup>-hibritleşmiş BN özellikle optik ve elektronik uygulamalarda grafenden farklı özellikler sergilemektedir (BN beyaz renkli ve bant aralığı 5.5 eV iken, grafen siyah ve elektriksel olarak iletken). Alışılmadık yapı ve özelliklerinin bir sonucu olarak, BNNS'lar farklı işlevsellikler göstermektedirler. BNNS'lar yalıtkan malzeme uygulamaları için iyi bir alternatif malzeme olarak değerlendirilebilir.



**Şekil 2.** Tek ve iki tabakalı BNNS'lar (Wang et al. 2013).

BNNS'ların ilk keşfinden günümüze kadar gelen süreç içerisinde bu malzemelerin sentezlenebilmesi için farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Luo et al. 2017; Robert and Narula 1990; Lin et al. 2015; Wang et al. 2018). Bunlar arasında, BNNS'ların sentezi için farklı fiziksel ve kimyasal metotların uygulandığı görülmüştür. Fiziksel metotlar genellikle lazer kesme ve püskürtme ile ultra ince filmlerin oluşturulması, mikromekanik kırılma ile ayrılma, santrifüj ve sıvı içerisinde dağıtıcılarla yüksek frekanslı ses dalgaları sayesinde sonikasyon gibi yöntemleri içermektedir. Tabakalı yapıları üretmek için uygulanan kimyasal metotlar ise kimyasal buhar çöktürme (CVD) ve atomik tabaka çöktürme (ALD) yöntemleridir. Hidrotermal ve yüksek sıcaklık katı hal reaksiyonları da bazı durumlarda kullanılan alternatif tekniklerdir. Bununla birlikte, sonikasyon ile ayrılma sürecinde tabakalar arasında lityum gibi metal atomu ve/veya organik esaslı başka moleküllerin eklenmesi de yaygın bir yöntemdir (Wang et al. 2013).

Yukarıda bahsedilen mevcut metotlar ile tek veya birkaç tabaka kalınlığındaki BNNS'lar laboratuvar ölçeğinde az miktarlarda (genellikle miligram seviyelerinde) sentezlenebilmektedir. Ancak bu yöntemler özel bir uygulama alanına yönelik büyük ölçekte BNNS'ların üretimi için oldukça zaman alıcı

süreç ve parametreleri de beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, büyük ölçekli üretimler için kullanılacak tekniğin ayrıca hızlı, çevreye duyarlı ve ekonomik olması da istenmektedir. Dolayısıyla endüstriyel uygulamalarda BNNS'lardan sıra dışı özellikler açığa çıkarmak için daha gelişmiş ve ölçeklenebilir yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu amaç doğrultusunda, BNNS'ların yüksek verim, hız ve miktarlarda sentezlenebilmesi amacıyla literatürde ilk defa Yurdakul vd. (2012)'e göre, bir mikroakışkanlaştırıcı prosesör içerisinde yüksek kayma gerilmelerinin uygulanması prensibine dayanarak birkaç tabaka kalınlığındaki BNNS'lar başarıyla sentezlenmiştir.

Termal macun üretimi esnasında kullanılan seramik esaslı malzemelerin jelatinimsi bir yapı kazanması için polimerik bir katkı kullanılmıştır. Bu amaçla, suda çözünebilen bir selüloz türevi olan CMC tercih edilmiştir. Literatürde selüloz glukolat olarak adı geçen "Sodium Carboxymethylcellulose" günümüzde genellikle CMC olarak tanınmaktadır. Ayrıca, ticari değeri düşük olan serbest asit "Carboxymethylcellulose"dur. Karboksimetil selüloz (CMC) suda çözülebilen, selüloz türevleri içerisinde en çok kullanılan, bağlayıcı ve yapıştırıcı özelliği olan bileşimdir (Srokova et al. 2004).

