

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER KOMPOZİT ESASLI Lİ-İON BATARYA PAKETLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Görkem YILDIZ**

**Lif ve Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı**

(

**ARALIK 2019**



**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER KOMPOZİT ESASLI Lİ-İON BATARYA PAKETLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Görkem YILDIZ  
(171080903)**

**Lif ve Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Meral AKKOYUN**

**ARALIK 2019**

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171080903 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Görkem YILDIZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "POLİMER KOMPOZİT ESASLI Lİ-İYON BATARYA PAKETLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuŐtur.

**Tez Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Meral AKKOYUN** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Ömer Yunus GÜMÜŞ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Őebnem DÜZYER GEBİZLİ** .....  
Bursa Uludağ Üniversitesi

**Savunma Tarihi :** 16.12.2019

**FBE Müdürü :** **Doç. Dr. Murat ERTAŐ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Görkem YILDIZ

İmzası :

X X X X



*Aileme,*

## ÖNSÖZ

Bana hiçbir desteğini esirgemeyen ve her anımda yanımda olan hayat arkadaşım, gönül ortağım, yoldaşım, sevgili eşime,

Beni yüksek lisans öğrenimine teşvik eden ve destekleyen Elatek Kauçuk A.Ş. Ar-Ge/Mühendislik Müdürü Sayın Hüseyin GÖNÜLKIRMAZ' a,

Beni danışmanı olarak kabul eden, engin tecrübelerini paylaşan, tüm sorunlarımda yardımcı olan, isteklerimi anlayan ve beni isteklerim doğrultusunda yönlendiren, çalışma azmi aşıl原因 ve bana kısa zamanda çok sayıda bilgi ve tecrübe kazandıran yüksek lisans tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Meral AKKOYUN' a,

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü destek ve yardımda bulunan Angst-Pfister Gelişmiş Teknik Çözümler A.Ş. Mühendislik Müdürü Sayın Kubilay SANCAKZADE' ye,

Destek ve katkılarından dolayı Elatek Kauçuk A.Ş. ve Angst-Pfister Gelişmiş Teknik Çözümler A.Ş. yönetimlerine,

BAP 190Y007 numaralı proje kapsamında bu tez çalışmasını destekleyen Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine,

Başta annem, babam, kardeşim ve tüm ailemin bana olan desteklerinden dolayı,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2019

Görkem YILDIZ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
KISALTMALAR .....	viii
SEMBOLLER .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY .....	xiv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>15</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>17</b>
2.1 Li-İyon Bataryalar .....	17
2.1.1 Li-ion batarya teknolojisi .....	17
2.1.2 Li-ion batarya paketleri .....	18
2.1.2.1 Geleneksel paketler.....	19
2.1.2.2 Polimer kompozit paketler.....	20
2.2 Otomobillerde Kullanılan Polimerler.....	20
2.2.1 Poliamid 6 .....	21
2.2.2 Poliamid 6.6 .....	22
2.2.3 Poliamid 12 .....	23
2.2.4 Diğer polimerler .....	23
2.2.4.1 Poliaseteller .....	23
2.2.4.2 Polikarbonat .....	24
2.2.4.3 Polifenilen oksit .....	24
2.2.4.4 Akrilonitril bütadien stiren.....	24
2.3 Polimer Kompozitlerde Kullanılan Katkılar .....	24
2.3.1 Bor nitrür .....	24
2.3.2 Alüminyum nitrür .....	26
2.3.3 Karbon fiber .....	27
2.3.4 Diğer katkılar .....	28
2.4 Polimer Kompozit Üretim Yöntemleri.....	29
2.4.1 Ekstrüzyon.....	29
2.4.2 Basınçlı kalıplama .....	30
2.4.3 Diğer üretim yöntemleri .....	32
2.4.3.1 Enjeksiyon kalıplama.....	32
2.4.3.2 Transfer kalıplama .....	33
<b>3. LİTERATÜR ÖZETİ</b> .....	<b>34</b>
3.1 Polimer Kompozitler Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	34
3.1.1 Fiber katkılı polimer kompozitler .....	34
3.1.2 Metal katkılı polimer kompozitler .....	36
3.1.3 Seramik katkılı polimer kompozitler .....	37
3.1.4 Hibrit katkılı polimer kompozitler .....	38



3.2 Polimer Kompozit Özelliklerini Etkileyen Parametreler .....	39
3.2.1 Katkı boyutunun etkisi .....	39
3.2.2 Katkı şeklinin etkisi .....	40
3.2.3 Katkı türünün etkisi.....	40
<b>4. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>42</b>
4.1 Malzemeler.....	42
4.2 Polimer Kompozit Üretim Yöntemleri.....	46
4.2.1 Ekstrüzyon yöntemi ile PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozit üretimi ..	46
4.2.2 Basınçlı kalıplama yöntemi ile PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozit plakalarının üretimi .....	47
4.3 Karakterizasyon Yöntemleri .....	50
4.3.1 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi .....	50
4.3.2 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi .....	51
4.3.3 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin termal iletkenlik özelliklerinin incelenmesi.....	51
4.3.4 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi.....	52
4.3.5 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin elektriksel iletkenlik özelliklerinin incelenmesi .....	52
4.3.6 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin mikroyapı analizi .....	53
<b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>54</b>
5.1 DSC Sonuçları.....	54
5.2 FTIR Spektroskopi Sonuçları.....	55
5.3 Mekanik Özelliklerinin Analiz Sonuçları .....	57
5.4 Elektriksel İletkenlik Özelliklerinin Analiz Sonuçları.....	59
5.5 Termal İletkenlik Özelliklerinin Analiz Sonuçları.....	60
5.6 Mikroyapı Analiz Sonuçları.....	62
<b>6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....</b>	<b>64</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>73</b>

## KISALTMALAR

<b>ABS</b>	: Akrilonitril bütadien stiren
<b>AlN</b>	: Alüminyum nitrür
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina
<b>BeO</b>	: Berilyum oksit
<b>BN</b>	: Bor nitrür
<b>c-BN</b>	: Kübik bor nitrür
<b>CF</b>	: Karbon fiber
<b>CNT</b>	: Karbon nanotüp
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>DSC</b>	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
<b>FTIR</b>	: Fourier dönüşümlü kızılötesi
<b>GF</b>	: Cam fiber
<b>h-BN</b>	: Hegzagonal bor nitrür
<b>Lab</b>	: Laboratuvar
<b>Li-İon</b>	: Lityum iyon
<b>Mg(OH)<sub>2</sub></b>	: Magnezyum hidroksit
<b>Ni</b>	: Nikel
<b>PA6</b>	: Poliamid 6
<b>PA6.6</b>	: Poliamid 6.6
<b>PA12</b>	: Poliamid 12
<b>PC</b>	: Polikarbonat
<b>POM</b>	: Polioksimetilen
<b>PPO</b>	: Polifenilen oksit
<b>PPS</b>	: Polifenilen sülfür
<b>SE</b>	: Secondary electron (ikincil elektron)
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>SiC</b>	: Silisyum karbür
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	: Silisyum nitrür
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silika
<b>T<sub>g</sub></b>	: Camı geçiş sıcaklığı
<b>T<sub>m</sub></b>	: Erime sıcaklığı
<b>ZnO</b>	: Çinko oksit
<b>β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	: Beta silisyum nitrür

## SEMBOLLER

<b>cm</b>	: santimetre
<b>dk</b>	: dakika
<b>g</b>	: gram
<b>K</b>	: kelvin
<b>kN</b>	: kilonewton
<b>kV</b>	: kilovolt
<b>log</b>	: logaritmik
<b>m</b>	: metre
<b>mm</b>	: milimetre
<b>MΩ</b>	: megaohm
<b>MPa</b>	: megapaskal
<b>nm</b>	: nanometre
<b>RH</b>	: bağıl nem
<b>s</b>	: saniye
<b>vol</b>	: hacimsel
<b>W</b>	: watt
<b>α</b>	: alfa
<b>β</b>	: beta
<b>σ</b>	: elektriksel iletkenlik
<b>γ</b>	: gama
<b>μm</b>	: mikrometre
<b>ω</b>	: omega
<b>°C</b>	: santigrat derece
<b>~</b>	: yaklaşık
<b>%</b>	: yüzde

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Çizelge 3.1:</b> Literatürdeki çeşitli hibrit katkı sistemleri. ....	<b>39</b>
<b>Çizelge 4.1:</b> PA6 (Tecomid® NB40 NL E)' nin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri. ....	<b>42</b>
<b>Çizelge 4.2:</b> h-BN ve AlN malzemelerinin ortalama partikül boyutları.....	<b>44</b>
<b>Çizelge 4.3:</b> PA6/AlN/BN karışımlarda kullanılan ana matris ve katkı miktarları. ..	<b>45</b>
<b>Çizelge 4.4:</b> Ekstrüzyon prosesinde sıcaklıklar. ....	<b>47</b>
<b>Çizelge 4.5:</b> Ekstrüzyon prosesinde basınç ve hız parametreleri. ....	<b>47</b>
<b>Çizelge 4.6:</b> 200x200x4 mm plaka için basınçlı kalıplama proses parametreleri. ....	<b>49</b>
<b>Çizelge 4.7:</b> 200x200x0,5 mm plaka için basınçlı kalıplama proses parametreleri. .	<b>49</b>
<b>Çizelge 5.1:</b> PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin erime ve camsı geçiş sıcaklıkları .....	<b>55</b>
<b>Çizelge 5.2:</b> PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin mekanik özellik sonuçları.	<b>58</b>
<b>Çizelge 5.3:</b> PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin elektriksel özellik değerleri. .....	<b>59</b>
<b>Çizelge 5.4:</b> PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin termal iletkenlik değerleri.	<b>61</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Li-İyon bataryanın çalışma prensibi.....	18
Şekil 2.2: Li-İyon bataryada anot reaksiyonu.....	18
Şekil 2.3: Li-ion bataryada katot reaksiyonu.....	18
Şekil 2.4: Elektrikli otomobillerde kullanılan batarya paketi.....	19
Şekil 2.5: Tesla Model S batarya paketi.....	19
Şekil 2.6: Polimer kompozit batarya paketi.....	20
Şekil 2.7: PA 6'nın kimyasal yapısı.....	21
Şekil 2.8: PA 6.6'nın kimyasal yapısı.....	22
Şekil 2.9: PA 12'nin kimyasal yapısı.....	23
Şekil 2.10: h-BN'ün kristal yapısı.....	25
Şekil 2.11: C-BN'ün kristal yapısı.....	25
Şekil 2.12: AlN'ün kristal yapısı.....	26
Şekil 2.13: Karbon fiberin iç yapısı, yüzey atom yapısı ve aromatik karbon halka yapısı.....	27
Şekil 2.14: Ekstrüzyon prosesi.....	30
Şekil 2.16: Basınçlı kalıplama prosesi.....	31
Şekil 3.1: Boeing 787' de karbon fiber kompozit kullanımı.....	34
Şekil 3.2: Otomobillerde fiber katkılı kompozitlerin kullanımı.....	34
Şekil 3.3: PA6/Mg(OH) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Grafit polimer kompozitin farklı oranlarda CF ve GF katkıları ile a) eğilme dayanımı, b) çekme dayanımı özelliklerinin değişimi....	35
Şekil 3.4: PA6/Mg(OH) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Grafit polimer kompozitin farklı oranlarda CF ve GF katkıları ile termal iletkenliğinin değişimi.....	38
Şekil 3.5: Kompozitin elektriksel iletkenliğinin konsantrasyona bağlılığı: (1) PVC-Cu, (2) ER-Cu, (3) PVC-Ni, (4) ER-Ni. Noktalar: deneysel sonuçlar, düz çizgiler: teorik sonuçlar.....	36
Şekil 3.6: Kompozitin termal iletkenliğinin konsantrasyona bağlılığı: (1) PVC-Cu, (2) ER-Cu, (3) PVC-Ni, (4) ER-Ni. Noktalar: deneysel sonuçlar, düz çizgiler: teorik sonuçlar.....	37
Şekil 3.7: Yapı içerisinde farklı büyüklükteki katkıların termal iletkenliğe olan etkisi.....	40
Şekil 3.8 AlN/BN hibrit kompozit sisteminde optimum şekil ve bileşim çalışmaları.....	41
Şekil 4.1: PA6'nın FTIR spektrumu.....	42
Şekil 4.2: PA6'nın DSC analiz sonucu, erime noktası (T <sub>m</sub> ).....	43
Şekil 4.3: PA6'nın DSC analiz sonucu, camsı geçiş sıcaklığı (T <sub>g</sub> ).....	43
Şekil 4.4: h-BN ve AlN malzemelerinin mikroyapı görüntüleri; a) h-BN, b) AlN...	44
Şekil 4.5: AlN'ün FTIR spektrumu.....	44
Şekil 4.6: BN'ün FTIR spektrumu.....	45
Şekil 4.7: Ekstrüzyon cihazı.....	46
Şekil 4.8: Kırıcı cihazı.....	46

<b>Şekil 4.9:</b> 200x200x4 mm plaka kalıbının 2 boyutlu çizimi.....	<b>48</b>
<b>Şekil 4.10:</b> Basınçlı kalıplama cihazı.....	<b>48</b>
<b>Şekil 4.11:</b> Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçüm cihazı.....	<b>51</b>
<b>Şekil 4.12:</b> Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi ölçüm cihazı. ....	<b>51</b>
<b>Şekil 4.13:</b> ASTM D638 standardında bulunan Type I çekme testi numune boyutları. .....	<b>52</b>
<b>Şekil 4.14:</b> Elektriksel öz direnç ölçüm cihazı. ....	<b>53</b>
<b>Şekil 5.1:</b> PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin DSC analiz sonucu, erime noktası (T <sub>m</sub> ). ....	<b>54</b>
<b>Şekil 5.2:</b> PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin DSC analiz sonucu, camsı geçiş sıcaklığı (T <sub>g</sub> ). ....	<b>54</b>
<b>Şekil 5.3:</b> Katkısız PA6' nın FTIR spektrumu .....	<b>55</b>
<b>Şekil 5.4:</b> Hacimsel olarak % 10 katkı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitin FTIR spektrumu.....	<b>56</b>
<b>Şekil 5.5:</b> Hacimsel olarak % 30 katkı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitin FTIR spektrumu.....	<b>56</b>
<b>Şekil 5.6:</b> Hacimsel olarak % 50 katkı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitin FTIR spektrumu.....	<b>56</b>
<b>Şekil 5.7:</b> Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin çekme dayanımı sonuçları. ....	<b>57</b>
<b>Şekil 5.8:</b> Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin kopmadaki uzama sonuçları. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 5.9:</b> Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerleri. ....	<b>60</b>
<b>Şekil 5.10:</b> Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin termal iletkenlik sonuçları. ....	<b>61</b>
<b>Şekil 5.11:</b> Hacimce % 10 katkı oranlı PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitin mikroyapı görüntüleri; a) 10000 X, b) 20000 X. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 5.12:</b> Hacimce % 30 katkı oranlı PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitin mikroyapı görüntüleri; a) 10000 X, b) 20000 X. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 5.13:</b> Hacimce % 50 katkı oranlı PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitin mikroyapı görüntüleri; a) 10000 X, b) 20000 X.....	<b>62</b>

# POLİMER KOMPOZİT ESASLI Lİ-İON BATARYA PAKETLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Günümüzde elektrikli otomobillerin öneminin artmasıyla birlikte, otomobil firmalarının elektrikli araçlar üzerinde yaptıkları çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu doğrultuda batarya kapasitelerinin artırılması ve araçların hafifletilmesi ile ilgili çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Gelecekte elektrikli otomobillerin geleneksel yakıt motorlu araçların yerine geçmesi için bu engel aşılmalıdır. Bu yönde yapılan çalışmalardan biri de toplam araç ağırlığının azaltılmasıdır. Araç ne kadar hafif olursa elektrik motorunun harcayacağı enerji azalacak ve bataryalardaki enerji daha uzun zamanda tükenecektir. Bu çalışmanın amacı yüksek termal iletkenliğe sahip bor nitür (BN) ve alüminyum nitür (AlN) katkılı poliamid 6 (PA6) polimer kompozitin geliştirilmesi ve özelliklerinin araştırılmasıdır. Polimer kompozit esaslı Li-ion batarya paketi, geleneksel alüminyum batarya paketlerine göre ağırlık açısından büyük avantaj sağlaması öngörülmektedir. Bu çalışmada farklı oranlarda AlN ve BN katkıları kullanılarak PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitler üretilmiştir. Ekstrüzyon yöntemi ile filament olarak üretilen kompozitler sonraki aşamada granül üretim hattında granül haline getirilmiştir. Son aşamada ise elde edilen granüller, basınçlı kalıplama yöntemi ile 4 mm ve 0,5 mm kalınlıklarında plakalar halinde şekillendirilmiştir. Tez kapsamında katkıların polimer içerisindeki dağılımı incelenmiştir, ısıl iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir ve bu özellikler arasındaki bağlantılar belirlenmiştir. PA6'nın mekanik özelliklerinin katkı ile birlikte düştüğü gözlemlenmiştir. Yapıya katkı eklendiğinde çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Katkı oranı arttıkça kopma uzaması değeri düşmektedir. Katkılar ile birlikte PA6'nın elektriksel iletkenlik değerinde az oranda artış bulunmaktadır. En yüksek elektriksel iletkenlik değeri hacimce %50 katkılı kompozit için elde edilmiştir. PA6/AlN/BN hibrit katkı ile PA6'nın termal iletkenlik değerinde beş kata yakın bir artış sağlanmıştır. En yüksek termal iletkenlik değeri 1,040 W/m.K ile hacimsel olarak %50 AlN/BN katkısı içeren kompozitte elde edilmiştir. PA6 matris içerisinde AlN/BN katkılarının homojen dağılımı elde edilmiştir. Yapı içerisinde katkıların topaklanması gözlemlenmemiştir. PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin FTIR analizi sonuçlarına göre PA6, AlN ve BN yapıları açıkça gözlemlenmektedir. DSC analiz sonuçlarına göre, PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin erime ve camsı geçiş sıcaklıklarının BN ve AlN katkılarının varlığından etkilenmedikleri görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Li-Ion Batarya, Batarya paketi, Hibrit Polimer Kompozit, Poliamid 6, Bor Nitür, Alüminyum Nitür

# IMPROVEMENT OF POLYMER COMPOSITE BASED LI-ION BATTERY PACKS AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

## SUMMARY

Today, with the increase in the importance of electric cars, the work of the car companies on electric vehicles is increasing day by day. In this respect, studies on increasing battery capacities and lightening of vehicles have been focused on. This obstacle must be overcome in order for electric cars to replace traditional fuel-powered vehicles in the future. One of the studies conducted in this direction is to reduce the total weight of the vehicle. If the vehicle becomes lighter, the electric motor spends less energy, and energy of the battery is consumed in the long time. The aim of this study is to develop and investigate the properties of polyamide 6 (PA6) polymer composite filled with high thermal conductivity boron nitride (BN) and aluminum nitride (AlN). The polymer composite-based Li-ion battery pack is foreseen to provide a major weight advantage over conventional aluminum battery packs. In this study, PA6/AlN/BN hybrid polymer composites were produced by using different ratios of AlN and BN additives. Composites produced as extruded filaments were extruded into granules in the granular production line. In the final stage, obtained granules were shaped into plates of 4 mm and 0.5 mm thickness by compression molding method. In the thesis, the distribution of the additives in the polymer was investigated, thermal conductivity, electrical conductivity and mechanical properties were characterized and the relationships between these properties were determined. It has been observed that the mechanical properties of PA6 decreased together additives. When additives was added to the structure, a rapid decrease in tensile strength and elongation at break values was observed. As quantity of additives rate increases, the elongation at break value decreases. There is a slight increase in electrical conductivity of PA6 with additives. The highest electrical conductivity value was obtained for composite containing 50 vol% additives. With the addition of AlN/BN hybrid additives, the thermal conductivity value of PA6 is increased up to five times. The highest thermal conductivity value was obtained in the composite containing 50% AlN/BN by volume with 1,040 W/m.K. Homogeneous distribution of AlN/BN additives in PA6 matrix was obtained. No agglomeration of the additives was observed in the structure. According to FTIR analysis of PA6/AlN/BN hybrid polymer composites, PA6, AlN and BN structures are clearly observed. According to DSC analysis results, melting and glass transition temperatures of PA6/AlN/BN polymer composites are not affected by the presence of BN and AlN additives.

**Keywords:** Li-Ion Battery, Battery Pack, Hybrid Polymer Composite, Polyamide 6, Boron Nitride, Aluminum Nitride



## 1. GİRİŞ

Günümüzde elektrikli otomobillerin öneminin artmasıyla birlikte, otomobil firmalarının elektrikli araçlar üzerinde yaptıkları çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu doğrultuda batarya kapasitelerinin artırılması ve araçların hafifletilmesi ile ilgili çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Elektrikli otomobillerin en önemli sorunlarından birisi kısa araç menzildir. Gelecekte elektrikli otomobillerin geleneksel yakıt motorlu araçların yerine geçmesi için bu engel aşılmalıdır. Bu yönde yapılan çalışmalardan biri de toplam araç ağırlığının azaltılmasıdır. Araç ne kadar hafif olursa elektrik motorunun harcayacağı enerji azalacak ve bataryalardaki enerji daha uzun zamanda tükenecektir. Bu doğrultuda otomobilin menzili de artacaktır. Bu projenin amacı yüksek termal iletkenliğe sahip BN ve AlN katkılı PA6 polimer kompozitlerin geliştirilmesi ve özelliklerinin iyileştirilmesidir ve sonuç olarak bu malzemelerin batarya paketlerinde kullanılmalarının önünün açılmasıdır.

Batarya paketlerinde bulunan Li-ion batarya hücrelerinin kapasite, tüketim ve ömür bakımından en verimli çalıştığı sıcaklık aralığı 15 °C ile 35 °C arasındadır. Batarya hücrelerini bu sıcaklıklar arasında tutmak için batarya paketlerinin içinde soğutma sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemler bataryaları sürekli olarak istenilen sıcaklık aralıklarında çalışmasını sağlamaktadır. Soğutma sistemlerinin yanında batarya paketinin termal iletim özelliği de önemli bir faktördür. Batarya hücrelerinin çalışması sırasında oluşan sıcaklık, batarya paketinin içinden dışına doğru etkili ve hızlı bir şekilde iletilmelidir. Elektrikli araçlarda kullanılan geleneksel batarya paketleri, polimerlere göre yüksek termal iletkenliğe sahip olan alüminyum ve alaşımlarından üretilmektedir. Batarya paketinden istenilen genel özellikler düşük ağırlık, yüksek termal iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık, korozyon dayanımı, mekanik mukavemet ve düşük maliyettir. Alüminyum, polimerler ile bu özellikler bakımından karşılaştırıldığında yüksek termal iletkenlik ve mekanik mukavemet özellikleri açısından avantajlıdır. Düşük ağırlık, elektriksel yalıtkanlık, korozyon dayanımı ve düşük maliyet bakımından polimerler tüm malzemelere göre üstün özellikler sergilemektedirler. Polimerlere uygulanan cam elyaf ve karbon elyaf gibi katkıları

mekanik mukavemet değerlerini önemli ölçüde arttırmaktadır [1]. Polimerlerin termal iletkenliği metallere göre önemli ölçüde düşüktür. Polimerlerin %100 kristal yapıya sahip olmaması ve düzensiz ve uzun zincirlerden oluşması bu malzemelerin termal iletkenliğini etkileyen en önemli parametrelerdir. Polimerlerin termal iletkenliğini arttırmak için yapıya iletkenliği arttırıcı katkıları takviye edilmesi gerekmektedir. Yüksek termal iletkenliğe sahip olan grafen (2000-4000 W/m.K) en yaygın kullanılan katkı türlerindedir. Fakat, grafenin yüksek termal iletkenliğe sahip olmasına rağmen polimer matrisine eklendiğinde beklenen artışın altında kalmaktadır (en fazla 10 W/m.K) [2, 3]. Bunun sebebi, katkının polimer yapı içerisinde çok iyi yönelme ve oryantasyonunun sağlanamamasıdır. Literatürde yüksek ısı iletken BN ve AlN katkılı PA6 kompozitler ile ilgili kısıtlı sayıda yayınlar bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin ekstrüzyon ve basınçlı kalıplama yöntemleri ile üretimini gerçekleştirmektir. Ayrıca, çalışma kapsamında farklı katkı oranlarının PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin mekanik, ısı, elektriksel ve mikroyapı özelliklerini olan etkilerinin incelenmesi planlanmaktadır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Li-Ion Bataryalar

#### 2.1.1 Li-Ion batarya teknolojisi

Lityum iyon piller şarj edilebilen pillerdir. Lityum iyon pillerde elektrotlar karbon ve metal oksit, elektrolit ise lityum tuzu çözeltilisidir [4]. Cep telefonu, diz üstü bilgisayarlar, küçük ev aletleri, tabletler ve elektrikli araçlar gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Li-Ion pillerin avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır [5].

Avantajları:

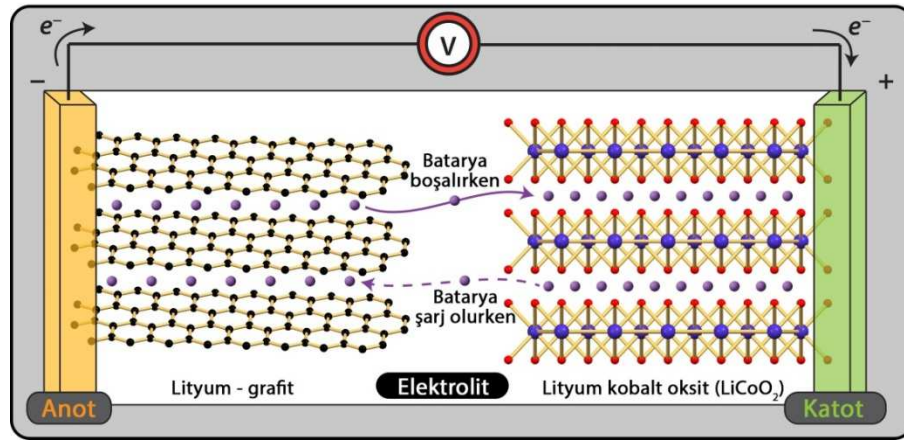
- Kapalı hücre, bakım gerektirmemesi
- Uzun ömürlü
- Geniş çalışma sıcaklık aralığı
- Uzun raf ömrü
- Çabuk şarj olabilme kabiliyeti
- Yüksek güçlü deşarj kapasitesi
- Yüksek enerji verimi
- Yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu
- Hafıza etkisinin olmayışı

Dezavantajları:

- Fiyatı
- Yüksek sıcaklıklarda bozunması
- Koruyucu devre ihtiyacının oluşu
- Aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı veya termal bozunma

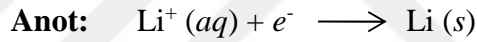
Bir lityum iyon pilinin içi; katot (pozitif yük), anot (negatif yük) ve ayırıcı plaka olarak üç temel bölümden oluşmaktadır. Batarya şarj edildiğinde, elektrikle yüklenen lityum atomları, karbon katmanda toplanır ve şarjdan çıkardıktan sonra, elektronlar katot kısma doğru hareket eder. Bu döngünün gerçekleşmesi sırasında

elektromanyetik güç üretilir. Şekil 2.1' de Li-Ion bataryaların çalışma prensibi gösterilmektedir.

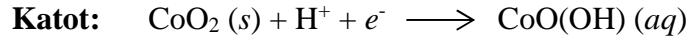


Şekil 2.1: Li-İon bataryanın çalışma prensibi [6].

Li-Ion bataryaların en önemli sorunu çalışma sırasında açığa çıkan ısıdır. Isının sebebi, pozitif ve negatif elektrotlarda şarj ve deşarj sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlardır (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3).



Şekil 2.2: Li-Ion bataryada anot reaksiyonu [6].



Şekil 2.3: Li-Ion bataryada katot reaksiyonu [6].

Li-Ion bataryalardan yüksek verim elde edilebilmesi için bataryaları belirli sıcaklık aralıklarında tutmak gerekmektedir. Li-Ion bataryaların çalışma esnasında kabul edilebilir sıcaklık aralığı -20 °C – 60 °C [7] ve optimum performans aralığı 15 °C – 35 °C'dir [8].

### 2.1.2 Li-ion batarya paketleri

Li-Ion batarya paketi içerisinde Li batarya hücreleri, elektronik üniteler ve soğutma sistemini barındıran kutu benzeri yapıdır. Batarya paketlerinde çeşitli soğutma sistemleri kullanılmaktadır: sıvı soğutma, hava soğutma ve hibrit soğutma (sıvı+hava). Şekil 2.4' te elektrikli bir otomobilin batarya paketi gösterilmektedir.



**Şekil 2.4:** Elektrikli otomobillerde kullanılan batarya paketi [9].

### 2.1.2.1 Geleneksel paketler

Geleneksel paketlerde alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının kullanılmasının avantajlarından en önemlisi, polimerlere göre yüksek mekanik mukavemet değerine sahip olmasıdır. Li-Ion bataryalar yanıcı malzemelerden oluşur ve hasar gördüğünde yangın çıkarma riskine sahiptir. Araçlarda herhangi bir kaza sırasında, batarya paketleri bataryalara koruyucu bir kalkan görevi görmelidir. Sürücü ve yolcu güvenliği için bu özellik büyük önem teşkil etmektedir. Geleneksel bataryaların bir diğer önemli avantajı da alüminyum ve alaşımları metal malzeme olduğundan dolayı, doğal olarak yüksek termal iletkenliğe sahip olmasıdır. Li-Ion bataryaları belirli sıcaklık aralığında tutmak gerekmektedir. Her ne kadar batarya paketlerinde soğutma sistemleri olsa da alüminyum, paket içerisindeki ısıyı paket dışına ileterek soğutmaya yardımcı olmaktadır. Günümüzde üretilen elektrikli otomobillerin tamamında geleneksel batarya paketleri kullanılmaktadır (Şekil 2.5) [10].



**Şekil 2.5:** Tesla Model S batarya paketi [11].

### 2.1.2.2 Polimer kompozit paketler

Polimer kompozit paketlerin en büyük avantajı düşük ağırlıkta olmasıdır. Elektrikli araçlarda ağırlık azaltımının menzil artışında doğrudan etkisi bulunmaktadır. Polimerler hem mekanik mukavemet hem de termal iletkenlik açısından metallere göre düşük performans gösterdiklerinden dolayı içerlerine eklenen farklı tip katkıları ile polimer kompozit oluşturularak metallerin özelliklerine yaklaştırılmaya çalışılmaktadır.

Polimer kompozit batarya paketleri üzerine çalışmalar devam etse de, günümüzde üretilen elektrikli otomobillerde geleneksel paketler kullanılmaktadır. Bunun en büyük sebebi, polimer kompozit paketlerin yüksek üretim maliyetleridir. Fiber katkılı polimer kompozit paketler, maliyetin ikinci planda olduğu elektrikli yarış arabalarında kullanılmaktadır (Şekil 2.6) [12].



Şekil 2.6: Polimer kompozit batarya paketi [12].

## 2.2 Otomobillerde Kullanılan Polimerler

Poliamidler, amid birimler içeren uzun zincir polimerlerdir ( $N-H-C=O$ ). Bu polimerler, bir asidin amit ile polimerizasyonundan elde edilmektedir. Poliamidler, mükemmel performans dengesi ve maliyetinden dolayı mühendislik polimerleri içinde en geniş kullanılan polimer aileleri arasındadır [13].

Poliamidlerin temel karakteristikleri şunlardır:

- Yüksek sıcaklıklar ve uzun zaman süreleri içinde aşınmaya karşı dayanıklılık.
- Yüksek dayanım ve yüksek sertlik.

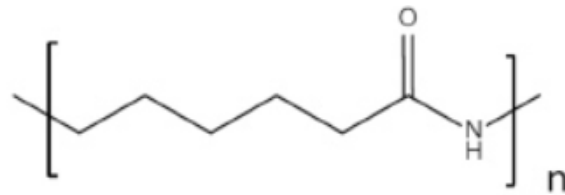
- Düşük sıcaklıklarda bile fonksiyonel sağlamlık.
- Kolay kalıp doldurma için yüksek akışkanlık.
- İçsel özelliğinden dolayı tutuşmaya karşı dayanıklılık.
- Mükemmel di-elektriksel özellik.
- Aşınmaya karşı direnç.
- Sıra dışı kimyasal dayanıklılık.
- Kimyasal yakıt, yağ veya aromalı materyallere karşı yüksek direnç.
- Yüksek oksijen bariyeri.
- Su emme
- Mükemmel maliyet/performans dengesi.

Poliamidlerin otomotiv sektöründe temel kullanım alanları şunlardır:

- Hava yakıtı: hava giriş manifoldları
- Güç aktarma organları: dişliler, kavramalar, zincir gergileri
- Kapaklar: motor kapakları
- Üfleme hava kanalları
- İç mekân: hava yastığı kanisterleri
- Dış mekân: ızgaralar, kapı tutamakları, jant kapakları, ayna

### 2.2.1 Poliamid 6

Poliamid 6 (PA6) mühendislik plastiklerinin en önemli gruplarından birini oluşturur. Yüksek mol kütlesine ve kristallliğe sahip, nem aktivitesi düşük sentetik bir termoplastiktir. Çeşitli viskozite değerlerinde, cam elyaf ve benzeri elyaflar ile kuvvetlendirilmiş, kauçuklu, ısıl dayanımı yüksek, mineral dolgulu ve alev geciktiricili, ultraviole dayanımlı olmak üzere çok geniş bir ürün çeşitliliği bulunmaktadır. Poliamid 6 ürünler sahip oldukları özelliklerden dolayı birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Şekil 2.7' de poliamid 6' nın kimyasal yapısı gösterilmiştir.

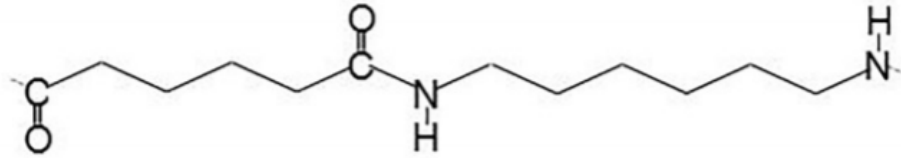


**Şekil 2.7:** PA 6' nın kimyasal yapısı [14].

Mükemmel sertlik ve tokluk dengesine ve ısıl deformasyona karşı direnç özelliklerine sahiptir [15]. Yatak, dişli, aşınma plakaları, yatak segmanları gibi parçaların yapımına uygun olup çelik, bronz, pirinç yerine gereken durumlarda tercih edilir. Düşük ve normal kayma hızlarında toz, kum vb. aşındırıcı ortamlarda çalışma ömrü bronz, döküm, demir ve çelikten 2 ila 10 kat daha fazladır. Kolay işlenebilir özelliktedir [16]. Düşük nemde ve sıcaklıkta makul oranlarda elektrik yalıtkanlığı özelliği vardır. Yağlara, motor yakıtlarına, hidrolik sıvılara, temizleyici kimyasallara, alifatik ve aromatik hidrokarbonlara dayanıklıdır. Ancak sulandırılmış mineral aside karşı dayanıklı değildir. Alkol, ester ve ketonlara dirençlidir. Formik asit, sülfürik asit gibi asitlere ve oksidasyonlu maddelerin çözeltilerine direnç gösteremez ve tamamen çözülür [13].

### 2.2.2 Poliamid 6.6

Plastikler içerisinde en dayanıklısı olarak bilinen Poliamid 6.6 (PA6.6) en yüksek ergime noktasına sahiptir. Yarı kristal bir yapısı vardır. 265 derecede eriyen PA6.6'nın sürekli kullanım sıcaklığı 120 °C'dir. PA6' da olduğu gibi çeşitli viskozite değerlerinde, cam elyaf ve benzeri elyaflar ile kuvvetlendirilmiş, kauçuklu, ısıl dayanımı yüksek, mineral dolgulu ve alev geciktiricili, ultraviole dayanımlı olmak üzere çok geniş bir ürün çeşitliliği bulunmaktadır. Şekil 2.8' de poliamid 6.6'nın kimyasal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.8: PA 6.6'nın kimyasal yapısı [17].

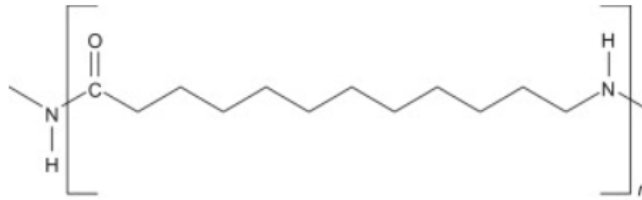
Yüksek mukavemete ve sertliğe sahiptir [18]. Isıl deformasyona karşı dirençlidir [19]. Tekrarlı gerileme ve ani darbelere karşı mükemmel direnç gösterir [19]. Ayrıca; çok yüksek eğilme, çekme dayanımına, düşük sürtünme katsayısına sahiptir ve yük altında çalışmaya en uygun malzemedir [19]. Darbeye karşı daha mukavemetli olması için içerisine elastomer; mukavemet, sertlik ve yorulma direnci gibi özelliklerini arttırmak için ise cam elyafla takviye edilir. Etkili bir dielektrik özelliğe sahiptir. Yağlayıcılara, yakıtlara, hidrolik sıvılara, boyalara, temizleyici kimyasallara



ve deterjanlara, alifatik ve aromatik çözücülere mükemmel direnç gösterir. Ayrıca sulu çözelti ve tuzlara karşı da direnç gösterme özelliğine sahiptir. Sıcak su hatta buhara mükemmel derecede direnç gösterir [13].

### 2.2.3 Poliamid 12

Poliamid 12 (PA12),  $[-(\text{CH}_2)_{11}\text{C}(\text{O})\text{NH}-]_n$  (Şekil 2.9), formülüne sahip bir termoplastik polimerdir. Her biri 12 karbon atomuna sahip olan  $\omega$ -aminolaurik asit veya laurolaktamdan yapılıdır. Mükemmel darbe dayanımına ve standart poliamid 6 ve 6.6'ya göre çok daha düşük nem emme, erime noktası ve yoğunluğa sahiptir [20]. Aynı zamanda stres altında kırılmaya karşı daha az hassastır. Olumsuz tarafı, daha düşük eğilme ve gerilme mukavemetinin yanı sıra [20], standart poliamid 6 ve 6.6'ya göre daha düşük ısı sapsması ve cam geçiş sıcaklığına sahiptir.



Şekil 2.9: PA 12'nin kimyasal yapısı [21].

PA12, iyi bir elektrik izolatörüdür ve diğer poliamidler gibi, nem nedeniyle yalıtım özellikleri etkilenmez. İyi darbe direncine ve kimyasal stabiliteye sahiptir. PA12, güçlü oksitleyici asitlere karşı dayanıklı değildir.

PA12 ve kopolimerleri birçok sektörde, özellikle spor ürünlerinde, otomotiv ve elektrik endüstrisinde kullanılır. Önemli uygulamalar arasında spor ayakkabı ve kayak botları, spor gözlükleri, otomobillerin iç ve dış tasarımları ile konveyör bantlar, elektrikli muhafazalar ve boya püskürtme hortumları gibi ürünlerde kullanılır.

### 2.2.4 Diğer polimerler

#### 2.2.4.1 Poliasetaller

Asetal polimerler polioksimetilen (POM) olarak adlandırılırlar. Yüksek mukavemet, sertlik, yorulma ve akma dayanımına sahiptirler. Nem ve kimyasallara karşı dayanıklıdırlar [13].

#### **2.2.4.2 Polikarbonat**

Polikarbonat (PC), dihidrik fenollerin karbonat grupları ile kaplandığı doğrusal bir karbonik asit poliesteridir. Düşük sıcaklıkta yüksek darbe dayanımına ve yüksek sıcaklıktaki yaşlanmaya karşı dayanıma sahiptir. Proses edilebilirliği yüksektir ve ultraviyole dayanımına sahiptir [13].