Bu çalışma kapsamında, birkaç atom kalınlığındaki h-BNNS'larının kullanılması yardımıyla yüksek ısı iletkenliğe sahip yeni karakterde bir ısı macununun üretilmesi planlanmıştır. Böylelikle soğutma sistemlerinin daha verimli ve güvenliği çalışması beklenmektedir. Burada, ayrıca performans kayıplarının minimuma indirilmesi ve bununla birlikte zamandan tasarruf edileceği planlanmaktadır. Daha ötesinde, üretilmesi hedeflenen ürünün sadece bilgisayar sistemi için değil, aynı zamanda telekomünikasyon, elektronik arabalar ve beyaz eşya sektöründe de kullanılmaya olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Kullanılan hammaddeler

Bu çalışmada, ana matris için Alfa Aesar marka, 1 µm'den küçük tane boyutunda ve %99,5 saflıkta

temin edilen h-BN kullanılmıştır. Polimer matris için CMC tercih edilmiştir. CMC'nin sulu ortamda katıları süspansiyon halinde tutma özelliği, ince film oluşturması ve bağlayıcı özelliğinden yararlanılmıştır.

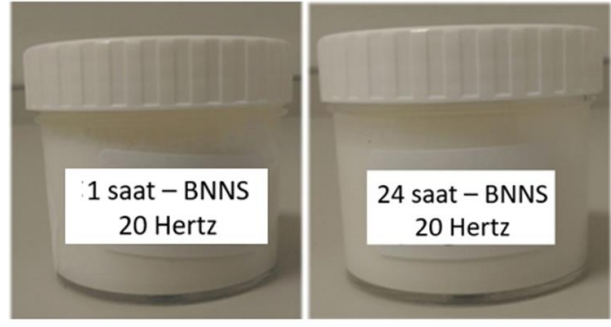
## 2.2 h-BNNS'ların üretimi

h-BNNS'ler aşağıdaki akım şeması esaslarına göre üretilmiştir.



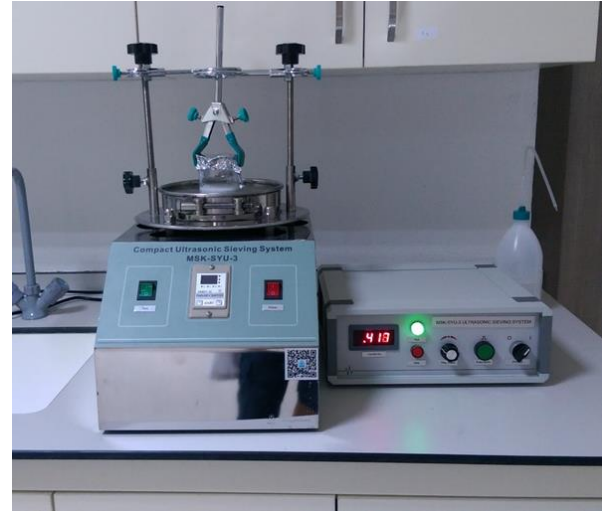
Şekil 3. h-BN tabakalarını ayrıştırma işlemini gösteren akış şeması.

Mekanik aşındırma için laboratuvar ölçekli bir bilyeli değirmen kullanılmıştır. Öncelikle, 2.230 gr h-BN ve öğütme yardımcısı olarak kullanılan 30 cc etanol ile süspansiyon hazırlanmıştır. Öğütücü olarak zirkonya ( $ZrO_2$ ) bilyeler tercih edilmiş ve paslanmaz çelikten yapılmış değirmen içerisine 10 gr olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kullanılan cihaz 60 Hz ve 367 rpm hızına çıkabilecek kapasitedir. Hazırlanan iki ayrı süspansiyona 1 ve 24 saat süre boyunca aşındırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4. Bilyeli değirmende işlem görmüş süspansiyon.

Bir sonraki aşamada 24 saat süresince ultrasonik homojenizasyon ve karıştırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 5. Ultrasonik homojenizasyon ve karıştırma için deney düzeneği.

Ultrasonik karıştırma sonrası h-BN'ün etanolden ayrışması için 7 dakika boyunca her iki solüsyona santrifüj işlemi uygulanmıştır.