#### **2.2.4.3 Polifenilen oksit**

Polifenilen oksit (PPO), yüksek ısı ve darbe dayanımına sahiptir. Nem emilimi düşüktür ve yanmazlık özelliğine sahiptir [13].

#### **2.2.4.4 Akrilonitril bütadien stiren**

Akrilonitril bütadien stiren (ABS) kalıp yolu ile üretilen ürünlerde çok yaygın olarak kullanılan hafif ve sert bir polimerdir. ABS, tok ve rijit bir malzemedir ve yüksek darbe dayanımına sahiptir [13].

Poliamid 6' nın üstün mekanik ve proses edilebilirlik özelliklerine sahip termoplastik polimerler arasında bulunmasından dolayı tez çalışmasında ana polimer matrisi olarak tercih edilmiştir. Ayrıca poliamid 6, otomotiv sektöründe fonksiyonel ve yüksek yüklere maruz kalan parçalarda sıklıkla kullanılmasından dolayı, geliştirilecek olan kompozit malzeme otomotiv sektörü için avantajlı bir konuma gelebilecektir.

### **2.3 Polimer Kompozitlerde Kullanılan Katkılar**

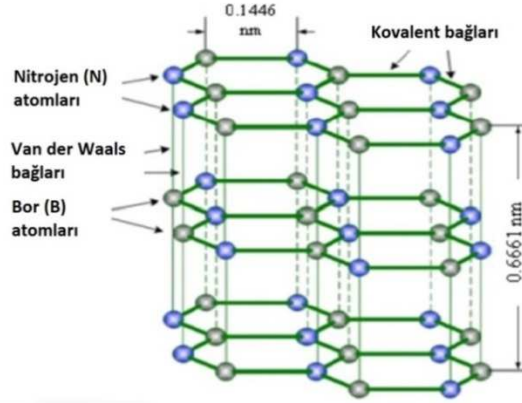
Polimerlerin, kullanım alanına göre tek başına yeterli olmadığı durumlarda yapı içerisine çeşitli katkı malzemeleri eklenerek mekanik, kimyasal, ısıl ve elektriksel özellikleri optimize edilebilmektedir.

#### **2.3.1 Bor nitrür**

Bor nitrür (BN), esasen elektriksel yalıtkanlar ve kesici aletlerde, sınırlı ancak önemli uygulamalara sahip endüstriyel seramik bir malzeme olan bor ve nitrojenin sentetik olarak üretilen kristal bileşimidir. İki farklı kristal yapıda üretilir, hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve kübik bor nitrür (c-BN).

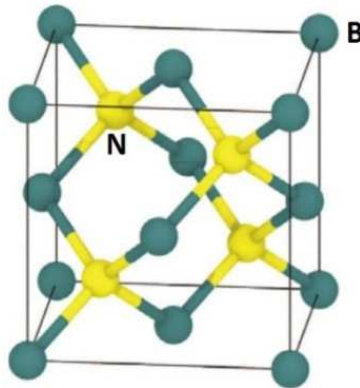
h-BN, borik oksidin ( $B_2O_3$ ) amonyakla ( $NH_3$ ) ısıtılması ile hazırlanır. Moleküler düzeyde, birbirinden kolayca geçebilen altıgen halka tabakalarından oluşan bir

yapıdadır. Bu yapı, karbon mineral grafit yapısına benzerdir (Şekil 2.10). h-BN yumuşak, kaygan bir malzemedir. Grafitten farklı olarak, h-BN düşük elektrik iletkenliği ve yüksek termal iletkenliği ile dikkat çekmektedir [22]. h-BN sıklıkla sıcak preslerde kalıplama prosesi ile şekillendirilmektedir. Elektrik yalıtkanları [23], ergitme potaları ve metal, seramik veya polimer işleme makineleri için sıcaklığa dayanıklı sıvı bağlayıcı kaplaması olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.10: h-BN' ün kristal yapısı [24].

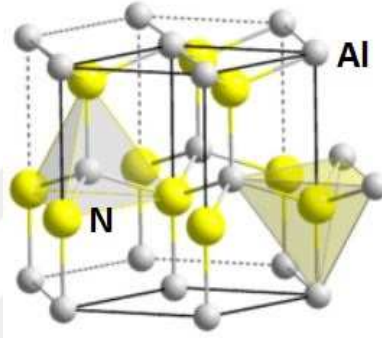
c-BN (Şekil 2.11), çoğunlukla h-BN' ü aşırı yüksek basınca (altı ila dokuz gigapaskal) ve sıcaklığa (1500 °C ila 2000 °C) maruz bırakarak küçük kristal formları oluşturularak yapılmaktadır. Sertlik değeri pırlantadan sonra ikincidir (Mohs sertlik ölçeğinde maksimum 10' a yaklaşır) ve sentetik elmas gibi, sert çeliklerin işlenmesi için genellikle metal veya metal-seramik kesme aletlerine bağlanır. Yüksek oksidasyon sıcaklığından dolayı (1900 °C' nin üzerinde), elmadan (800 °C' nin üzerinde oksitlenen) çok daha yüksek bir çalışma sıcaklığına sahiptir.



Şekil 2.11: C-BN' ün kristal yapısı [25].

### 2.3.2 Alüminyum nitrür

Alüminyum Nitrür (AlN) (Şekil 2.12), teknik seramik ailesinde yeni bir malzemedir. Keşfi 100 yıldan daha önce gerçekleşmiş olsa da, son 20 yıl içerisinde kontrollü ve tekrarlanabilir özelliklere sahip ticari olarak uygulanabilir bir ürün olarak geliştirilmiştir. Isı iletkenliği yüksektir, ancak benzersiz bir şekilde güçlü bir dielektriktir [23]. Bu olağandışı özellik kombinasyonu, AlN' ü optik, aydınlatma, elektronik ve yenilenebilir enerji alanındaki birçok gelecekteki uygulamalar için kritik bir ileri malzeme haline getirmektedir.



Şekil 2.12: AlN' ün kristal yapısı [26].

Alüminyum nitrür, hegzagonal kristal bir yapıya sahiptir ve kovalent bağlı bir malzemedir. Teknik bir malzeme üretmek için sinterleme yardımcılarının kullanımı ve sıcak presleme gereklidir. Malzeme inert atmosferlerde çok yüksek sıcaklıklara karşı kararlıdır. Havada, yüzey oksidasyonu 700 °C' nin üstünde başlar. Malzemeyi 1370 °C' ye kadar koruyan bir alüminyum oksit tabakası oluşur. Bu sıcaklığın üstünde kütle oksidasyonu meydana gelir. Alüminyum nitrür, 980 °C' ye kadar hidrojen ve karbon dioksit atmosferlerinde kararlıdır. Malzeme, suda yavaşça hidrolize olur. Güncel uygulamaların çoğu, ısının kaldırılmasının önemli olduğu elektronik alanındadır. Birçok elektronik uygulama için AlN' ün alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve berilyum oksit (BeO) yerine kullanılmasına izin vermek için metalleştirme yöntemleri mevcuttur [27].

Alüminyum nitrürün avantajları:

- Tek tip mikro yapı
- İşleme koşulları ve katkı maddeleri ile uyarlanmış yüksek ısıl iletkenlik (70-180 W/m.K)

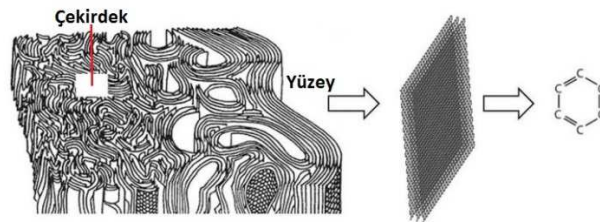
- Yüksek elektrik direnci
- Silikona yakın termal genleşme katsayısı
- Korozyon ve erozyona karşı direnç
- Mükemmel termal şok direnci
- H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> atmosferlerinde 980 °C ve 1380 °C sıcaklıklarına kadar havada kimyasal olarak kararlı (yüzey oksidasyonu 780 °C civarında meydana gelir; yüzey katmanı kütleyi 1380 °C' ye kadar korur).

### 2.3.3 Karbon fiber

Karbon fiber (Şekil 2.13) bir polimerdir ve bazen grafit lifi olarak bilinir. Aynı zamanda çok hafif ve çok güçlü bir malzemedir [28]. Karbon lifi çelikten beş kat daha güçlüdür ve iki kat katıdır. Karbon fiber, çelikten daha güçlü ve daha sert olmasına rağmen, çelikten daha hafiftir; birçok parça için ideal üretim malzemesidir. Bunlar, karbon fiberin mühendisler ve tasarımcılar tarafından üretim için tercih edilmesinin birkaç nedenidir.

Karbon lifi, malzemeyi güçlendirmek için kullanılan ince, güçlü kristalin karbon liflerinden yapılır. Karbon fiber, insan saçından daha ince olabilir ve iplik gibi birlikte büküldüğü zaman mukavemetini kazanır. Daha sonra kumaş oluşturmak için birlikte dokunabilir ve kalıcı bir şekil alması için, bir kalıbın üzerine karbon fiber dönebilir ve reçine veya plastik kaplanabilir.

Karbon fiber, kısmen kimyasal ve kısmen mekanik olan bir işlemde elde edilir. Uzun lif iplikçiklerinin çekilmesi (tel çekme) ve daha sonra liflerin yanmasını önlemek için oksijene temas etmeden çok yüksek bir sıcaklığa ısıtılmasıyla başlar. Karbonizasyon gerçekleştiğinde liflerin içindeki atomlar şiddetli bir şekilde titreşir ve karbon olmayan atomların çoğu dışarı atılır. Bu sayede uzun, sıkıca kilitlenmiş karbon atomu zincirlerinden oluşan bir lif yapısı oluşur, sadece birkaç karbon dışı atom kalır [29].



**Şekil 2.13:** Karbon fiberin iç yapısı, yüzey atom yapısı ve aromatik karbon halka yapısı [30].

Karbon fiberin avantajları:

- Sertliği yüksektir
- Çekme dayanımı yüksektir
- Düşük ağırlık / güç oranı vardır
- Kimyasal dayanımı yüksektir
- Aşırı sıcaklıklara karşı dayanıklıdır
- Düşük termal genleşmeye sahiptir

### 2.3.4 Diğer katkılar

Alüminyum oksit veya alümina ( $Al_2O_3$ ), nispeten yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir. Düşük maliyeti ve yüksek elektriksel direnci nedeniyle katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır [31]. Hacimce %60  $Al_2O_3$  (10  $\mu m$ ) içeren epoksi kompozit için 4,3 W/(m.K) termal iletkenlik değeri elde edilmiştir [31].

Çinko oksit (ZnO), yarı iletkendir ve kauçuk endüstrisinde katkı maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, araba lastikleri yuvarlanma sırasında önemli miktarda ısı üretir ve ZnO yalnızca vulkanizasyon katalizörü olarak kullanılmaz, aynı zamanda ısının dağıtılması için çok önemli olan lastiklerin termal iletkenliğini geliştirmek için kullanılmaktadır. ZnO' in yüksek termal iletkenlik ve lineer olmayan özelliklerinden dolayı, kompozitlerin elektrik stres kontrolü için faydalı olmaktadır [32].

Berilyum oksit (BeO), elmas hariç diğer metal olmayan malzemelerden daha yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir. Aynı zamanda korozyona dayanıklıdır ve mükemmel elektriksel yalıtım özellikleri göstermektedir.

Silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ), düşük termal genleşme katsayısına ve düşük dielektrik sabitine sahiptir. Silisyum nitrür üç kristalografik forma ( $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  fazlar) sahiptir ve  $\beta$ - $Si_3N_4$  bunlar içerisinde en yüksek termal iletkenliğe sahiptir.  $\beta$ - $Si_3N_4$ , etilen, polietilen, polistiren [33] ve epoksinin [34], [35] termal iletkenliğini artırmak için kullanılmıştır.  $\beta$ - $Si_3N_4$  bazlı polistiren [33] ve epoksi [35] kompozitlerindeki en yüksek termal iletkenlik değerleri sırasıyla 3,0 ve 1,8 W/(m.K) olarak elde edilmiştir. Tez çalışmasında, kompozit malzemenin ısı iletkenliğini arttırmak amacıyla katkı malzemeleri olarak BN ve AlN kullanılmıştır. BN (150-300 W/m.K) ve AlN (150-220 W/m.K)' ün en büyük avantajı yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip olmalarıdır. Polimerlerin ısı iletkenliğini arttırmak amacıyla literatürde BN ve AlN katkıları kullanılmaktadır [36, 37].

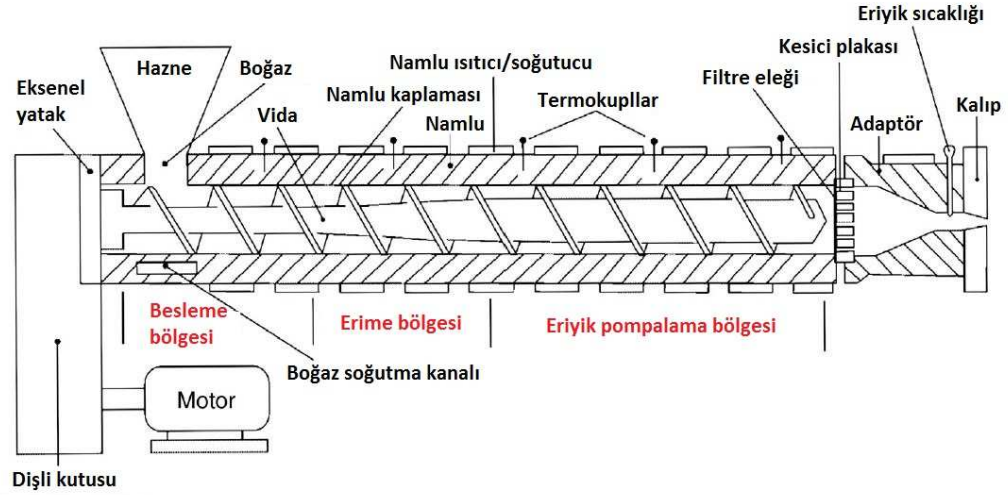
## 2.4 Polimer Kompozit Üretim Yöntemleri

Ekstrüzyon prosesi, termoplastik polimerlerin erime davranışına sahip olmasından dolayı polimer üretim sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Katkılı polimer kompozit üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli özellik, katkıların yapı içerisinde homojen olarak dağılımıdır. Polimer kompozitlerden istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için katkıların polimer yapı içerisinde homojen bir dağılım göstermesi gerekmektedir. Ekstrüzyon prosesinde polimer ve katkı malzemeleri homojen olarak karıştırılabilmektedir.

Basınçlı kalıplama prosesi, polimer veya polimer kompozitlere istenilen geometriyi verebilmek için etkili bir üretim yöntemidir. Basınçlı kalıplama prosesi sayesinde, istenilen geometriye uygun kalıp kullanılarak polimer kompozitler düşük proses sürelerinde şekillendirilmektedir. Bu yüzden de seri imalat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.4.1 Ekstrüzyon

Ekstrüzyon (Şekil 2.14), yumuşamış veya eriyik malzemenin bir kuvvet ile bir tarafı açık olan kalıba gönderilerek sabit kesitli geometrilerin (çubuklar, levhalar, borular, filmler, tel yalıtım kaplaması) oluşturulması sağlanan sürekli bir üretim yöntemidir [38]. Granül formundaki polimer malzeme namlunun arkasındaki boğazdan içeri girerken vidayla temas eder. Dönen vida, malzemeyi istenen erime sıcaklığına kadar ısıtılan namluya doğru zorlar. Çoğu proseste, namlunun sıcaklığını kalıba doğru kademeli olarak arttıran üç veya daha fazla bağımsız kontrollü ısı bölgeleri kullanan bir ısıtma profili kullanılır. Bu proses, polimer malzemenin namlu içerisinden itildiği için kademeli olarak erimesine izin verir ve polimerde bozulmaya neden olabilecek aşırı ısınma riskini azaltır. Namlu üzerine yerleştirilen ısıtma elemanları polimeri yumuşatır ve eritir. Malzemenin sıcaklığı termokupllar tarafından kontrol edilir. Yumuşak veya eriyik malzeme daha sonra bir besleme vidası ile kalıba doğru iletilir. Kalıptan çıkan ürün, üflenen hava veya su banyosunda soğutulur. Polimerlerin ekstrüzyonu (metallerin ekstrüzyonunun aksine), ham granüller tedarik edildiği sürece sürekli bir işlemdir. Ekstrüzyon esas olarak termoplastikler için kullanılır, ancak elastomerler ve termosetler de ekstrüzyona tabi tutulabilir. Bu durumda ekstrüzyondaki malzemenin ısıtılması ve eritilmesi sırasında çapraz bağlama oluşur. Termoplastik haddelenmiş ürünler, termoform yöntemi ile ayrıca oluşturulabilir.



**Şekil 2.14 :** Ekstrüzyon prosesi [39].

Ekstrüzyon prosesinin en önemli parametrelerinden biri sıcaklıktır. Eriyiğin durumu veya kalitesi, ürün kalitesi ve proses stabilitesi için son derece önemlidir. Ekstrüzyonun sıcaklık koşulları, nihai ürün formunda kristalleşme davranışını ve polimerin moleküler ağırlığını etkilemektedir [39].

Ekstrüzyon prosesinin bir diğer önemli parametresi vida hızıdır. Polimeri eritmek için ısı enerjisinin yanında vidanın sağlamış olduğu mekanik enerjiden de yararlanılmaktadır. Polimeri tamamen erimiş halde pompalama bölgesine aktarabilmek için vida hızı doğru belirlenmelidir [39].

Basınç, ekstrüzyon prosesinin diğer önemli parametreleri arasındadır. Vidanın dönme hareketi ile pompalama bölgesine ilerleyen eriyik polimer namlu içerisinde bir basınç oluşturmaktadır. Basıncı etkileyen parametreler vida hızı ve eriyik polimerin viskozitesidir. Eğer basınç düşükse eriyik polimer kalıba etkili olarak iletilmez ve kalıptan çıkan polimer istenilen şekle bürünmemektedir. Basıncın yüksek olduğu durumlarda vidayı döndüren motorun üzerine fazla yük binmektedir ve motorun arızalanmasına yol açmaktadır [39].

#### **2.4.2 Basıncılı kalıplama**

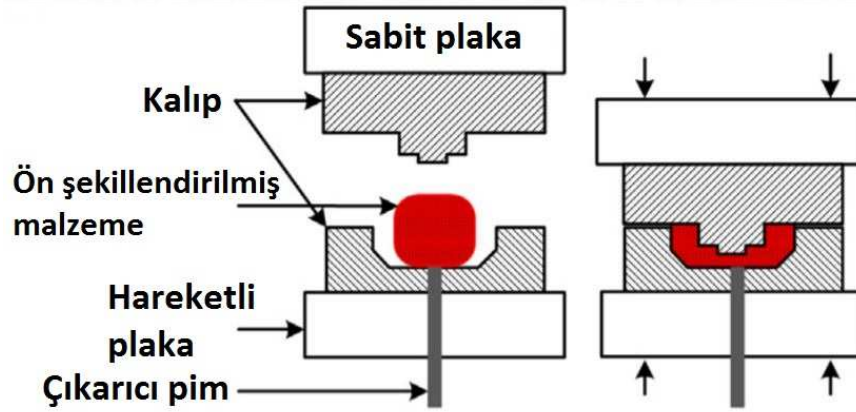
Basıncılı kalıplama, polimer granül veya tozların açık, ısıtılmış bir kalıp boşluğuna yerleştirildiği kalıplama işlemidir. Kalıp daha sonra kapatılır ve malzemenin kalıbın tüm alanlarına temas etmesi için sıkıştırılır. Şekil 2.15' te basınçlı kalıplama prosesi şematik olarak gösterilmektedir.



Bu işlem ile çok çeşitli uzunluklara, kalınlıklara ve karmaşıklıklara sahip parçalar üretebilir. Üretilen parçaların mukavemeti de yüksektir ve bu sayede birçok farklı endüstri için cazip bir işlemdir [40]. Termoset kompozitler, basınçlı kalıplamada en yaygın kullanılan malzeme türüdür.

Termoset kompozitin basınçlı kalıplama işleminde dört ana adım vardır [41]:

- 1- İstenilen parçayı üretmek için gereken boyutlara tam olarak uyan yüksek mukavemetli, iki parçalı bir metal kalıp oluşturulur. Kalıp daha sonra elektrikli ısıtıcı plakalar ile ısıtılır.
- 2- Arzu edilen kompozite, kalıbın şekline göre ön şekillendirme işlemi yapılır. Ön şekillendirme, bitmiş parçanın performansını iyileştirmeye yardımcı olan çok önemli bir adımdır.
- 3- Ön şekillendirilmiş malzeme ısıtılmış kalıba yerleştirilir. Kalıp daha sonra, genellikle 55 bar ile 135 bar arasında değişen çok yüksek basınç altında sıkıştırılır (parçanın kalınlığına ve kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak).
- 4- Basınç altında belli bir süre sonra ısıtıcılar kapatılır ve kalıbı soğutmak için kalıbın içerisindeki kanallarda su akışı sağlanır. Kalıp belli bir sıcaklığa soğutulduktan sonra açılır ve şekillendirilmiş ürün kalıptan çıkartılır.



Şekil 2.15: Basınçlı kalıplama prosesi [42].

Aşırı kalıp sıcaklığı, polimerin bozunmasına yol açarak kırılabilirliğe, düşük mekanik mukavemete ve düşük parça yüzey kalitesine neden olmaktadır. Erimiş bir polimerin viskozitesi, sıcaklıkla ters orantılıdır ve kuvvete bağlıdır. Bu nedenle, kalıp sıcaklığı çok düşük ayarlanmışsa, polimerin viskozitesi büyük ölçüde artar ve malzeme, kalıbın özellikle daraltılmış hacimli bölgelerine yeterince akamayabilir. Kalıplama

basıncında olduğu gibi, ideal işlem sıcaklığı, malzemenin türüne, formuna (granül veya preform), viskozitesine, kalıplama basıncına, parça kalınlığına ve parça tasarımına bağılıdır [42].

Sıcaklık ve basınç altında eriyen malzemenin içerisinde bulunan nem gaz formuna geçmektedir. Açığa çıkan gaz parçada boşluklar bırakarak mukavemetinin düşmesine veya parçanın istenilen geometriye ulaşamamasına neden olmaktadır. Bunu engellemek için proses esnasında kalıplar minimum 1,6 mm açılır ve bir kaç saniye beklenilerek gazın dışarı atılması sağlanmaktadır. Bu prosese havalandırma, hava alma veya gaz uzaklaştırma denilmektedir [42].

Basıncılı kalıplamanın avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Basıncılı kalıplama birçok nedenden dolayı popüler bir tekniktir. Popülerliğinin bir kısmı, gelişmiş kompozitlerin kullanımından kaynaklanmaktadır. Bu malzemeler metal parçalara göre daha güçlü, daha sert, daha hafif ve korozyona karşı daha dirençli olma eğilimindedir.
- 2- Basıncılı kalıplamanın bir başka avantajı, çok karmaşık parçalar yaratma kabiliyetidir. Bu teknik plastik enjeksiyon kalıplama üretim hızına tam olarak ulaşmasa da, tipik katmanlı kompozitlerden daha karmaşık geometrilerin üretilmesini sağlar.
- 3- Aynı zamanda plastik enjeksiyon kalıplamadan daha uzun liflere izin vererek daha güçlü ve daha sert malzemelerin üretilmesini sağlar. Bu nedenle basınçlı kalıplama, plastik enjeksiyon kalıplama ve katmanlı kompozit üretim yöntemleri arasında orta bir zemin olarak görülebilir.
- 4- Çok çeşitli uygulamalara sahip karmaşık parçalar yaratma kabiliyeti sayesinde basınçlı kalıplama, çok çeşitli sektörlerdeki üreticiler için avantajlı bir işlemdir.

## **2.4.3 Diğer üretim yöntemleri**

### **2.4.3.1 Enjeksiyon kalıplama**

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik polimerlerin seri üretimi için, genellikle ek bir işlem gerektirmeyen, en önemli proseslerden biridir. Günümüzde çoğu enjeksiyon kalıplama makinesi, limitler dahilinde tüm kalıp tipleri ile çalışabilen evrensel makinelerdir. Enjeksiyon kalıplama prosesi karmaşık geometriye sahip parçaların seri üretimi için düşük maliyet sağlamaktadır [43].

Enjeksiyon kalıplama prosesinde, polimer malzeme eriyik haline gelinceye kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra üretilecek parçanın geometrisine göre yapılan kapalı bir kalıba basınçlı olarak enjekte edilmektedir. Parça katı hale dönene kadar soğutulur, daha sonra kalıp açılır ve şekillendirilmiş parça çıkartılır [43].

#### **2.4.3.2 Transfer kalıplama**

Transfer kalıplama prosesi özellikle termoset polimerlerin şekillendirilmesinde kullanılır ve basınçlı kalıplama prosesine oldukça benzemektedir; tek farkı, malzeme basınçlı kalıplamada olduğu gibi kalıbın içine değil, kalıbın üst parçasında bulunan transfer haznesine yerleştirilir. Malzeme hazneye yerleştirildikten sonra haznenin üstü bir piston ile kapatılır. Pistonun üzerine yüksek bir kuvvet uygulanarak haznenin içerisinde bulunan malzeme, hazne ile kalıp içerisindeki boşluk arasında bulunan yolluklardan yüksek basınç ile kalıp içerisine aktarılır. Basınçlı kalıplama prosesinde olduğu gibi transfer kalıplama prosesinde de kalıplar belirli bir sıcaklığa çıkartılmaktadır. Bunun sebebi, kalıbın içine transfer edilen termoset malzemenin sıcaklık altında çapraz bağlarının oluşturularak nihai ürüne dönüştürülmesidir [44].

Tez çalışmasında katkıların polimer matris içerisinde homojen olarak dağılabilmesi için ekstrüzyon prosesi tercih edilmiştir. Ekstrüzyon sayesinde nano boyutunda olan katkıları ile eriyik haldeki poliamid 6 etkili bir şekilde karıştırılarak homojen dağılımlı bir yapı elde edilmiştir. Ekstrüzyondan çıkan kompozit filament su havuzunda soğutulduktan sonra kırıcı ile etkili şekilde granül hale getirilebilmektedir.

Test plakalarının elde edilmesi için basınçlı kalıplama prosesi tercih edilmiştir. Ekstrüzyon prosesinde elde edilen granüller kullanılarak basınçlı kalıplama prosesi ile hızlı bir şekilde istenilen geometri elde edilebilmektedir.

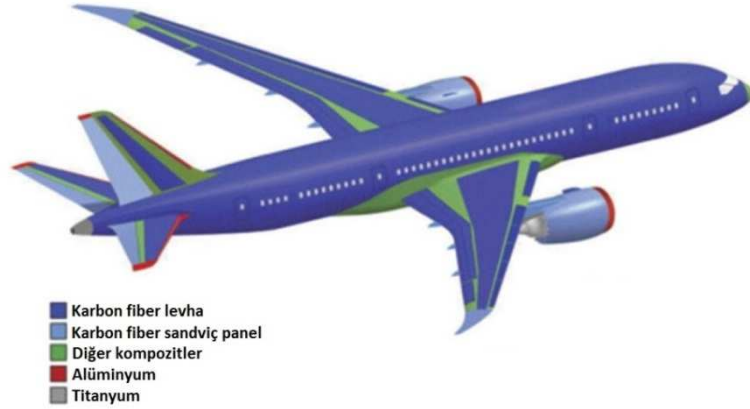
Her iki prosesin avantajları, prosesin kontrollü gerçekleştirilebilmesi ve seri üretim sektörüne uygun olmasıdır.

### 3. LİTERATÜR ÖZETİ

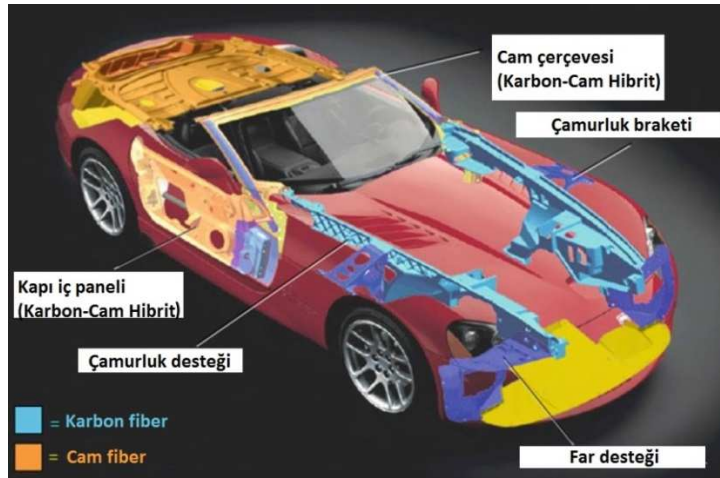
#### 3.1 Polimer Kompozit Üzerine Yapılan Çalışmalar

##### 3.1.1 Fiber katkılı polimer kompozitler

Yaygın olarak karbon fiber (CF) ve cam fiber (GF) katkıları ile polimerlerin mekanik özellikleri artırılmaktadır. Fiber katkılı polimer kompozitler metallere göre çok daha hafif, daha iyi mekanik özelliklere sahip ve korozyon dayanımı metallere göre çok daha üstün olduğu için özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadırlar (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) [29].

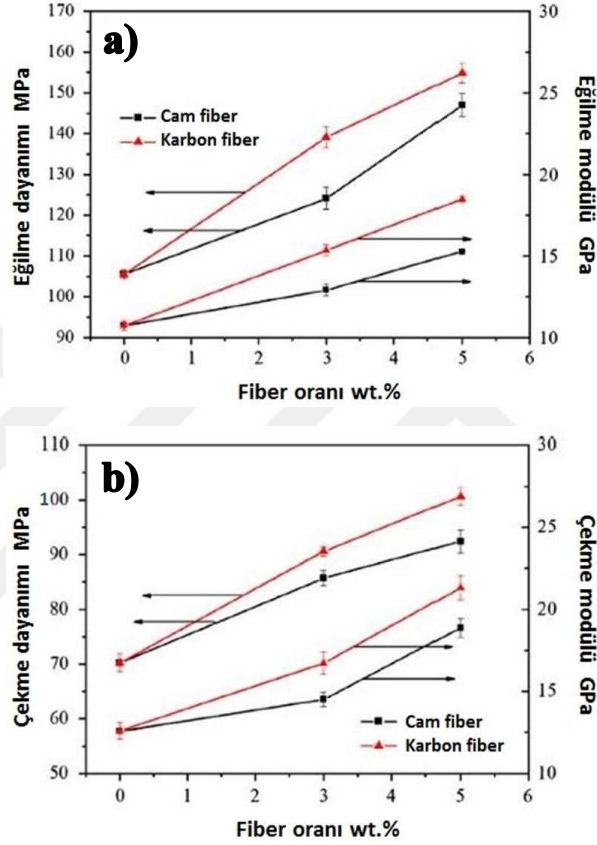


Şekil 3.1: Boeing 787 üretiminde karbon fiber kompozit kullanımı [29].



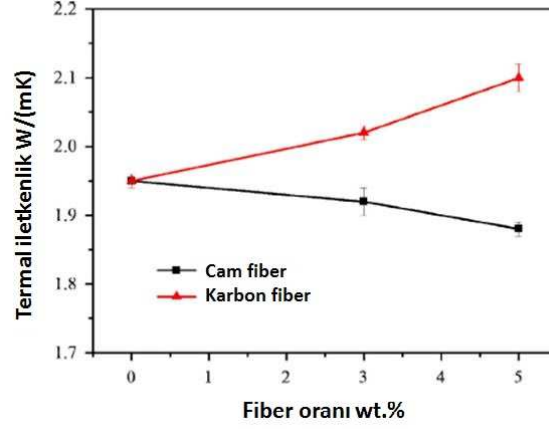
Şekil 3.2: Otomobillerde fiber katkılı kompozitlerin kullanımı [29].

Yapılan çalışmalarda polimer matrisinin içerisindeki GF ve CF katlı oranlarının artırılmasıyla çekme ve eğilme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.3) [45, 46, 47]. Yapılan çalışmalar, fiberlerin polimer matris içerisinde düzgün olarak dağıldığı zaman uygulanan yükleri karşıladığını göstermektedir. Fiberler stresi etkili bir şekilde dağıtmaktadırlar ve bazı noktalarda stresin yoğunlaşmasını önlemektedirler [48].



**Şekil 3.3:** PA6/Mg(OH)<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Grafit polimer kompozitin farklı oranlarda CF ve GF katkıları ile a) eğilme dayanımı, b) çekme dayanımı özelliklerinin değişimi [45].

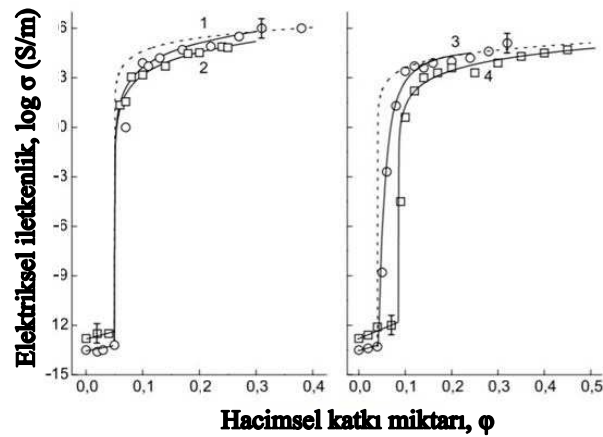
Termal iletken katkıların polimer matris içerisinde termal iletken zincirler veya ağlar oluşturduğu gözlemlenmiştir [49, 50]. Yapılan çalışmalarda karbon fiberin polimer matrisi içerisinde termal iletken zincir ve ağlar oluşturarak polimerin termal iletkenliğini arttırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.4) [45, 51, 52]. Polimer kompozitlerin termal iletkenliği temel olarak katkıları arasındaki etkileşimlere ve bağlantılara bağlıdır. Termal iletkenliği yüksek katkıları polimer matrisinde termal iletken zincirler veya ağlar üretmektedir [49, 50]. Yüksek termal iletkenliğe sahip polimer kompozite karbon fiber ilave edildiğinde karbon fiber, diğer parçacıkları birbirine bağlamak için termal iletken köprü görevini sağlamaktadır [45].



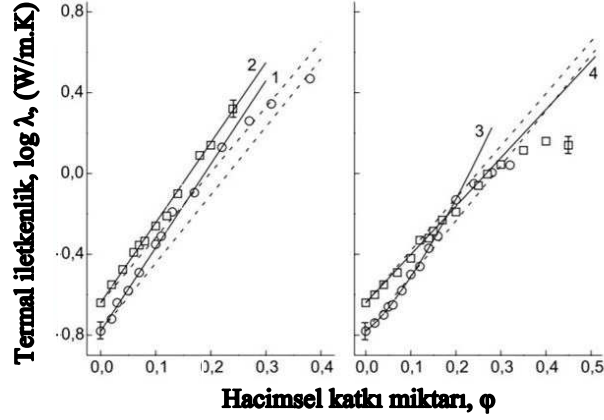
**Şekil 3.4:** PA6/Mg(OH)<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Grafit polimer kompozitin farklı oranlarda CF ve GF katkıları ile termal iletkenliğinin değişimi [45].

### 3.1.2 Metal katkılı polimer kompozitler

Nikel, bakır, alüminyum, gümüş gibi çeşitli metalik dolgular, termal ve elektriksel iletkenliği geliştirmek için polimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılmıştır (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6) [53]. Genel olarak, saf matris polimerine kıyasla kompozitin termal iletkenliğinin artırılmasında oldukça etkili olabilirler. Bununla birlikte, metalik parçacıkların polimerlere eklenmesi, kompozitlerin elektrik iletkenliğini arttırmasına ve/veya dielektrik bozulma geriliminin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, metalik katkılar sadece elektriksel yalıtım ve dielektrik bozulma geriliminin önemsiz olduğu uygulamalarda kullanılabilir.



**Şekil 3.5:** Kompozitin elektriksel iletkenliğinin konsantrasyona bağlılığı: (1) PVC–Cu, (2) ER–Cu, (3) PVC–Ni, (4) ER–Ni. Noktalar: deneysel sonuçlar, düz çizgiler: teorik sonuçlar [53].



**Şekil 3.6:** Kompozitin termal iletkenliğinin konsantrasyona bağlılığı: (1) PVC–Cu, (2) ER–Cu, (3) PVC–Ni, (4) ER–Ni. Noktalar: deneysel sonuçlar, düz çizgiler: teorik sonuçlar [53].

PA6 polimerine hacimce %2 ve %5 oranlarında bakır (Cu) eklenerek oluşturulan kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. PA6' nın (0,2 W/m.K) termal iletkenlik değerleri, hacimce %2 ve % 5 oranlarında bakır eklendikten sonra sırasıyla 0,40 ve 0,45 W/m.K değerlerine çıkmaktadır. PA6' nın (0,65 MPa) çekme dayanımı değerleri, hacimce %2 ve % 5 oranlarında bakır eklendikten sonra sırasıyla 61 ve 60 MPa değerlerine düşmektedir [54].

### 3.1.3 Seramik katkılı polimer kompozitler

Seramik katkılar, yapısal özelliklerinden dolayı termal olarak iletken ve elektriksel olarak yalıtkan kompozitler için geniş çapta kullanılmaktadırlar. Seramik katkılar serbest elektronlardan yoksundurlar ve ısı transferi baskın olarak fononlar yoluyla gerçekleşir. Genel olarak, BeO hariç, alümina ( $Al_2O_3$ ) [55, 56] ve silika ( $SiO_2$ ) gibi çoğu metal oksit katkısı daha düşük bir termal iletkenliğe sahiptir. AlN [57, 58], BN, silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ) [59] veya silisyum karbür ( $SiC$ ) [60] gibi oksit içermeyen katkılar, güçlü interatomik bağları ve kristal yapılarının fonon saçılımını önemli ölçüde azalttığından dolayı yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Özellikle, BN ve AlN katkıları termal olarak iletken ve elektriksel olarak yalıtkan kompozitler için yaygın olarak kullanılmaktadır [61]. Termal iletkenlik, katkıların kristal yapısı ve kristalliği ile ilişkilidir. Atomların hizalanması ve etkileşimleri, ısı transferinin verimini çarpıcı bir şekilde etkiler. Aslında, aynı kimyasal formüle sahip iki malzeme, farklı kristal yapıya sahiplerse, farklı termal iletkenliğe sahip olabilirler. Örneğin,  $Si_3N_4$  kristallerinde  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları vardır, bunlar sırasıyla düşük ve yüksek sıcaklık polimorflarına karşılık gelir.  $\beta$ - $Si_3N_4$ ' ün termal iletkenliği, c-eksenine paralel yönde,

izotropik -  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ' ün termal iletkenlinden çok daha yüksektir [62]. Başka bir örnek, yüksek sıcaklık ve basınç altında hegzagonal yapıdan kübik yapıya değişebilen bor nitrürdür [63]. Hegzagonal BN, kristalin düzlemsel yapısını oluşturan, kovalent olarak bağlı bor ve azot atomlarının düzlemsel tabakalarından oluşur. Van der Waals kuvvetleri vasıtasıyla farklı katmanlar düzlem boyunca bir arada tutulur. Özel kristal yapısı sayesinde, düzlem yönünde  $\sim 300 \text{ W/m.K}$  ve düzlem yönünde  $\sim 2 \text{ W/m.K}$  ile anizotropik termal iletkenlik gösterir. Kübik faza geçtikten sonra, BN daha izotropik hale gelir ve düzlem içi ve düzlemsel termal iletkenlik, neredeyse eşit ve daha yüksek hale gelir. Grafit ve elmas arasında da benzer bir durum vardır [64]. Daha iyi kristalleşme, kristal yapısında daha az hata olduğu anlamına gelir ve fonon saçılımını azaltarak ısı transferini iyileştirmeye yardımcı olabilir. Ayrıca, safsızlıkların varlığı, malzemelerdeki kusurları artıracaktır. Hatalar elektronların veya fononların ek saçılmasına neden olabilir ve bu da daha düşük termal iletkenliğe yol açabilir. İnorganik bir katkıdaki kristaller (taneler) arasındaki tanecik sınırları, fonon saçılması için önemli bir kaynak olabilir.