**Şekil 6.** Santrifuj işlemi sonrası elde edilen numuneler.

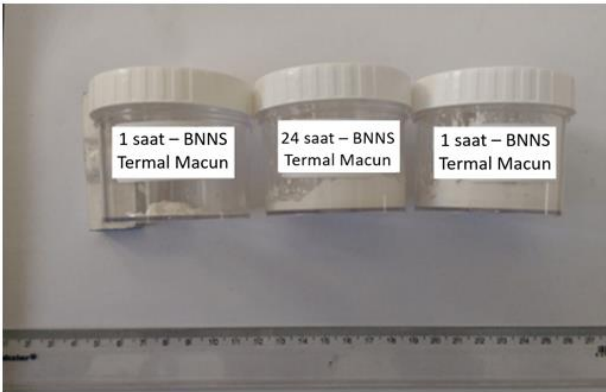
Santrifuj işlemi takiben numuneler etüve koyularak 24 saat boyunca 90°C'de ısıl işleme tabii tutulmuştur. Bu süreç sonucunda h-BN nano tozları, etanolün ortamdan uzaklaşmasıyla ayrıştırılmıştır.



**Şekil 7.** Etüvde ısıl işlem görmüş h-BNNS.

### 2.3 h-BNNS katkıli termal macun üretimi

h-BNNS tozu macun kıvamına getirilmek amacıyla CMC ile karıştırılmıştır. Bu aşamada CMC'yi jel haline getirmek için saf su kullanılmıştır. 13 cc saf su ile ağı. % 4 CMC tutkal kıvamı elde edilinceye kadar karıştırılarak hazırlanmış ve ağı. % 13 h-BNNS eklenerek macunlaştırma işlemine devam edilmiştir. h-BNNS miktarının CMC'ye oranla fazla olmasının sebebi ısıl iletkenliği minimum düzey etkilemektedir.

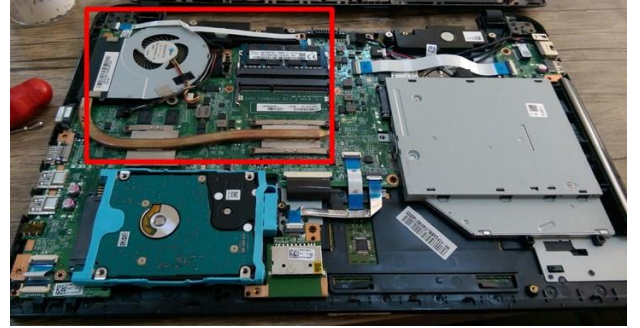


**Şekil 8.** Üretilen h-BN esaslı ısıl macun.

### 2.4 Termal macuna uygulanan karakterizasyon teknikleri

Üretilen macunlara, X-ışını kırınım (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Moleküler yapı incelenirken, SEM ile h-BN tabakaları ayrıntılı olarak gözlemlenmiştir. XRD analizi için Malvern Panalytical's Empyrean cihazı kullanılmıştır. SEM analizi için Nova NanoSEM 650 ile yapılmıştır. Analiz sırasında UHR moda ve farklı büyütme büyüklüklerinde görüntüler elde edilmiştir.

Üretilen termal macunun performans testi, ATI AMD Radeon R7 M260 ekran kartına ve Intel Core i5 4200U 1.60 GHz gücünde işlemcisine sahip Windows 10 Home işletim sistemine sahip TOSHIBA SATALLİTE B-50 bilgisayar sisteminde yapılmıştır.



**Şekil 9.** Toshiba Satallite B-50 donanımı.

Şekilde gösterilen soğutma sistemi (kırmızı renkli çizgi ile belirtilen dikdörtgen içerisindeki bölge) sökülerek ekran kartı ve işlemci yüzeyi aseton yardımıyla temizlenmiştir. Daha sonra sırasıyla 1 saat bilyeli değirmende işlem görmüş h-BNNS termal macun, marketten temin edilmiş ticari termal macun ve 24 saat bilyalı değirmen de işlem görmüş h-BNNS termal macun donanıma öncelikle bir enjektör yardımıyla sürülerek, sonrasında ise spatül ile ince bir film şeklinde uygulanmıştır. İşlemlerin hepsi her macun için ayrı ayrı yapılarak performansı belirlenmiştir.