### **3.1.4 Hibrit katkılı polimer kompozitler**

Hibrit katkılar, termal olarak iletken kompozitlerde yaygın olarak kullanılırlar, çünkü farklı boyutlarda veya tiplerde katkılar kullanılarak yapı içerisinde termal olarak daha iletken bir aę oluşturulabilir. Hibrit katkı sistemi, katkılar arasına köprüler inşa ederek ve katkı paket yoğunluğunu maksimize ederek büyük termal iletken aę oluşturmaya yardımcı olmaktadır. Hibrit katkı sisteminin bir başka avantajı, genel katkı miktarını önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olması ve böylece sistemin viskozitesini azaltmasıdır. Hacimce %25 AlN yüklemeli AlN/epoksi sistemindeki az miktarda karbon nanotüp (CNT) (hacimce %1), hacimce %50 AlN içeren epoksi kompozitin termal iletkenlik özelliğine benzer bir davranış göstermiştir [65]. Hibrit katkı sistemi sadece paketleme yoğunluğunu arttırmak ve sistem viskozitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda bazı levha yapı katkılı kompozit sistemler için düzlem boyunca termal iletkenliği de iyileştirebilir; levha yapı katkılı malzemelerinin hizalanmasını engellemek için BN/polimer kompozitlere küresel veya düzensiz katkılar eklenebilir [66]. Çizelge 1' de literatürde araştırılmış olan farklı hibrit sistemler özetlenmektedir.



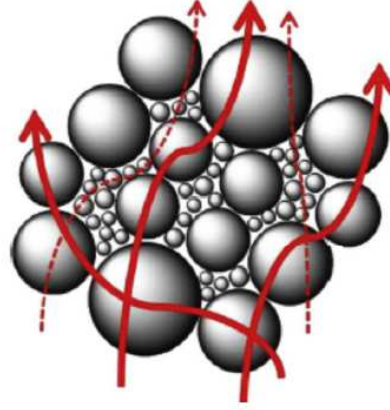
**Çizelge 3.1:** Literatürdeki çeşitli hibrit katkı sistemleri [66].

<b>Polimer Matris</b>	<b>Katkı 1</b>	<b>Katkı 2</b>
Poliamid	h-BN	Farklı büyüklükte h-BN
Epoksi	Düzensiz şekilli Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Düzensiz şekilli SiO <sub>2</sub>
Polifenilin Sülfür	h-BN	Karbon fiber
Polifenilin Sülfür	h-BN	CNT
Düşük Yoğunluklu Polietilen	Boşluklu cam mikroküreler	Küçük boyutlu nitrit partikülleri
Epoksi	AlN	CNT
Epoksi	Nano boyut SiC	CNT
Poliamid 6	Grafit	Karbon fiber
Epoksi	Grafen	BN
Epoksi	Nano levha şekilli grafit	SiC mikro partikülleri

### 3.2 Polimer Kompozit Özelliklerini Etkileyen Parametreler

#### 3.2.1 Katkı boyutunun etkisi

Katkıların paketleme yoğunluğunun optimize edilmesi için, katkıların aynı şekil tipinde fakat farklı boyutlarda karıştırılması kullanılabilir (Şekil 3.7). Epoksi matris içerisinde büyük partiküllerden oluşan BN (0,4 µm) ve küçük partiküllerden oluşan BN (0,2 µm) karışımında, aynı hacimsel katkı oranında (5 vol %), tek parçacık büyüklüğüne göre daha yüksek bir termal iletkenliğe ulaşılmıştır. Farklı katkı boyutlarındaki karışımın termal iletkenlik değeri ~13,5 W/(m.K) olarak elde edilirlen, aynı katkı boyutlarındaki karışımın termal iletkenlik değeri ~10,5 W/(m.K) olarak elde edilmektedir [67]. Başka bir çalışmada 2 µm büyüklüğündeki küçük AlN ve 30 µm büyüklüğündeki büyük AlN parçacıkları içeren epoksi/AlN hibrit polimer kompoziti hazırlanmıştır. Hazırlanan hibrit kompozitin akışkanlık ve termal iletkenlik değerleri tek parçacık büyüklüğü (12 µm AlN) içeren kompozite göre artış göstermektedir. Farklı ve tek parçacık büyüklüğü içeren epoksi/AlN polimer kompozitin termal iletkenlik değerleri sırasıyla ~5,2 ve ~1,2 W/(m.K) olarak elde edilmektedir [68].



**Şekil 3.7:** Yapı içerisinde farklı büyüklükteki katkıların termal iletkenliğe olan etkisi [69].

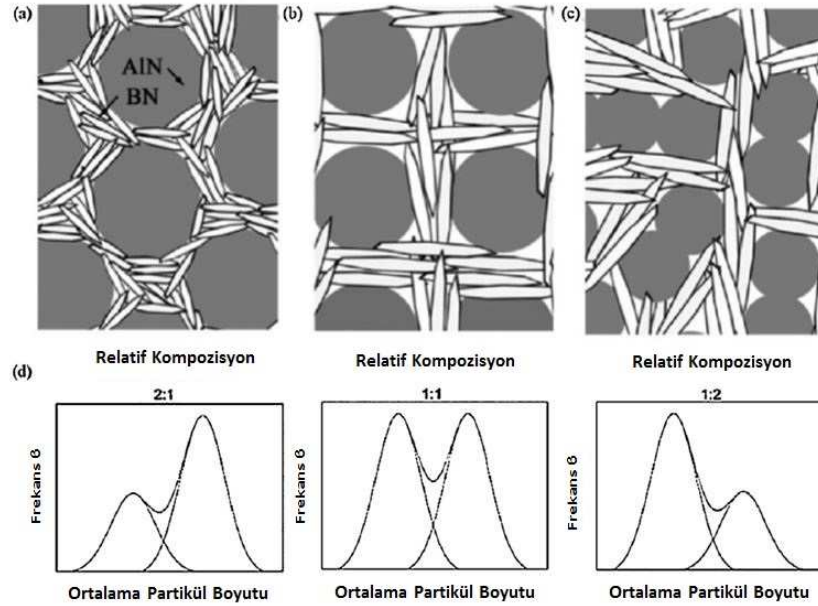
### 3.2.2 Katkı şeklinin etkisi

Termal iletkenliği iyileştirmek için aynı tipte fakat farklı şekil ve büyüklükte katkıları kullanılabilir. Büyük levha şekilli katkıları, pozitif etki elde etmek için daha küçük küresel katkıları ile birleştirilmiştir. Eriyik harmanlama işleminde polifenilen sülfür (PPS)' e küresel BN aglomeraları ve levha şekilli BN eklenilmiştir. Daha küçük olan küresel BN, polimer matrisi içerisinde geçerek ara bağlantı oluşturmak için daha büyük levha şekilli BN' lerin aralarına girmektedir ve kompozitin efektif termal iletkenliğini arttırmaktadır. Hacimsel olarak %33,3 oranında katkı içeren hibrit şekilli PPS/BN polimer kompozitin termal iletkenlik değeri 2,04 W/m.K olarak elde edilirken, aynı katkı oranında tek tip küresel ve tek tip levha şekilli katkı içeren PPS/BN polimer kompozitlerin termal iletkenlik değerleri sırasıyla 1,77 ve 1,55 W/m.K olarak elde edilmektedir [70].

### 3.2.3 Katkı türünün etkisi

Yüksek termal iletkenlik, işlenebilirlik ve diğer özellikleri elde etmek için farklı türlerde katkıları birleştirilebilir. Hibrit parçacıklar genellikle farklı şekillere ve boyutlara sahiptir. Polimer matrisine düzensiz şekilli alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ve AlN' ün farklı boyutlarda bir kombinasyonu eklenmiştir. Küçük boyutlu  $Al_2O_3$  ile büyük boyutlu AlN ve küçük boyutlu AlN ile büyük boyutlu  $Al_2O_3$  karışımı hibrit sistemleri incelenmiştir. Toplam katkı oranı hacimce %58,4 ve hacimce büyük partiküllerin küçük partiküllere oranı 7/3 olan sistemlerde sırasıyla maksimum 3,402 W/m.K ve 2,842 W/m.K termal iletkenlik değeri elde edilmiştir [69].

Poligonal AlN ve levha şekilli BN karışımı, optimum termal iletkenliği elde etmek için epoksi matrisine eklenmiştir [61]. Paketleme verimliliğinin, iki katkı partikülünün çap oranı ile yakından ilişkili olduğu bulunmuştur. AlN/BN hibrit kompozit sistemlerinin optimum şekli ve bileşimi tartışılmıştır (Şekil 3.8). Benzer partikül büyüklüğüne sahip ve iki partikülün hacim oranı 1/1 olan AlN/BN hibrit sisteminde, 8,0 W/(m.K) değerine kadar maksimum termal iletkenlik elde edilmiştir.



**Şekil 3.8:** AlN/BN hibrit kompozit sisteminde optimum şekil ve bileşim çalışmaları [61].

Literatürde PA6 polimerine hegzagonal bor nitrür (h-BN) (10 vol%) ve h-BN (10 vol%)/karbon fiber (CF) (10 vol%) katkıları eklenerek termal iletkenlik değerleri sırasıyla 0,67 ve 0,96 W/(m.K) olarak elde edilmiştir [71].

Bir diğer çalışmada iki farklı PA6/BN polimer kompozitleri erime yöntemi ve çözelti yöntemi ile hazırlanmıştır. İki farklı yöntemle hazırlanan kompozitlerin termal iletkenliğinin katkı oranı arttıkça arttığı gözlenmiştir. Erime yöntemiyle hazırlanan ağırlıkça %40 BN içeren PA6/BN polimer kompozitin termal iletkenlik değeri 1,02 W/(m.K), çözelti yöntemiyle aynı katkı oranında hazırlanan PA6/BN polimer kompozitin termal iletkenlik değeri 1,44 W/(m.K) olarak elde edilmiştir [72].

Literatürde alüminyum nitrür (AlN) katkılı PA6 ile yapılan çalışmalara rastlanmamıştır. BN katkılı PA6 ile yapılan çalışmalar da sınırlı sayıdadır.

## 4. MALZEME VE YÖNTEM

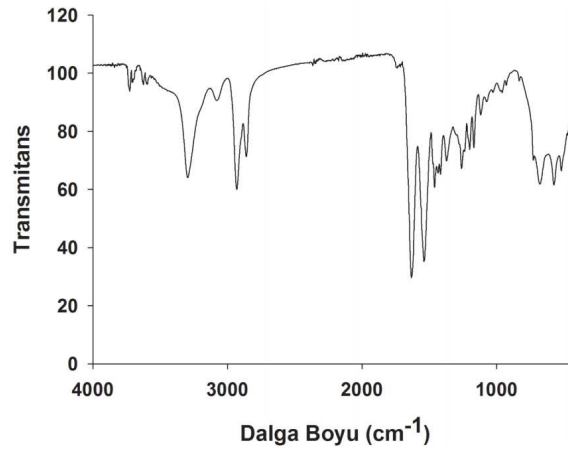
### 4.1 Malzemeler

Bu çalışmada EUROTEC firmasından katkısız, şeffaf renkli PA6 (Tecomid® NB40 NL E) temin edilmiştir. Kullanılan PA6' nın firma tarafından elde edilen özellikleri Çizelge 2' de belirtilmiştir.

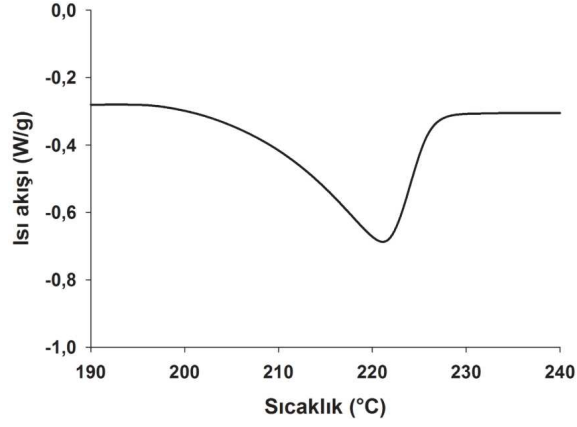
**Çizelge 4.1:** PA6 (Tecomid® NB40 NL E)' nin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri.

Özellik	DeneySEL Parametreler	Değer	Birim	Standart
Yoğunluk	-	1,13	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Çekme oranı	Paralel / Normal	1,2 / 1,2	%	Eurotec
Nem absorpsiyonu	%50 RH, 23° C	3	%	ISO 62
Kopma gerilimi	+ 23° C	80	MPa	ISO 527
Uzama gerilimi	+ 23° C	> 50	%	ISO 527
Çekme modülü	+ 23° C	3000	MPa	ISO 527
Akma dayanımı	+ 23° C	75	MPa	ISO 527
Erime sıcaklığı	10 K/dk	223	°C	ISO 11357
Isıl bozunma sıcaklığı	0,45 MPa	180	°C	ISO 75
Isıl bozunma sıcaklığı	1,8 MPa	65	°C	ISO 75

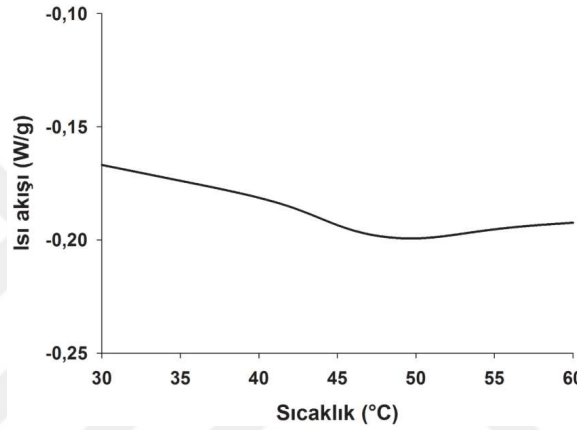
Bu çalışmada kullanılan saf PA6' nın fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiz sonuçları Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3' te gösterilmektedir.



**Şekil 4.1:** PA6' nın FTIR spektrumu.



**Şekil 4.2:** PA6' nın DSC analiz sonucu, erime noktası (Tm).



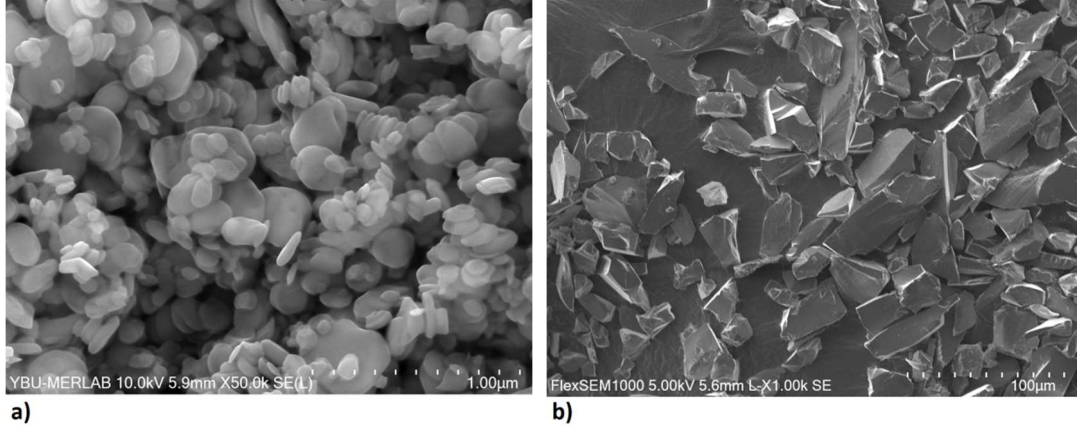
**Şekil 4.3:** PA6' nın DSC analiz sonucu, camısı geçiş sıcaklığı (Tg).

PA6' nın FTIR analizi sonuçları incelendiğinde PA6' nın karakteristik pikleri gözlemlenmektedir. 3301.81  $\text{cm}^{-1}$ ' deki geniş bant genellikle birincil amin içerisindeki N-H bükülme titreşimine işaret etmektedir. 2930.31 ve 2861.84  $\text{cm}^{-1}$ ' deki iki bant, etilen dizisinin CH gerilmesini göstermektedir. 1645.95  $\text{cm}^{-1}$ 'deki bant ise C=O amid I gerilmesini ve 1551.45  $\text{cm}^{-1}$ ' deki bant N-H ve C-N amid II kombinasyonunun gerilmesini göstermektedir [76].

PA6' nın DSC analizi sonucunda erime noktası 223 °C ve camısı geçiş sıcaklığı 47 °C olarak elde edilmiştir.

Katkı malzemeleri olarak BORTEK firmasından yüksek saflıkta nanopartikül (yoğunluk: 2,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) h-BN ve NANOKAR firmasından yüksek saflıkta (yoğunluk: 3.26  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) AlN temin edilmiştir. Temin edilen h-BN ve AlN malzemelerinin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.4' de gösterilmiştir. Mikro yapı görüntüleri üzerinden imageJ yazılımı kullanılarak ortalama 100 partikül üzerinden kalınlık, çap ve

uzunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Partikül kalınlığı ölçüm sonuçları Çizelge 4.2’ de belirtilmiştir.

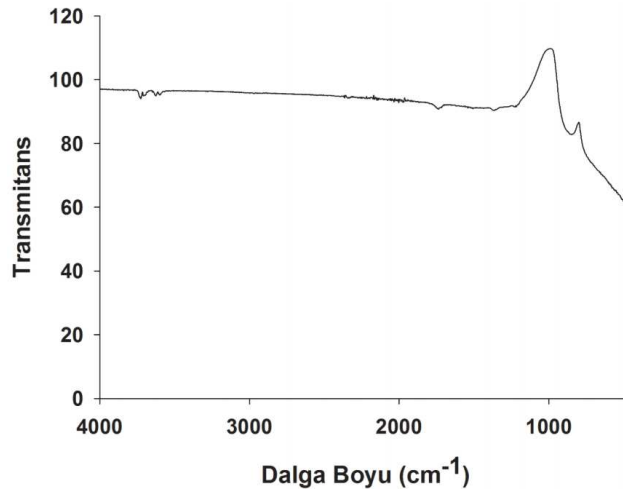


Şekil 4.4: h-BN ve AlN malzemelerinin mikroyapı görüntüleri; a) h-BN, b) AlN.

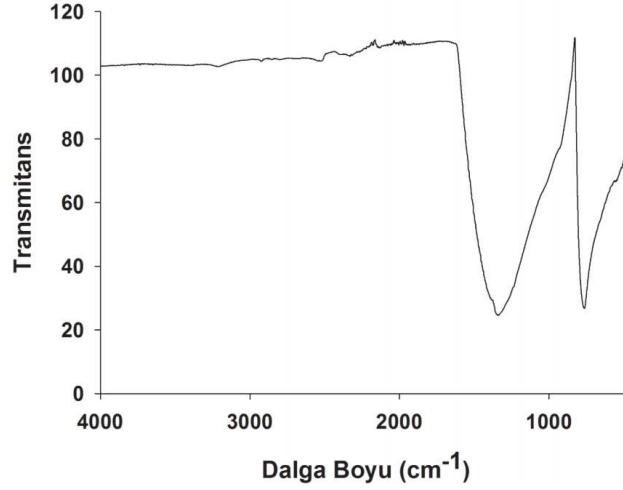
Çizelge 4.2: h-BN ve AlN malzemelerinin ortalama partikül boyutları.

h-BN		AlN	
Ortalama Kalınlık (µm)	Ortalama Çap (µm)	Ortalama Kalınlık (µm)	Ortalama Uzunluk (µm)
0,00755	0,11236	2,30975	23,30123
<b>Standart Sapma</b>			
0,00237	0,05560	3,54057	9,87915

Bu çalışmada kullanılan AlN ve h-BN katkılarının FTIR analiz sonuçları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ da gösterilmektedir.



Şekil 4.5: AlN’ ün FTIR spektrumu.