Sıcaklık ölçümü için MSI firmanın ücretsiz olarak kullanıma sunduğu MSI:Afterburner yazılımı tercih edilmiştir. İşlemcinin aşırı çalışmasını sağlayacak belirli yazılımlar kullanılmıştır. Valve firmasının Steam yazılımında bulunan Portal 2 ve Resident evil 6: Benchmark yazılımları test aşamasında kullanılmıştır. Bu iki yazılım dışında C++'da yazılmış ConsoleAPP yazılımı da kullanılmıştır. ConsoleAPP programı C# dilinde kodlanmıştır. Bilgisayarın çekirdek sayısı kadar dizi oluşturup, her dizi

500.000 iterasyon yapacak şekilde, her adımda yeni bir 'a' harfi ekleyerek 500.000 elemanlı "aaaaaaaaa...." karakter dizisini oluşturmaktadır. Her adımda yeni bir karakter dizisi tanımlandığı için bu tanımlamalar giderek işlemcinin tüm çekirdeklerini yormakta ve en sonunda CPU'yu %100 çalıştırmaktadır. Test boyunca kullanılan tüm yazılımlar lisanslıdır.



Şekil 10. Steam programı.



Şekil 11. Portal 2 video oyunu.

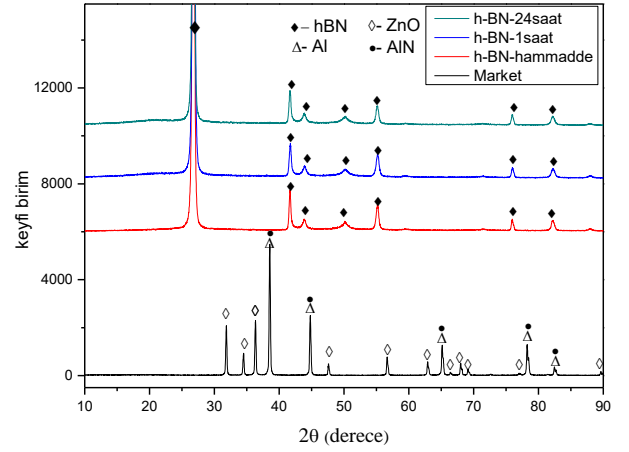


Şekil 12. Resident Evil 6 Benchmark.

### 3. Bulgular

#### 3.1 XRD analiz sonuçları

Termal macun üretim öncesi, çalışmada kullanılan hammaddelere ait XRD analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda h-BN'e ait pikler tespit edilmiştir.



Şekil 13. h-BN tozu, ticari macun, 1 saatlik h-BNNS termal macun, 24 saatlik h-BNNS termal macuna ait temsili XRD analizi.

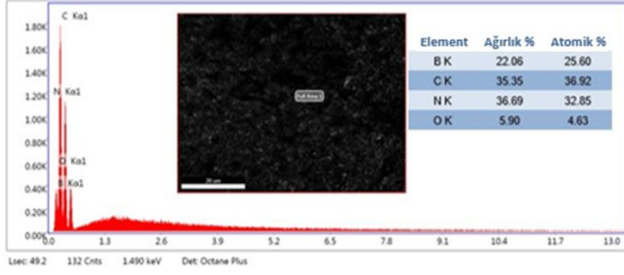
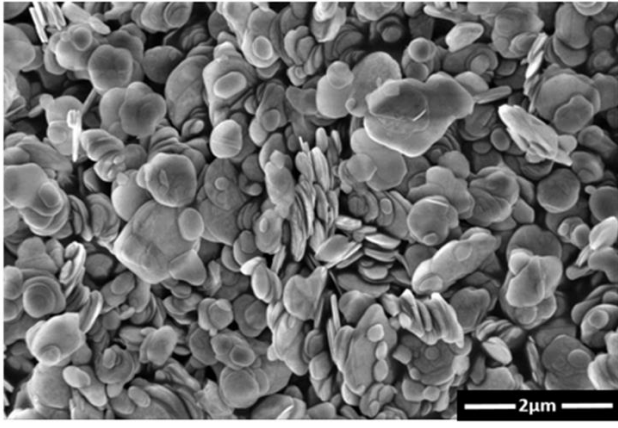
Şekil 13'deki XRD analizi sonuçları değerlendirildiğinde, ticari termal macunda alüminyum nitrür (AN) ve çinko oksit (ZnO) pikleri görülmüştür.

1 saatlik h-BNNS termal macunun XRD analizi sonucunda h-BN'e ait pikler görülmektedir. CMC amorf yapıda olduğundan dolayı XRD analizinde herhangi bir pik vermemiştir.

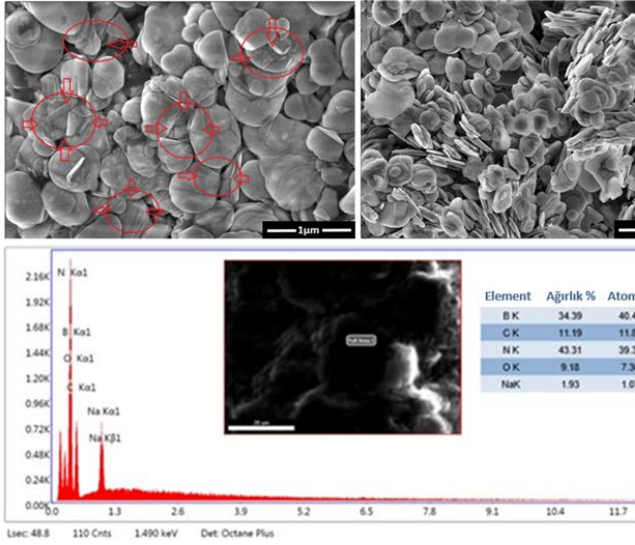
24 saatlik h-BNNS termal macunu XRD analizi sonucunda ise Şekil 13'de görüldüğü gibi sadece h-BN'e ait pikler mevcuttur.

#### 3.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları

Şekil 14'deki h-BN tozunun SEM analizlerinde, tabakalı yapısı gözlemlenmiştir. EDS analizinde ise h-BN'e ait kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

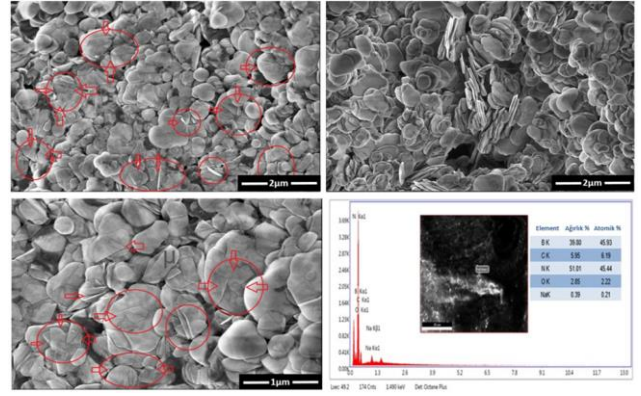


Şekil 14. h-BN tozuna ait SEM-EDS analizi.



Şekil 15. 1 saatlik h-BNNS termal macunun SEM-EDS analizi.

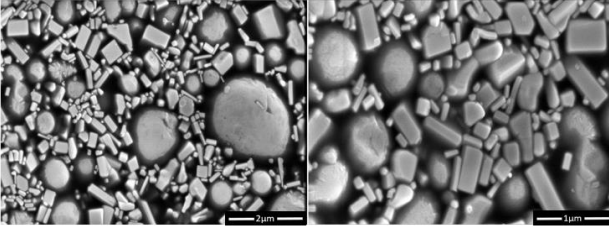
1 saatlik h-BN termal macunun SEM görüntülerinde h-BN tabakalarında ayrılma meydana gelmiştir. EDS analizinde h-BNNS ve CMC'ye ait elementleri içermektedir. Bunun yanı sıra, EDX analizi sonucunda kimyasal bileşimde ağırlık %1,93 miktarında Na elementine rastlanılmıştır.



Şekil 16. 24 saatlik h-BNNS termal macunun SEM-EDS analizi.

24 saatlik h-BN termal macunun SEM görüntülerinde hegzagonal bor nitrürün tabakalarının, 1 saatlik h-BNNS termal macununa kıyasla daha fazla ayrıldığı gözlemlenmiştir. 1 saatlik numuneye benzer şekilde, buradaki EDX analizi verilerine göre; h-BNNS ve CMC'ye ait elementler ile birlikte ağırlık %0,39 oranında Na içeriği tespit edilmiştir.