**Şekil 4.6:** h-BN' ün FTIR spektrumu.

AlN' ün FTIR spektrumu (Şekil 4.5) incelendiğinde Al-N gerilim titreşimini temsil eden pikler 200 ile 1000  $\text{cm}^{-1}$  bant aralığında gözlemlenmektedir [83].

BN' ün FTIR spektrumu (Şekil 4.6) incelendiğinde 1387  $\text{cm}^{-1}$ ' deki pik B-N gerilim titreşimini, 809  $\text{cm}^{-1}$ ' deki pik B-N-B gerilim titreşimini temsil etmektedir [77-81].

Polimer ana matrisi olarak PA6, katkı olarak AlN ve BN kullanılarak Çizelge 4.3' te belirtilen kompozisyonlar hazırlanmıştır. PA6/AlN/BN karışımları hazırlanmadan önce polimer, etüvde 80 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca bekletilerek nem giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, katkıları da kullanılmadan önce etüvde 80 °C sıcaklıkta 8 saat boyunca bekletilmişlerdir.

**Çizelge 4.3:** PA6/AlN/BN karışımlarda kullanılan ana matris ve katkı miktarları.

Kompozisyon Malzeme miktarı (g)	PA 6 + 0 vol % AlN/BN	PA 6 + 10 vol % AlN/BN	PA 6 + 30 vol % AlN/BN	PA 6 + 50 vol % AlN/BN
	PA 6	200	200	200
AlN	0	28,52	85,57	142,62
h-BN	0	18,37	55,12	91,87

Literatürde yapılan çalışmalarda [61] en yüksek termal iletkenlik değeri hacimsel olarak 1/1 oranında AlN ve BN kullanılarak elde edildiği için bu çalışmada da hacimsel olarak 1/1 oranında AlN/BN katkılı hibrit polimer kompozitler toplamda %0, %10, %30 ve %50 katkı oranlarında hazırlanmıştır.

## 4.2 Polimer Kompozit Üretim Yöntemleri

### 4.2.1 Ekstrüzyon yöntemi ile PA6/AIN/BN hibrit polimer kompozit üretimi

Hibrit polimer kompozitlerin üretimi sırasında katkıların matris içerisinde homojen bir şekilde dağılabilmesi için hazırlanan kompozisyonlar çift vidalı ekstrüder (Polmak Plastik Lab. Ekstrüder 18 mm) kullanılarak karıştırılmıştır. Sonrasında, ekstrüderden çıkan sıcak filament oda sıcaklığındaki su havuzunda soğutulmuştur (Şekil 4.7). Son aşamada, soğutulmuş filament kırıcı ile granül haline getirilmiştir (Şekil 4.8). Proses sırasında kullanılan parametreler Çizelge 4.4 ve 4.5’ te belirtilmiştir.



Şekil 4.7 : Ekstrüzyon cihazı



Şekil 4.8 : Kırıcı cihazı



**Çizelge 4.4:** Ekstrüzyon prosesinde sıcaklıklar.

Sıcaklıklar										
Bölge 1 (°C)	Bölge 2 (°C)	Bölge 3 (°C)	Bölge 4 (°C)	Bölge 5 (°C)	Bölge 6 (°C)	Bölge 7 (°C)	Bölge 8 (°C)	Bölge 9 (°C)	Kafa (°C)	Eriyik sıcaklığı (°C)
90	210	215	220	225	230	230	230	230	220	253

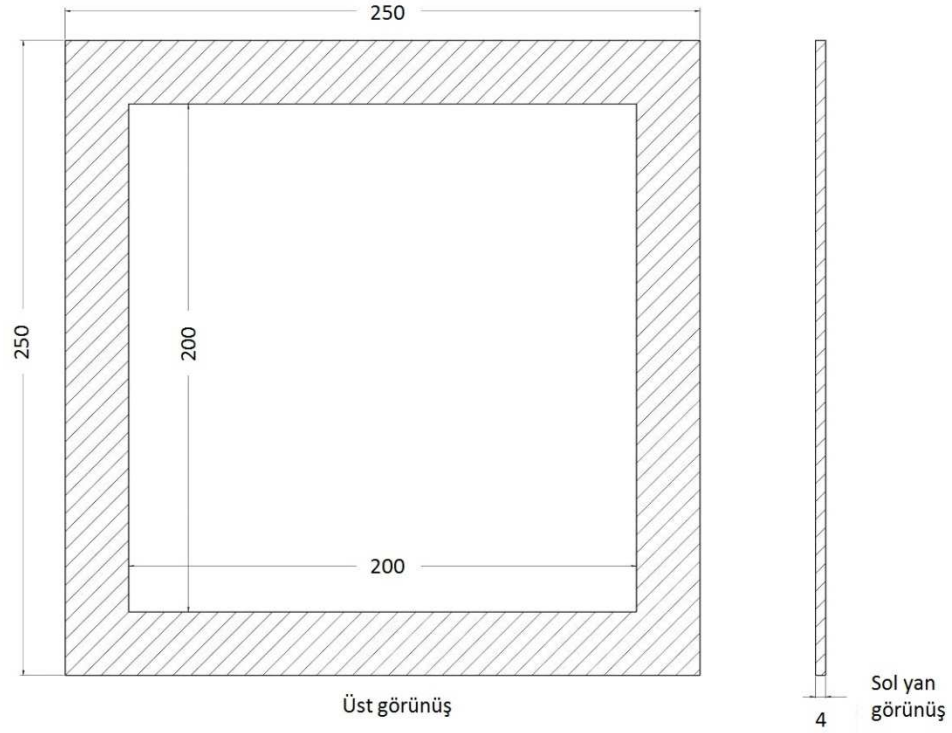
**Çizelge 4.5:** Ekstrüzyon prosesinde basınç ve hız parametreleri.

Besleme hızı (rpm)	Vida hızı (rpm)	Vida torku (%)	Basınç (bar)	Kırıcı hızı (rpm)
4	40	30	5,5	60

Ekstrüzyon proses sıcaklıkları, çalışmada kullanılan saf PA6' nın DSC analizi sonucunda elde edilen erime sıcaklığına (223 °C) göre belirlenmiştir. Vida torku, vidanın hızına bağlıdır. Vida hızı arttıkça vida torku da artmaktadır. Vida hızı, vida torku maksimum %30 olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan ekstrüderin kritik en yüksek tork değeri %40' dır. %40 değerinden sonra vidayı döndüren motorun üzerine aşırı bir yük bindiği için ekstrüder cihazı otomatik olarak moturu durdurarak sistemi güvenliğe almaktadır. Kırıcı hızı ekstrüderden çıkan filamentin yatay düzlemde hareket hızına göre belirlenmiştir.

#### **4.2.2 Basınçlı kalıplama yöntemi ile PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozit plakaların üretimi**

Bu çalışmada kullanılan PA6/AlN/BN granülleri önceden etüvde 80 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca nem giderme amaçlı bekletilmiştir. Ekstrüzyon prosesi sonrasında granül hale getirilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin karakterizasyonu için basınçlı kalıplama yöntemi ile 200x200x4 mm ve 200x200x0,5 mm boyutlarında plakalar üretilmiştir. 200x200x4 mm ölçülerine sahip plakalar için Şekil 4.9' da belirtilen kalıp kullanılmıştır. 200x200x0,5 mm ölçülerine sahip plakalar için kalıp kullanılmamıştır.



**Şekil 4.9:** 200x200x4 mm plaka kalıbının 2 boyutlu çizimi.

Proses sırasında CARVER 12-12 basınçlı kalıplama cihazının (Şekil 4.10) üst ve alt plakalarına teflon filmler eklenerek granüllerin sıcak plakalara yapışması önlenmiştir. Basınçlı kalıplama proses parametreleri Çizelge 4.6 ve 4.7’ de belirtilmiştir.



**Şekil 4.10:** Basınçlı kalıplama cihazı.

**Çizelge 4.6:** 200x200x4 mm plaka için basınçlı kalıplama proses parametreleri.

Kompozisyon Parametreler	PA 6 + 0 vol	PA 6 + 10 vol	PA 6 + 30 vol	PA 6 + 50 vol
	% AlN/BN	% AlN/BN	% AlN/BN	% AlN/BN
Plaka sıcaklıkları (°C)	240	242	246	250
Basınç öncesi bekleme süresi (dk)	1	1	1	1
Uygulanan basınç (ton)	3	3	3	3
Basınç süresi (dk)	3	3	3	3
Gaz uzaklaştırma sayısı (adet) / Gaz uzaklaştırma süresi (s)	3 / 2	3 / 2	3 / 2	3 / 2
Soğutma sıcaklığı (°C' ye kadar)	150	150	150	150
Granül miktarı (g)	178	178	178	178

**Çizelge 4.7:** 200x200x0,5 mm plaka için basınçlı kalıplama proses parametreleri.

Kompozisyon Parametreler	PA 6 + 0 vol	PA 6 + 10 vol	PA 6 + 30 vol	PA 6 + 50 vol
	% AlN/BN	% AlN/BN	% AlN/BN	% AlN/BN
Plaka sıcaklıkları (°C)	240	242	246	250
Basınç öncesi bekleme süresi (dk)	1	1	1	1
Uygulanan basınç (ton)	1	1	1	1
Basınç süresi (dk)	3	3	3	3
Gaz uzaklaştırma sayısı (adet) / Gaz uzaklaştırma süresi (s)	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0
Soğutma sıcaklığı (°C' ye kadar)	150	150	150	150
Granül miktarı (g)	30	30	30	30

Basınçlı kalıplama prosesinde plaka sıcaklıkları, kullanılan malzemenin erime sıcaklığının yaklaşık olarak 10 ila 20 °C üzerinde belirlenmektedir. Bunun sebebi, proses sırasında malzemenin akışkanlığını en yüksek seviyede tutulmasının gerekmesidir. Basınç altında eriyik malzemenin kalıbın tüm bölgelerine ulaşabilmesi

için akışkanlığının yüksek seviyede olması gerekmektedir. Bu nedenle, çalışmada katkısız PA6 için erime sıcaklığının üzerinde olan 240 °C plaka sıcaklıkları belirlenmiştir. Katkılar genellikle çekirdeklenme ajanı olarak davranarak yeni kristal bölgelerin büyümesine sebep olmaktadır ve polimerin erime sıcaklığını arttırmaktadır [73]. Hacimce %10, %30 ve %50 katkılı PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitleri için plaka sıcaklıkları kademeli olarak arttırılarak sırasıyla 242, 246 ve 250 °C olarak belirlenmiştir.

Basınçlı kalıplama prosesinde yeterli basınç sağlanmadığı durumlarda eriyik malzeme kalıbın tüm bölgelerine ulaşamamaktadır. Çalışma sırasında 0,5 bar basınç değeri ile başlandı ve basınç, kademeli olarak 0,5 bar arttırılarak ideal basınç elde edilene kadar denemeler yapılmıştır.

Presin plaka sıcaklıkları ayarlanan değerlere geldiğinde 200x200x4 mm ölçülerindeki plakalar için sırasıyla teflon film-kalıp-granüller (kalıbın içinde)-teflon film kombinasyonu yapılarak bu kombinasyon basınçlı kalıplama cihazının alt plakasına yerleştirilmiştir. 200x200x0,5 mm ölçülerindeki plakalar için kombinasyon, teflon film-granüller-teflon film şeklinde uygulanmıştır. Ardından granüllerin basınç uygulamasından önce eriyik hale getirilmesi ve basınç altında homojen bir şekilde dağılım gösterebilmesi için 1 dk boyunca basınç verilmeden tablalar kapatılarak granüllerin eriyik hale geçmesi beklenmiştir. Granüller 1 dk sonrasında eriyik hale geldiğinde basınç 3 ton' a çıkartılarak proses başlatılmıştır.

Basınçlı kalıplama prosesi ile elde edilen plakalar üzerinden, karakterizasyon metodlarına uygun ölçülerde numuneler kesilerek testler için hazırlanmıştır.

### **4.3 Karakterizasyon Yöntemleri**

#### **4.3.1 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi**

DSC analizi için basınçlı kalıplama prosesinde elde edilen 200x200x0,5 mm boyutlarındaki plakalar üzerinden numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, TA Instrument DSC25 (Şekil 4.11) cihazında 30 °C başlangıç sıcaklığı ve 10 °C/dk ısıtma oranı parametreleri kullanılarak 300 °C' ye kadar ısıtılmıştır.



**Şekil 4.11:** Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçüm cihazı.

#### **4.3.2 PA6/AIN/BN hibrit polimer kompozitlerin fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi**

FTIR analizi için basınçlı kalıplama prosesinde elde edilen 200x200x0,5 mm boyutlarındaki plakalar üzerinden 5x5x0,5 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, Nicolet 1550 (Şekil 4.12) cihazında analiz edilmiştir. Ölçüm sırasında tarama sayısı 16 ve çözünürlük 4 olarak ayarlanmıştır.



**Şekil 4.12 :** Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi ölçüm cihazı

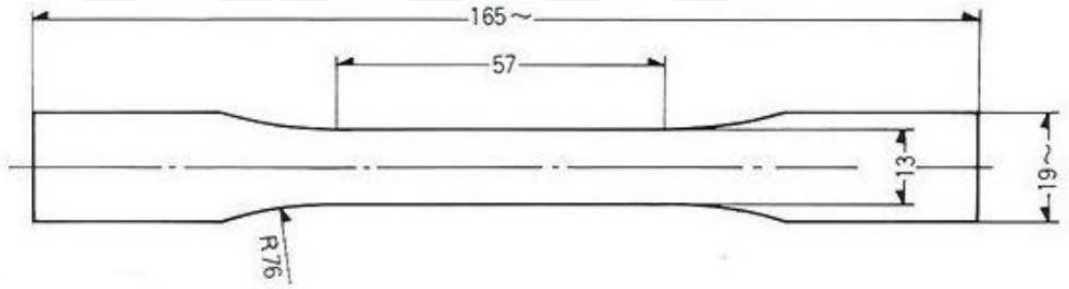
#### **4.3.3 PA6/AIN/BN hibrit polimer kompozitlerin termal iletkenlik özelliklerinin incelenmesi**

Termal iletkenlik, bir malzeme boyunca ısı akışının ölçüsüdür. Basınçlı kalıplama prosesi ile elde edilen plakalar üzerinden, 25x25x4 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin termal iletkenlik ölçümleri C-Therm Technologies

marka TH89-05-00400 model cihaz ile yapılmıştır. Farklı oranlarda hazırlanmış olan PA6/AlN/BN numunelerin termal iletkenlik ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

#### 4.3.4 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

Basıncı kalıplama prosesi ile elde edilen plakalar üzerinden, ASTM D638 standardına göre Şekil 4.13' te belirtilen ölçülerde çekme testi için kaşık numuneler kesilmiştir. Her PA6/AlN/BN karışımı için 5 adet numune hazırlanmıştır ve Shimadzu AGS-X cihazında bu numunelere 5 mm/dk hızda ve 10 kN kapasiteli yük hücresi kullanılarak çekme testi gerçekleştirilmiştir. Bu test sonucunda her numunenin çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve akma sınırındaki uzama değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 : ASTM D638 standardında bulunan Type I çekme testi numune boyutları

#### 4.3.5 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin elektriksel iletkenlik özelliklerinin incelenmesi

Basıncı kalıplama prosesi ile elde edilen PA6/AlN/BN plakalar kullanılarak 90x90x0,5 mm ölçülerinde numuneler kesilmiştir. Her kompozisyondan 3 adet numunenin, Keithley 6517-B multimetre ile beraber 8009 özdirenç test cihazı (Şekil 4.14) kullanılarak numunelerin elektriksel özdirenç değerleri megaohm (MΩ) biriminde elde edilmiştir. Daha sonra elektriksel iletkenlik değerleri aşağıdaki formül (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = L / (R.A) \quad (4.1)$$

$\sigma$ : Elektriksel iletkenlik (S/m), L: Numune kalınlığı (m), R: Elektriksel özdirenç (MΩ), A: Numune üzerinde ölçüm yapılan bölgenin yüzey alanı (m<sup>2</sup>)



**Şekil 4.14:** Elektriksel özdirenç ölçüm cihazı.

#### **4.3.6 PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin mikroyapı analizi**

Basınçlı kalıplama prosesi ile elde edilen 200x200x4 mm PA6/AlN/BN plakalar kırılarak kesit alanından SEM tekniği kullanılarak mikroyapı analizleri yapılmıştır. Analizlerde Carl Zeiss marka, Gemini 300 model cihazı kullanılmıştır. Analiz sırasında kullanılan parametreler aşağıda belirtilmiştir.

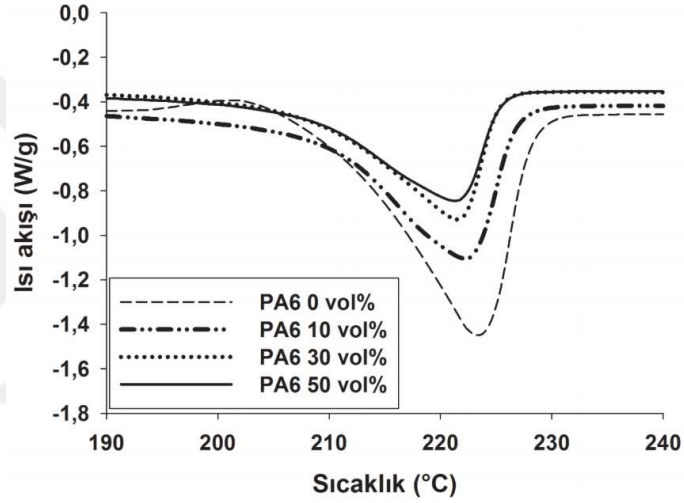
- Sinyal: SE (secondary electron)
- Voltaj değeri: 5 kV
- Büyütme: 10000 X ve 20000 X

Ölçüm gerçekleşmeden önce numunelerin yüzeyi altın/paladyum karışımı ile kaplanmıştır.

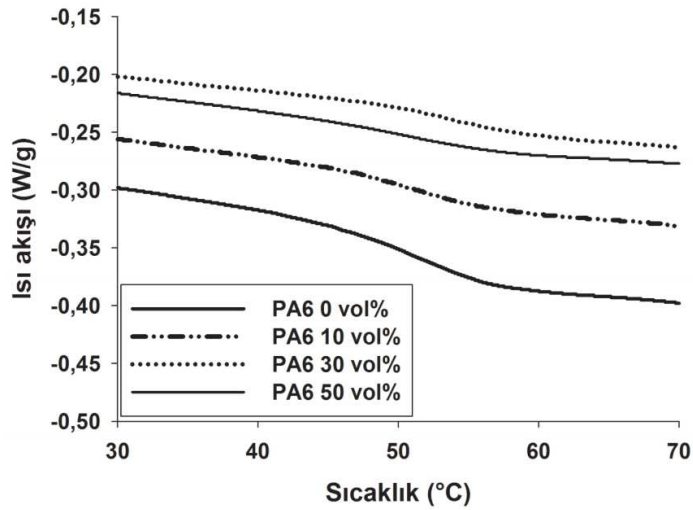
## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 5.1 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Sonuçları

Hacimsel olarak farklı katkı miktarları içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitinin DSC analiz sonuçları Şekil 5.1 ve 5.2’ te gösterilmektedir. Analizler sonucunda elde edilen erime ve camsı geçiş sıcaklıkları Çizelge 5.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.1: PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin DSC analiz sonucu, erime noktası (T<sub>m</sub>).



Şekil 5.2: PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin DSC analiz sonucu, camsı geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>).



**Çizelge 5.1:** PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin erime ve camsı geçiş sıcaklıkları.

Parametre	Kompozisyon			
	PA 6 + 0 vol % AlN/BN	PA 6 + 10 vol % AlN/BN	PA 6 + 30 vol % AlN/BN	PA 6 + 50 vol % AlN/BN
Erime sıcaklığı (°C)	223,39	222,25	221,46	221,31
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	51,00	51,16	53,79	51,08

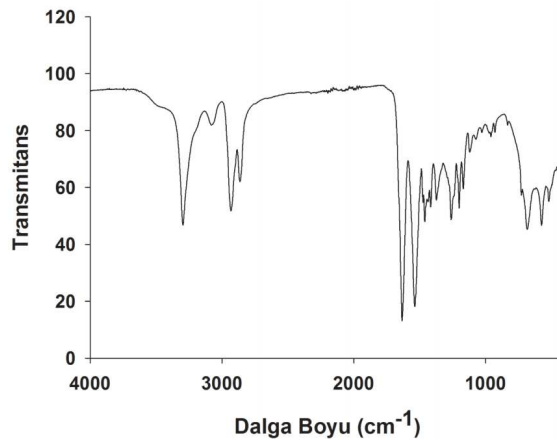
Şekil 5.1, Şelil 5.2 ve Çizelge 5.1’ de görüldüğü üzere, tüm kompozitler belirgin bir şekilde 220 °C civarında bir erime noktası göstermektedir. Yaklaşık 220 °C’ deki erime sıcaklığı, PA6’ nın  $\alpha$  form kristallerinin erime sıcaklığına eşit olduğunun göstergesidir [77].

BN ve AlN partiküllerinin oluşturduğu çekirdeklenme noktaları, PA6’ nın termodinamik olarak stabil  $\alpha$  kristal fazının oluşumunu sağlamaktadır. Ayrıca, PA6/AlN/BN kompozitlerin erime eğrilerinde (Şekil 5.1), 215 °C’ deki grafiklerin başlangıç noktalarında yumuşak geçişler gözlemlenmektedir. Bu durum, AlN ve BN katkılarının PA6’ nın  $\gamma$  kristal fazının oluşumunun engellediğini göstermektedir.

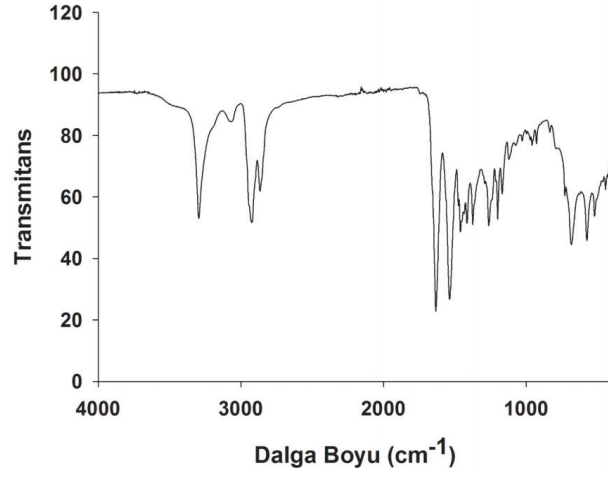
Son olarak, PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin DSC analiz sonuçları, bu kompozitlerin erime ve camsı geçiş sıcaklıklarının BN ve AlN katkılarının varlığından etkilenmedikleri görülmektedir (Çizelge 5.1).

## 5.2 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopi Sonuçları

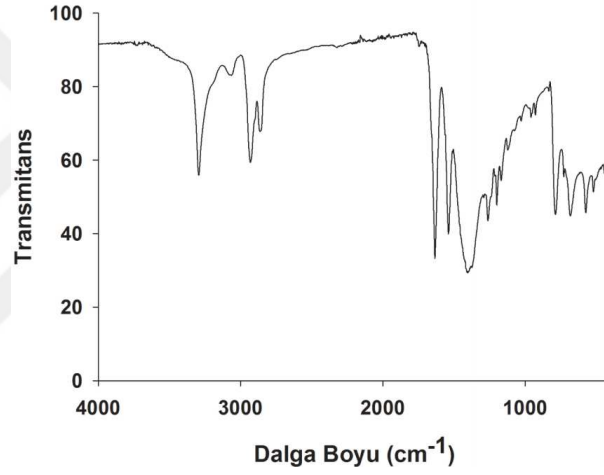
Hacimsel olarak farklı katkı miktarları içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitin FTIR analizi sonuçları Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’ da gösterilmektedir.



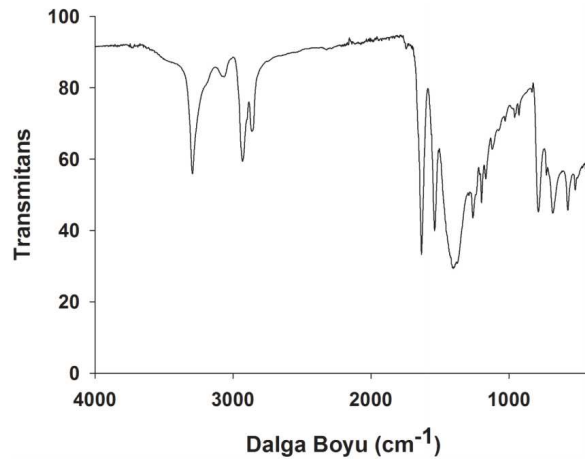
**Şekil 5.3:** Katkısız PA6’ nın FTIR spektrumu.



**Şekil 5.4:** Hacimsel olarak %10 katkı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitin FTIR spektrumu.



**Şekil 5.5:** Hacimsel olarak %30 katkı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitin FTIR spektrumu.

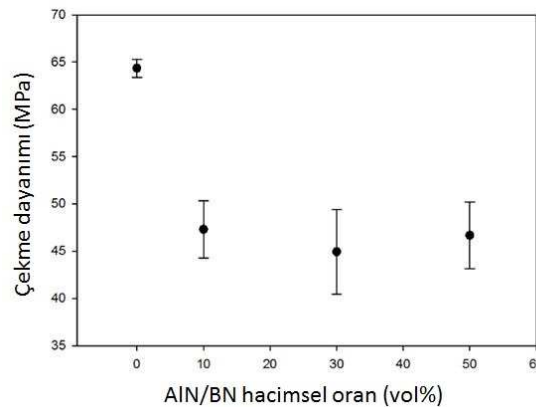


**Şekil 5.6:** Hacimsel olarak %50 katkı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitin FTIR spektrumu.

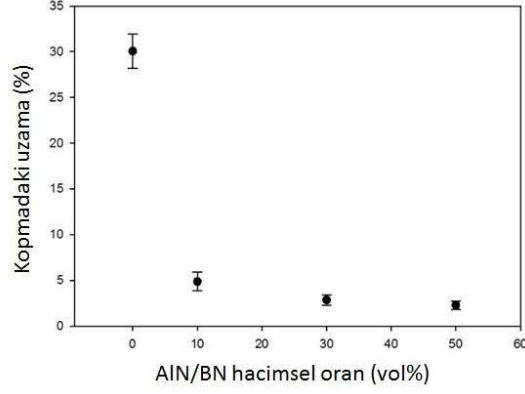
Hacimsel olarak farklı katkı miktarları içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde PA6' nın yapısı açıkça gözlemlenmektedir. 3301.81  $\text{cm}^{-1}$ ' deki geniş bant genellikle birincil amin içerisindeki N-H bükülme titreşimine işaret etmektedir. 2930.31 ve 2861.84  $\text{cm}^{-1}$ ' deki iki bant, etilen dizisinin CH gerilmesini göstermektedir. 1645.95  $\text{cm}^{-1}$ 'deki bantta C=O amid I gerilmesi ve 1551.45  $\text{cm}^{-1}$ ' deki bantta N-H ve C-N amid II kombinasyonunun gerilmesi gözlemlenmektedir [60]. FTIR analiz sonuçlarına göre hacimsel olarak farklı katkı miktarları içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitlerde BN yapısı gözlemlenmektedir. 1387  $\text{cm}^{-1}$ ' deki pik B-N gerilim titreşimini, 809  $\text{cm}^{-1}$ ' deki pik B-N-B gerilim titreşimini temsil etmektedir [78-82]. Ayrıca 200 ile 1000  $\text{cm}^{-1}$  bant aralığında Al-N gerilim titreşimini temsil eden pikler gözlemlenmektedir [83].

### 5.3 Mekanik Özelliklerinin Analiz Sonuçları

PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitler için elde edilen çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve akma sırasındaki uzama sonuçları Çizelge 5.2' de belirtilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8' de PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin çekme dayanımı ve kopmadaki uzama değerlerinin katkı oranlarına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. En yüksek mekanik özellik değerleri katkısız PA6 için elde edilmiştir. Çekme dayanımı değerinde, yapıya katkı eklendiğinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Katkı oranının artışı, çekme dayanımı değerinde belirgin bir değişiklik yaratmamıştır. Kopma uzaması değerinde, yapıya katkı eklendiğinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Katkı oranı arttıkça kopma uzaması değeri düşmektedir.



**Şekil 5.7:** Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin çekme dayanımı sonuçları.



**Şekil 5.8:** Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin kopmadaki uzama sonuçları.

**Çizelge 5.2:** PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin mekanik özellik sonuçları.

Parametre	Numune No	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Akma Sınırındaki Uzama (%)
PA 6 + 0 vol % AlN/BN	1	64,53	58,17	32,02	7,22
	2	64,88	61,04	29,87	7,59
	3	65,14	63,97	19,61	7,19
	4	62,69	59,14	20,84	7,25
	5	64,51	59,78	28,31	8,33
	Ortalama	64,35	60,42	26,13	7,516
	Standart sapma	0,79	1,83	4,54	0,39
PA 6 + 10 vol % AlN/BN	1	54,86	55,06	5,50	5,46
	2	53,90	53,97	5,47	5,44
	3	40,40	40,40	3,71	3,71
	4	49,45	49,71	5,47	5,42
	5	45,18	45,18	3,83	3,83
	Ortalama	49,83	50,98	4,62	4,77
	Standart sapma	3,43	3,49	0,76	0,75
PA 6 + 30 vol % AlN/BN	1	41,77	41,77	2,36	2,36
	2	48,12	48,12	3,49	3,49
	3	62,75	62,75	5,15	5,15
	4	50,30	50,30	2,74	2,74
	5	63,54	63,54	4,54	4,54
	Ortalama	51,14	51,14	3,28	3,28
	Standart sapma	8,47	8,47	0,97	0,97
PA 6 + 50 vol % AlN/BN	1	51,79	51,79	2,75	2,75
	2	55,54	55,54	2,67	2,67
	3	41,40	41,40	1,83	1,83
	4	41,56	41,56	1,97	1,97
	5	49,1	49,1	2,22	2,22
	Ortalama	49,50	49,50	2,29	2,29
	Standart sapma	4,58	4,58	0,34	0,34

PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin çekme dayanımı ve kopmadaki uzama değerlerinin katkısız PA6' ya göre düşük olması, polimer matris ile katkı arasındaki zayıf arayüzey enerjisinden kaynaklanmaktadır [74, 84]. Ayrıca, kopmadaki uzama değerindeki düşüşün bir diğer sebebi de AlN ve BN katkılarının PA6 zincirlerinin hareketini kısıtlamasıdır [85].

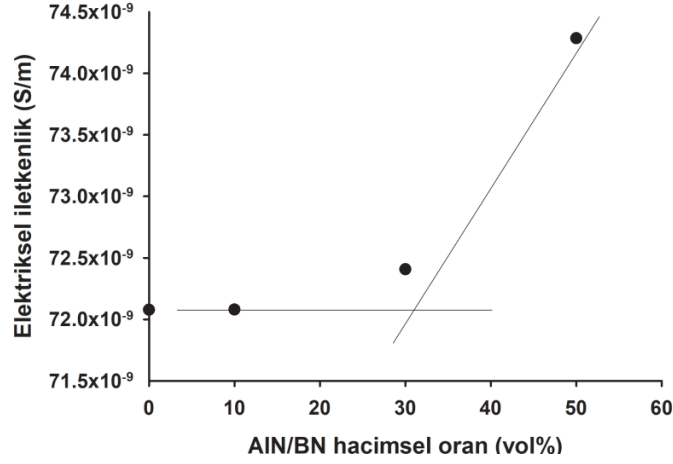
#### 5.4 Elektriksel İletkenlik Özelliklerinin Analiz Sonuçları

PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin elektriksel özellik ölçüm sonuçları Çizelge 5.3' te belirtilmiştir.

**Çizelge 5.3:** PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin elektriksel özellik sonuçları.

Parametre	Numune	Elektriksel Özdirenc (MΩ)	Elektriksel İletkenlik (S/m)
Kompozisyon	1	13390857	$7,468 \times 10^{-8}$
	2	14216429	$7,034 \times 10^{-8}$
	3	14042129	$7,121 \times 10^{-8}$
	Ortalama	13883138	$7,208 \times 10^{-8}$
	Standart sapma	355294,06	$1,873 \times 10^{-9}$
	PA 6 + 0 vol % AlN/BN	1	14207000
2		13667257	$7,317 \times 10^{-8}$
3		13758071	$7,268 \times 10^{-8}$
Ortalama		13877443	$7,210 \times 10^{-8}$
Standart sapma		235963,02	$1,210 \times 10^{-9}$
PA 6 + 10 vol % AlN/BN		1	13935114
	2	13917400	$7,185 \times 10^{-8}$
	3	13585400	$7,361 \times 10^{-8}$
	Ortalama	13812638	$7,241 \times 10^{-8}$
	Standart sapma	160844,19	$7,362 \times 10^{-10}$
	PA 6 + 30 vol % AlN/BN	1	10884601
2		10870742	$7,444 \times 10^{-8}$
3		12147956	$7,534 \times 10^{-8}$
Ortalama		11301100	$7,534 \times 10^{-8}$
Standart sapma		598844,51	$9,310 \times 10^{-10}$
PA 6 + 50 vol % AlN/BN		1	10884601
	2	10870742	$7,444 \times 10^{-8}$
	3	12147956	$7,534 \times 10^{-8}$
	Ortalama	11301100	$7,534 \times 10^{-8}$
	Standart sapma	598844,51	$9,310 \times 10^{-10}$

Şekil 5.9' da PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitleri için elde edilen elektriksel iletkenlik değerlerinin katkı oranına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



**Şekil 5.9:** Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerleri.

PA6 polimerine hacimce %10 oranında katkı eklenildiğinde elektriksel iletkenlik değeri değişmemektedir. Hacimce %30 oranında katkılı kompozitin elektriksel iletkenlik değerinde artış gözlemlenmektedir. Hacimce %30 katkı oranından itibaren elektriksel iletkenlik değerinde hızlı bir artış gözlemlenmiştir ve en yüksek değer hacimce %50 katkılı kompozit için elde edilmiştir.

Şekil 5.9’ daki grafik ile bu kompozitin elektriksel perkolasyon eşiği değeri elde edilebilmektedir. Grafikteki doğrusal çizgilerin kesiştiği nokta perkolasyon eşiği için kritik değerdir. Perkolasyon eşik değerinin altında, sistemde bulunan katkı miktarı aralıksız bir ağ oluşturmak için yeterli değildir. Perkolasyon eşiği değerine ulaşıldığında, hacimce yaklaşık %26,5 oranında AlN ve BN katkıları polimer matris içerisinde aralıksız iletken bir yol oluşturmaktadırlar. Bu yüzden, bu kritik noktadan itibaren elektriksel iletkenlik değeri sert bir şekilde artmaktadır [86-88].

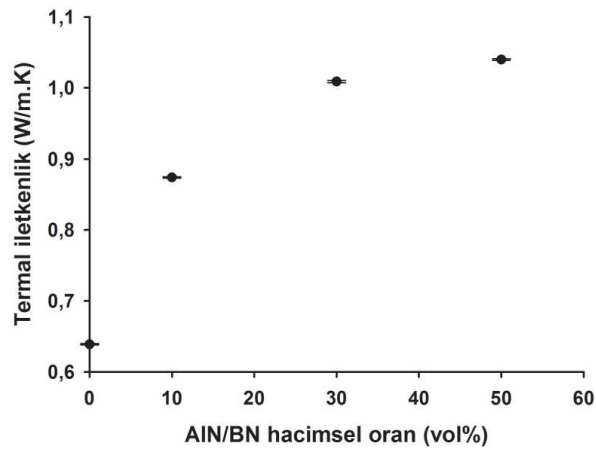
### 5.5 Termal İletkenlik Özelliklerinin Analiz Sonuçları

PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin termal iletkenlik sonuçları Çizelge 5.4’ de belirtilmiştir. Şekil 5.10’ da PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitler için elde edilen termal iletkenlik değerlerinin katkı oranına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Hacimsel katkı oranı arttıkça termal iletkenlik değerinde artış gözlemlenmektedir. Termal iletken ağ oluşturmak için katkı miktarını arttırmak termal iletkenliği önemli ölçüde arttırmaktadır [89-96]. Bu sonuçlara göre hacimce %30 katkı oranına kadar termal iletkenlik değerinde hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Hacimce %30 katkı oranından sonra termal iletkenlik değerindeki artış yavaşlamış ve en yüksek termal

iletkenlik değeri hacimce %50 katkı oranında elde edilmiştir. Termal iletkenlik değerindeki artışın yavaşlayarak stabil hale gelmesinin sebebi, kompozitin hacimce yaklaşık %30 katkı oranında kritik katkı miktarına ulaşmasıdır [97]. Kritik katkı oranından itibaren termal iletken yollar doyma eğilimi göstermektedir [98].

**Çizelge 5.4:** PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin termal iletkenlik değerleri.

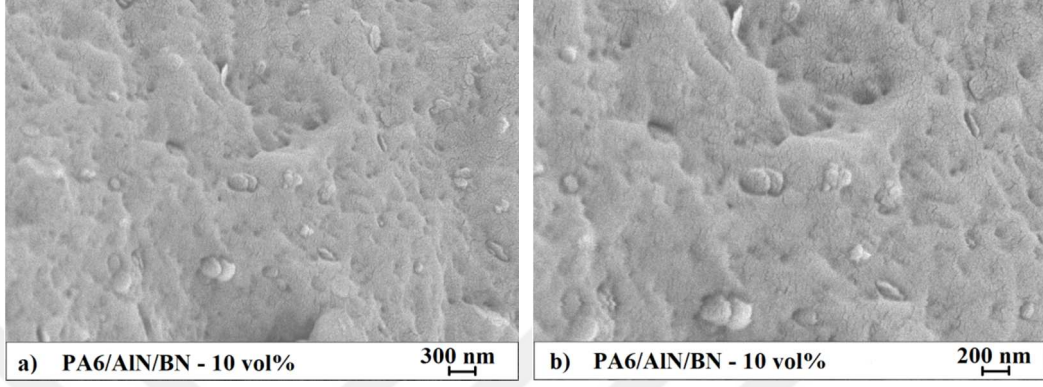
Parametre	Numune	Termal İletkenlik (W/mK)
Kompozisyon	1	0,640
	2	0,639
	3	0,638
	Ortalama	0,639
	Standart sapma	0,001
PA 6 + 0 vol % AlN/BN	1	0,874
	2	0,873
	3	0,875
	Ortalama	0,874
	Standart sapma	0,001
PA 6 + 10 vol % AlN/BN	1	1,008
	2	1,008
	3	1,011
	Ortalama	1,009
	Standart sapma	0,001
PA 6 + 30 vol % AlN/BN	1	1,039
	2	1,041
	3	1,040
	Ortalama	1,040
	Standart sapma	0,001
PA 6 + 50 vol % AlN/BN	1	1,039
	2	1,041
	3	1,040
	Ortalama	1,040
	Standart sapma	0,001



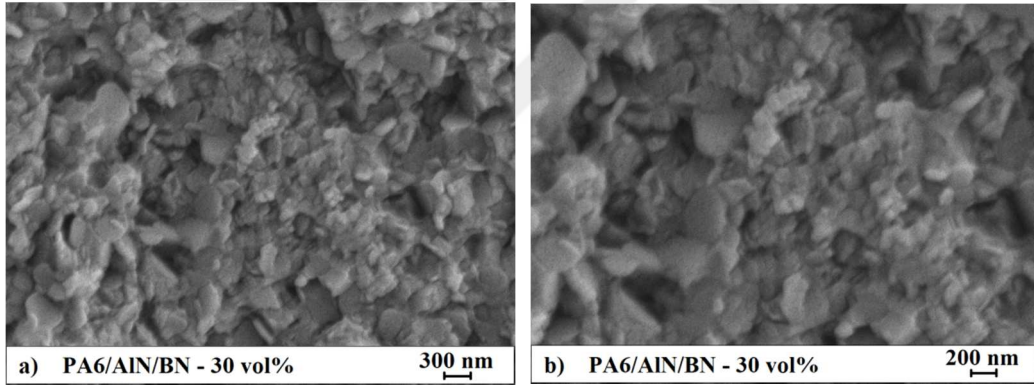
**Şekil 5.10:** Farklı katkı oranları ile elde edilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin termal iletkenlik sonuçları.