SEM sonuçları, düzlem içindeki kristal yapıyı koruyarak verimli bir mekanik ayırma işlemi ve öğütme şartları ile h-BN'ün tabakalarına başarılı bir şekilde ayrıldığını işaret etmektedir. Öncelikle uygun bir bilyeli değirmen seçimi burada etkin rol oynamıştır. Çünkü çoğu yüksek enerjili bilyeli değirmenler taneleri kırmak için yüksek kuvvet ve dikey etkiler uygular. Böylelikle tabakaların ayrılmasında artış meydana gelmektedir. Diğer taraftan düzlemsel değirmenler bilyelerin dönme hareketini kontrol eder ve öğütülen malzemeye sadece kayma kuvveti uygular. Böylece, küçük boyutlu çelik bilyelerin kullanımı öğütme işlemi daha verimli hale getirmektedir. Ayrıca, kayma kuvvetlerinin yapıya zarar vermesini engellemek amacıyla yağlayıcı etki verebilecek bir malzemenin kullanımı önemlidir. Burada, bir h-BN tanesinin lamine tabakalarına ayrılması, tane kenarı ile öğütücünün çarpışması ve tane üzerinde kayma hareketi sonucu meydana gelmektedir (Li et al. 2011).



Şekil 17. Ticari termal macunun SEM analizi.

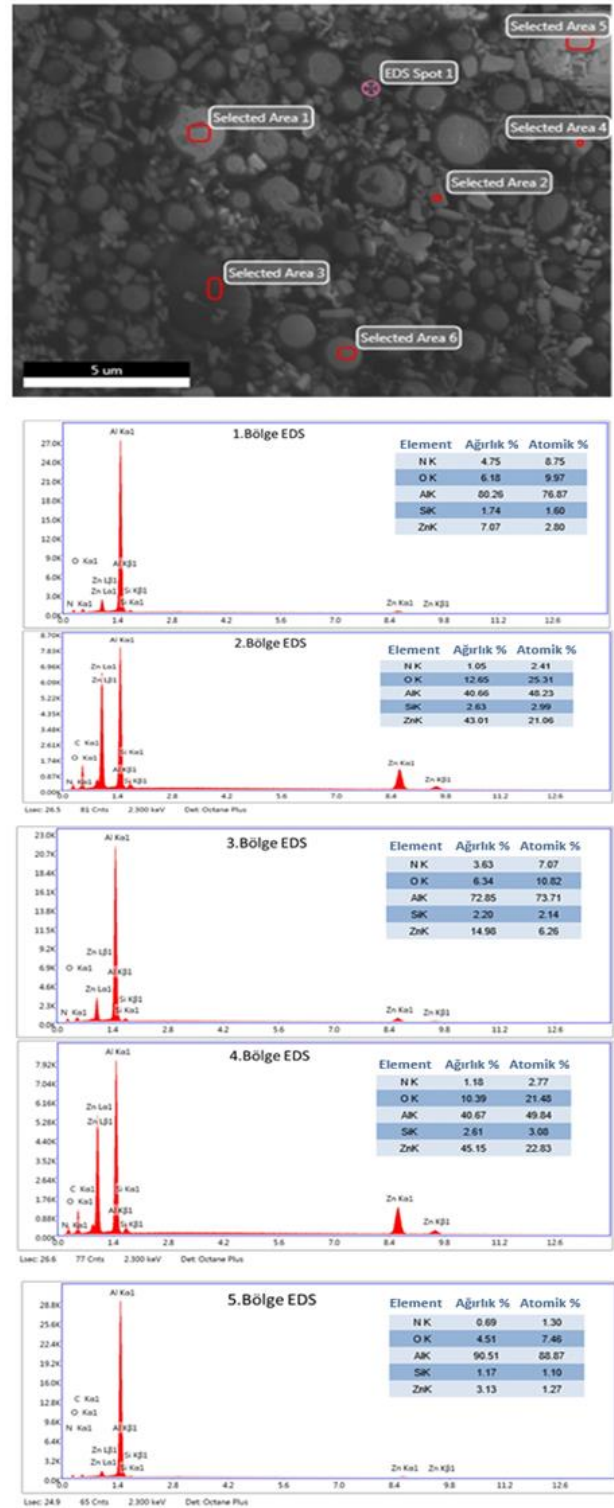
Ticari macunun Şekil 17’de sunulan SEM görüntülerinde küresel ve kübik morfolojide taneler dikkati çekmektedir. Bu tanelere EDS analizi gerçekleştirildiğinde (Şekil 18); küresel yapıların AlN, kübik yapıların ise ZnO olduğu düşünülmektedir. Buna göre, XRD ve SEM/EDS analizleri (Şekil 13, Şekil 17 ve Şekil 18) esas alındığında, ticari macunun nitrür ve oksit esaslı bir seramik esaslı kompozit bileşimine sahip malzeme olduğu kanaatine varılmıştır.

### 3.3 Performans testi sonuçları

1 saatlik h-BNNS termal macunu, 24 saatlik h-BNNS termal macunu ve ticari termal macun için test sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Consoleapp yazılımı tüm macunlara 30 dakika süreyle 6 kez uygulanmıştır.

Çizelge 1. Performans testi sonuçlarının karşılaştırılması.

TERMAL MACUN	1 saatlik h-BNNS esaslı termal macun		Ticari termal macun		24 saatlik h-BNNS esaslı termal macun	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
<b>PROGRAM</b>						
<b>ConsoleApp Testi</b>						
<b>30 dakika</b>						
<b>Portal 2 Testi</b>	48 °C	99 °C	48 °C	85 °C	48 °C	73 °C
<b>9 dakika</b>						
<b>Resident Evil 6 Benchmark Testi</b>						
<b>14 dakika</b>	48 °C	100°C	43°C	91 °C	48 °C	72 °C



Şekil 18. Ticari termal macuna ait EDS analizleri.

Çizelge 1’den görülebileceği üzere, 1 saatlik h-BNNS termal macunu 30 dakikalık Consoleapp testi sonucunda maksimum 91°C’ye ulaşmıştır. Minimum ise 40-41°C arasında bir değer yakalanmıştır. Ticari termal macun ise aynı test şartlarında maksimum 70°C’de seyredirken, minimum 53°C’ye gelmiştir. 24 saatlik h-BNNS



termal macunu yine aynı deneysel şartlarda; maksimum 69°C'ye ulaşabilirken, minimum 41-43°C arasında bir değerde seyretmiştir. Buna göre, ortalama olarak 60-65°C arasında etkili olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla gerçekleştirilen bu test sonucunda; 1 saatlik h-BNNS termal macunu, ticari macun ile karşılaştırıldığında performansının düşük olduğu, ancak 24 saatlik h-BNNS termal macunun ise ticari macundan kesinlikle daha iyi bir performans sergilediği belirlenmiştir.

Portal 2 testi "the cold boot" isimli bölümde uygulanmıştır. 9 dakika boyunca ortamla aynı etkileşimlere (efektler vs.) girilerek test gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler analiz edildiğinde, burada 1 saatlik h-BNNS termal macunu ticari macun ile yakın bir performans gösterirken, testin sonlarına doğru performansının düştüğü görülmüştür. 24 saatlik h-BNNS termal macunu, ticari macuna göre bu testte çok daha iyi bir etki göstermiştir. Başka bir deyişle, 24 saatlik h-BNNS termal macunu test boyunca en fazla 73°C'ye gelirken, ticari macun ise 85°C'de kalmıştır. Daha ötesinde, ticari macun test sırasında fazla sıcaklık nedeniyle işlemci performansını düşürürken, 24 saatlik h-BNNS termal macunun da bu durum yaşanmamıştır. Bununla birlikte, kendi içerisinde değerlendirildiğinde; 1 saatlik h-BN termal macunun 24 saatlik h-BNNS termal macununa oranla daha düşük performans sergilediği tespit edilmiştir.

Son olarak, Resident Evil 6 Benchmark testi her 3 farklı macuna da 14 dakika süreyle uygulanmıştır. Buna göre, 1 saatlik h-BNNS termal macun ticari macunla yakın sonuçlar gösterirken, bazı noktalarda daha düşük performans sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, 24 saatlik h-BNNS termal macunun ise ticari macuna kıyasla çok daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir. Buradaki test sırasında, 24 saatlik termal macun diğer iki macuna göre işlemci performansını daha az olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle, 24 saatlik h-BNNS termal macunu 1 saatlik h-BNNS termal macununa kıyasla çok daha etkin kullanılma potansiyeli sergilemiştir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada bilyeli değirmen ile mekanik aşındırma, ultrasonik homojenizasyon, karıştırma ve santrifüj işlemleri bir arada kullanılarak h-BNNS üretimi için yeni bir yol izlenmiştir. Ürün değerlendirme aşamasında, 24 saatlik h-BNNS termal macunun 1 saatlik h-BNNS termal macuna göre çok daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, bilyeli değirmen işleminin daha uzun süre yapılması ve tabakaların daha fazla ayrıştırılmasından kaynaklanmaktadır. 24 saat süre ile işlem gören h-BNNS termal macunu 19 °C'lik sıcaklık farkı ile piyasada kullanılan ticari macuna göre daha uzun sürede soğuma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. h-BN'ün bu çalışmayla birlikte iyi bir termal iletkenlik özelliğine sahip olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır.

Ayrıca, bu çalışmada bağlayıcı niteliğinde kullanılan karboksimetil selüloz su ile macun kıvamına getirildiğinden dolayı kullanılan saf suyun, işlemci sıcaklığının artmasıyla birlikte zaman içerisinde buharlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, üretilen macunun zamanla performans kaybına sebebiyet verebileceğinden çeşitli polimerik esaslı malzemelerin ürün içerisindeki davranışları bir sonraki çalışmalarda araştırılması önem arz etmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, "Tübitak 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı" kapsamında desteklenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Bhimanapati, G.R., Glavin, N.R., Robinson, J.A, 2016. 2D Boron nitride: synthesis and applications, *Semiconductors and Semimetals*, **95**, 101-147.
- Chung, D. D. L. (2001). Thermal interface materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **10**, 56-59.
- Ertug, B., 2013. Powder preparation, properties and industrial applications of hexagonal boron nitride. Chapter 2, Sintering Applications, 33-55.
- Greenwood, N.N., Earnshaw, A., 1984. Chemistry of the Elements, 236.
- Li, L.H., Chen, Y., Behan, G., Zhang, H., Petravicc, M., Glushenkova, M., 2011. Large-scale mechanical

peeling of boron nitride nanosheets by low-energy ball milling. *J. Mater. Chem.*, **21**, 11862.

Lin, L., Liu, T., Zhang, Y., Sun, R., Zeng, W., Wang, Z., 2015. Synthesis of boron nitride nanosheets with a few atomic layers and their gas sensing performance. *Ceramics International*, **42**, 971-975.

Luo, W., Wang, Y., Hitz, E., Lin, Y., Yang, B., Hu, L., 2017. Solution processed boron nitride nanosheets: Synthesis, Assemblies and Emerging applications. *Advanced Functional Materials*, **27**, 1701450.

Rao, C.N.R., Matte, H.S.S.R., Maitra, U., 2013. Graphene Analogues of Inorganic Layered Materials. *Angew. Chem. Int.*, **52**, 13162-13185.

Robert, T.P., Narula, C.K., 1990. Synthetic routes of boron nitride. *Chem. Rev.*, **90**, 73-91.

Sroková, I., Tomanová, V., Ebringerová, A., Malovíková, A., & Heinze, T. (2004). Water-Soluble Amphiphilic O-(Carboxymethyl) cellulose Derivatives—Synthesis and Properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, **289**, 63-69.

Wang, J., Ma, F. and Sun, M., 2017. Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications. *RSC Advances*, **7**, 16801-16822.

Wang, X., Yang, Y., Jiang, G., Yuan, Z., Yuan, S., 2018. A facile synthesis of boron nitride nanosheets and their potential application in dye absorption. *Diamond and Related Materials*, **81**, 89-95.

Wang, X., Zhi, C., Weng, Q., Bando, Y., Golberg, D., 2013. Boron Nitride Nanosheets: novel Syntheses and Applications in polymeric Composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 471.

Yurdakul, H., Goncu, Y., Durukan, O., Akay, A., Seyhan, A.T., Ay, N., Turan, S. , 2012. Nanoscopic characterization of two-dimensional (2D) boron nitride nanosheets (BNNSs) produced by microfluidization. *Ceramics International*, **38**, 2187-2193.