## 5.6 Mikroyapı Analiz Sonuçları

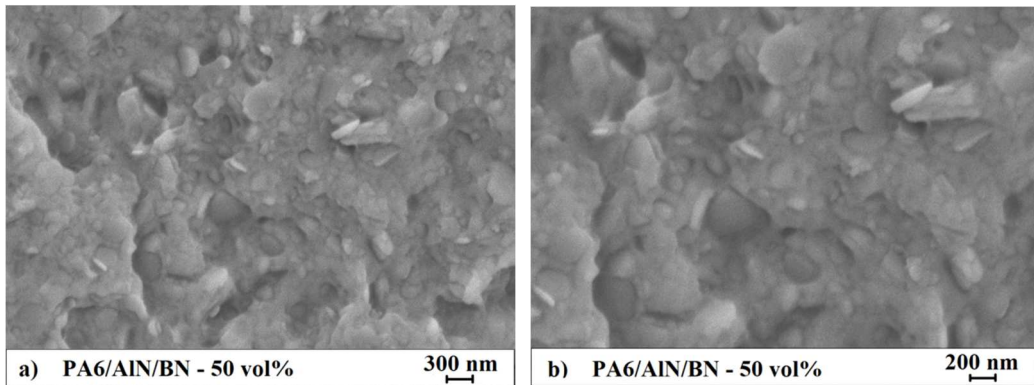
Şekil 5.11, 5.12 ve 5.13, sırasıyla hacimce %10, %30 ve %50 katkı oranlı numuneler için 10000 X ve 20000 X büyütme oranları kullanılarak elde edilen SEM görüntülerini göstermektedir.



**Şekil 5.11:** Hacimce %10 katkı oranlı PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitin mikroyapı görüntüleri; a) 10000 X, b) 20000 X.



**Şekil 5.12:** Hacimce %30 katkı oranlı PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitin mikroyapı görüntüleri; a) 10000 X, b) 20000 X.



**Şekil 5.13:** Hacimce %50 katkı oranlı PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitin mikroyapı görüntüleri; a) 10000 X, b) 20000 X.



Farklı hacimsel katkı oranı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, AlN ve BN katkılarının PA6 matris içerisinde homojen bir dağılıma sahip olduğu ve yüksek katkı oranı (50 vol%) ile üretilen polimer kompozit için de topaklanma davranışı göstermediği görülmektedir [74, 75]. Ayrıca, katkılar ve matris arasında çok az miktarda mikro boşluk ve hava boşlukları görülmektedir. Bu durum, AlN ve BN katkılarının matrisle uyumlu olduğunu, iyi seviyede birbirine yapıştığını ve en uygun karıştırma prosesinin kullanıldığını göstermektedir. Şekil 5.12’ de gösterildiği gibi, kaba ve düzensiz bir termal ve elektriksel iletken ağ veya ısıl/elektriksel akış yolları, hacimce %30 katkı oranlı polimer kompozit için görülmektedir. AlN ve BN partikülleri arasında az miktarda matrisin varlığı, etkili ısıl veya elektriksel akışı engellemektedir. Bununla birlikte, hacimce %50 katkılı sistemde (Şekil 5.13), katkı parçacıklarının kompozit içindeki bağlantıları, AlN ve BN’ ün yüksek oranda eklenmesinden dolayı görsel olarak daha kompakt bir yapı oluşturmaktadır. Bu sayede, birbirine iyi bağlanmış AlN ve BN ısıl/elektriksel iletken ağları etkili bir şekilde oluşturulmuştur. Bu sonuç, termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik ölçümleri ile elde edilen sonuçları iyi bir şekilde desteklemektedir.

## 6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Çalışmada saf PA6 polimerine hacimsel olarak %10, %30 ve %50 oranında AlN/BN karışımı eklenerek ekstrüzyon yöntemiyle homojen olarak karıştırılması sağlanmıştır. Ekstrüzyon ile homojen olarak karışmış PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozit kırıcı ile granül formuna getirilmiştir. Elde edilen granüller kullanılarak basınçlı kalıplama prosesi ile 200x200x4 mm ve 200x200x0,5 mm boyutlarında plakalar üretilmiştir. Bu plakalar üzerinden uygun boyutlarda numuneler kesilerek kompozitlerin mikroyapı, mekanik, termal ve elektriksel iletkenlik özellikleri incelenmiştir.

DSC analizi sonuçları incelendiğinde tüm kompozitlerin belirgin bir şekilde 220 °C civarında bir erime noktasına sahip olduğu görülmektedir. Yaklaşık 220 °C' deki erime sıcaklığı, PA6' nın  $\alpha$  form kristallerinin erime sıcaklığına eşit olduğunun göstergesidir. 215 °C' deki grafiklerin başlangıç noktalarında yumuşak geçişler gözlemlenmesi, AlN ve BN katkılarının PA6' nın  $\gamma$  kristal fazının oluşumunun engellediğini göstermektedir. DSC analiz sonuçlarına göre, PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin erime ve camsı geçiş sıcaklıklarının BN ve AlN katkılarının varlığından etkilenmedikleri görülmektedir.

Farklı hacimsel katkı oranı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin FTIR analizi sonuçlarına göre PA6, AlN ve BN yapıları açıkça gözlemlenmektedir. Polimer kompozit yapısı içerisinde farklı malzeme yapıları gözlemlenmemiştir.

Farklı hacimsel katkı oranı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin mekanik özellikleri incelendiğinde çekme dayanımı değerinde, yapıya katkı eklendiğinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Katkı oranının artışı, çekme dayanımı değerinde belirgin bir değişiklik yaratmamıştır. Kopma uzaması değerinde, yapıya katkı eklendiğinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Katkı oranı arttıkça kopma uzaması değeri düşmektedir. Kompozitlerin çekme dayanımı ve kopmadaki uzama değerlerinin katkısız PA6' ya göre düşük olması, polimer matris ile katkılar arasındaki zayıf arayüzey enerjisinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, kopmadaki uzama değerindeki

düşüşün bir diğer sebebi de AlN ve BN katkılarının PA6 zincirlerinin hareketini kısıtlamasıdır.

PA6 polimerine hacimce %10 oranında AlN/BN katkısı eklenildiğinde elektriksel iletkenlik değeri değişmemektedir. Hacimce %30 oranında katkılı kompozitin elektriksel iletkenlik değerinde artış gözlemlenmektedir. Hacimce %30 katkı oranından itibaren elektriksel iletkenlik değerinde hızlı bir artış gözlemlenmiş ve en yüksek değer hacimce %50 katkılı kompozit için elde edilmiştir.

Farklı hacimsel katkı oranı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin termal iletkenlik değerleri incelendiğinde hacimsel katkı oranı arttıkça termal iletkenlik değerinde artış gözlemlenmektedir. En yüksek termal iletkenlik değeri 1,040 W/m.K ile hacimsel olarak %50 AlN/BN katkısı içeren kompozitte elde edilmiştir. Bu değer ortalama 0,20 W/m.K termal iletkenlik değerine sahip olan saf PA6' nın yaklaşık olarak 5 katıdır.

Farklı hacimsel katkı oranı içeren PA6/AlN/BN polimer kompozitlerin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, katkıların polimer matrisi içerisinde homojen dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca katkıların topaklanması gözlemlenmemiştir. Bu durumda geliştirilen PA6/AlN/BN hibrit polimer kompozitlerin mikroyapı bakımından ideal özellikler gösterdiği sonucu çıkmaktadır.

Teorik olarak, 265 cm<sup>3</sup> hacme sahip %50 AlN/BN katkısı içeren kompozitin ağırlığı hesaplandığında 435 g elde edilmektedir. Aynı hacme sahip alüminyumun ağırlığı hesaplanıldığında 715,5 g elde edilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, %50 AlN/BN katkısı içeren kompozitin alüminyumdan %39,2 daha hafif olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu sonuç, geliştirilen kompozitin ağırlık olarak alüminyuma göre daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Katkılara farklı yüzey işlem prosesleri yapılarak polimer matris ile aralarındaki arayüzey enerjisi artırılabilir ve kompozitin mekanik ve termal özellikleri iyileştirilebilir. Bir çalışmada BN katkısına silan ile yüzey işlem yapılmış ve hacimce %57 oranında epoksi matrisine eklenmiştir. Hazırlanan epoksi/BN kompozitin termal iletkenlik değeri ~10,2 W/m.K değerine çıkarılmıştır [99].

Kompozite CF eklenerek mekanik ve termal özellikleri iyileştirilebilir. Bir çalışmada PA6/Mg(OH)<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Grafite polimer kompozite CF eklenerek çekme ve eğilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir [45]. Fiberler stresi etkili bir şekilde dağıtmaktadır ve bazı noktalarda stresin yoğunlaşmasını önlemektedir [48]. Aynı çalışmada CF, kompozitin termal iletkenliğini de arttırmaktadır [45]. CF, polimer

matris içerisindeki katkıları arasında bir köprü görevi görerek yapı içerisindeki termal iletim mekanizmasını arttırmaktadır.

Çalışmada hacimsel olarak %50 oranında AlN/BN katkıları içeren polimer kompozit için  $7,534 \times 10^{-8}$  S/m gibi düşük bir elektriksel iletkenlik değeri elde edilmiştir. Bilindiği üzere elektrikli araçlarda kullanılan geleneksel batarya paketleri alüminyum ve alaşımlarından imal edilmektedir. Bataryalar çok yüksek voltajlarda akıma sahip olduğundan dolayı yolcu güvenliği için akımı iletmeyecek şekilde izole edilmesi gerekmektedir. Güvenlik açısından geliştirilen hibrit polimer kompozit malzeme elektriksel iletkenlik değeri  $3.5 \times 10^7$  S/m olan alüminyuma göre avantajlı bir konumdadır.

Bu çalışmanın en önemli kazanımı, üstün mekanik özelliklerinden dolayı otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan PA6' nın AlN/BN katkıları eklenerek termal iletkenliğinin artırılması ve kompozit üretiminde seri üretime uygun geleneksel üretim prosesleri kullanılmasıdır. Aynı zamanda geliştirilen PA6/AlN/BN polimer kompozit malzeme ile geleneksel üretim prosesleri kullanılarak batarya paketi üretilmesi düşünülmektedir. Bu sebeple maliyetin önemli olduğu otomotiv ve elektronik sektörü için geliştirilen kompozit malzeme büyük bir avantaj sağlamaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] **M. Li** (2013). Preparation and properties of polyamide 6 thermal conductive composites reinforced with fibers, *Materials and Design*, 51, 257-261.
- [2] **F. Meng** (2017). Composites Part B: Engineering, *Composites and Advanced Materials for Industrial Applications*, 117, 165-173.
- [3] **B.F. Xu** (2015). Mechanical properties, morphology and thermal conductivity of polyamide composites filled with graphene nanoplatelets, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and graphite, *Materials Research Innovations*, 19, 388-391.
- [4] **Nazri G.A., Pistoia G** (2009). Lithium Batteries: Science and Technology, *Springer Science and Business Media, Newyork*, pp. 8-11.
- [5] **Linden D., Reddy T.B** (2002). *Handbook of Batteries, Third Eddition*, Bölüm 22 ve 35.
- [6] **Zachary J. Tonzetich** (2017). *University of Texas at San Antonio, VIPER*.
- [7] **Väyrynen A., Salminen J.** (2012). Lithium ion battery production, *J. Chem. Thermodyn.*, 46, 80-5.
- [8] **Pesaran A., Santhanagopalan GK.** (2013). Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications, *30th int. batter. Semin.*
- [9] **Fabio Orecchini, Adriano Santiangeli, Alessandro Dell’Era** (2014). EVs and HEVs Using Lithium-Ion Batteries, *Lithium-Ion Batteries, Advances and Applications*, Pages 205-248.
- [10] **G. Pistoia** (2014). *Lithium-Ion Batteries - Advances and Applications*.
- [11] **Markus Lelie , Thomas Braun, Marcus Knips, Hannes Nordmann, Florian Ringbeck, Hendrik Zappen, Dirk Uwe Sauer** (2018). Battery Management System Hardware Concepts: An Overview, *Applied Sciences*, 8 (4), 534.
- [12] (2011). *Fraunhofer Research News*, 09.
- [13] **Christopher C. Ibeh** (2011). *Thermoplastic Materials - Properties, Manufacturing Methods, and Applications, 1st Edition*.
- [14] **Ying Shi** (2016). Phase behavior of polyamide 6/612 blends, *Plastics Engineering*.
- [15] **E. Parodi, L.E. Govaert, G.W.M. Peters** (2017). Glass transition temperature versus structure of polyamide 6: a flash-DSC study, *Thermochim. Acta.*, 657, 110e122.
- [16] **S.S. Banerjee, A. Janke, U. Gohs, G. Heinrich** (2018). Electron-induced reactive processing of polyamide 6/polypropylene blends: morphology and properties, *Euro. Polym. J.*, 98, 295e301.
- [17] **Ryan A. Ortega, Erin S. Carter, Albert E. Ortega** (2016). Nylon 6,6 Nonwoven Fabric Separates Oil Contaminates from Oil-in-Water Emulsions, *PLoS ONE*, 11 (7).
- [18] **Chanchal Kumar Kundu, Xin Wang, Yanbei Hou, Yuan Hu** (2018). Construction of flame retardant coating on polyamide 6.6 via UV grafting of phosphorylated chitosan and sol-gel process of organo-silane, *Carbohydrate Polymers, Volume 181*, Pages 833-840.

- [19] **R. Sengupta, S. Sabharwal, A.K. Bhowmick, T.K. Chaki** (2006). Thermogravimetric studies on Polyamide-6,6 modified by electron beam irradiation and by nanofillers, *Polym. Degrad. Stab.*, 91, 1311–1318.
- [20] **Phang, I.Y., Liu, T., Mohamed, A., Pramoda, K.P., Chen, L., Shen, L., Chow, S.Y., He, C., Lu, X., Hu, X.** (2005). Morphology, thermal and mechanical properties of nylon 12/organoclay nanocomposites prepared by melt compounding, *Polym. Int.*, 54, 456–464.
- [21] **L.W. McKeen** (2013). Plastic Films in Food Packaging.
- [22] **K. Sato, H. Horibe, T. Shirai, Y. Hotta, H. Nakano, H. Nagai, K. Mitsuishi, and K. Watari** (2010). Thermally conductive composite films of hexagonal boron nitride and polyimide with affinity-enhanced interfaces, *J. Mater. Chem.*, vol. 20, pp. 2749–2752.
- [23] **Xingyi Huang, Pingkai Jiang, Toshikatsu Tanaka** (2011). A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume: 27, Issue: 4.
- [24] **S. Majety, X. K. Cao, R. Dahal, B. N. Pantha, J. Li, J. Y. Lin, H. X. Jiang** (2012). Semiconducting hexagonal boron nitride for deep ultraviolet photonics, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8268:70.
- [25] **Pranay Chakraborty, Guoping Xiong, Lei Cao, Yan Wang** (2018). Lattice thermal transport in super hard hexagonal diamond and wurtzite boron nitride: A comparative study with cubic diamond and cubic boron nitride, *Carbon Volume 139*, Pages 85-93.
- [26] **Y.Q. Fu, J.K. Luo, N.T. Nguyen, A.J. Walton, A.J. Flewitt, X.T. Zu, Y. Li, G. McHale, A. Matthews, E. Iborra, H. Du, W.I. Milne** (2017). Advances in piezoelectric thin films for acoustic biosensors, acoustofluidics and lab-on-chip applications, *Progress in Materials Science*.
- [27] **Shigeyuki Sōmiya, Nils Claussen, Kenji Uchino, Masayuki Kaneno, Fritz Aldinger, Richard M. Spriggs, Kunihito Koumoto** (2003). *Handbook of Advanced Ceramics*.
- [28] **Kubo, S., & Kadla, J. F.** (2005). Lignin-based Carbon Fibers: Effect of Synthetic Polymer Blending on Fiber Properties, *Journal of Polymers and the Environment*, 13 (2), 97–105.
- [29] **Soo-Jin Park** (2015). Carbon Fibers, *Springer Series in Materials Science*.
- [30] **Rajni Chahal, Ashfaq Adnan, Kenneth Reifsnider, Rassel Raihan, Yuan Ting Wu, Vamsee Vadlamudi, Muthu Ram Prabhu Elenchezian** (2018). Molecular Dynamics for the Prediction of the Interfacial Shear Stress and Interface Dielectric Properties of Carbon Fiber Epoxy Composites, *Material Science*.
- [31] **M. Kozako, Y. Okazaki, M. Hikita, and T. Tanaka** (2010). Preparation and evaluation of epoxy composite insulating materials toward high thermal conductivity, in *(ICSD2010), 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, pp. 1–4.
- [32] **B. R. Varlow, J. Robertson, and K. P. Donnelly** (2007). Nonlinear fillers in electrical insulating materials, *IET Sci. Meas. Tech.*, vol. 1, pp. 96–102.
- [33] **H. He, R. Fu, Y. Shen, Y. C. Han, X. F. Song** (2007). Preparation and properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PS composites used for electronic packaging, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, pp. 2493–2499.
- [34] **J. Zeng, R. L. Fu, Y. Shen, H. He, X. F. Song** (2009). High thermal conductive epoxy molding compound with thermal conductive pathway, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 113, pp. 2117–2125.
- [35] **H. He, R. Fu, Y. Han, Y. Shen, D. Wang** (2007). High thermal conductive Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> particle filled epoxy composites with a novel structure, *J. Electron. Packag.*, vol. 129, pp. 469–472.

- [36] **G. Pezzotti, I. Kamada, S. Miki (2000)**. Thermal conductivity of AlN/polystyrene interpenetrating networks, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 20, (8), 1197–1203.
- [37] **K. Sato, H. Horibe, T. Shirai, Y. Hotta, H. Nakano, H. Nagai, K. Mitsuishi, and K. Watar (2010)**. Thermally conductive composite films of hexagonal boron nitride and polyimide with affinity-enhanced interfaces, *J. Mater. Chem.*, vol. 20, pp. 2749–2752.
- [38] **A. Echte (1993)**. Handbuch der Technischen Polymerchemie, *VCH Verlagsgemeinschaft, Weinheim*, pp. 74–83.
- [39] **Eldridge M. Mount (2017)**. III, Extrusion Processes, *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition), Processing, Materials, and Applications*, Pages 217-264.
- [40] **Robert A. Tatara (2017)**. Compression Molding, *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)*, Pages 291-320.
- [41] **J. Wulfsberg, A. Herrmann, G. Ziegmann (2014)**. Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry, *Procedia Engineering Volume 81*, Pages 1601-1607.
- [42] **Saurabh Chaitanya, Amrinder P. Singh, Inderdeep Singh (2017)**. Processing of lignocellulosic fiber-reinforced biodegradable composites, *Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites*, Pages 163-181.
- [43] **Sina Ebnesajjad (2015)**. Injection Molding, *Fluoroplastics (Second Edition)*.
- [44] **Kirk M. Cantor, Patrick Watts (2011)**. Plastics Processing, *Applied Plastics Engineering Handbook*.
- [45] **Minghui Li, Yizao Wan, Zhifang Gao, Guangyao Xiong, Xiaoming Wang, Changbiao Wan, Honglin Luo (2013)**. Preparation and properties of polyamide 6 thermal conductive composites reinforced with fibers, *Materials and Design*, 51, 257–261.
- [46] **Li J., Cai C.L. (2011)**. The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites, *Curr. Appl. Phys.*, 11:50–4.
- [47] **Gamze Karsli N., Yilmaz T., Aytac A., Ozkoc G. (2013)**. Investigation of erosive wear behavior and physical properties of SGF and/or calcite reinforced ABS/PA6 composites, *Composites Part B*, 44:385–93.
- [48] **Zhou S, Zhang Q, Wu C, Huang J (2013)**. Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of polyamide 6/polyphenylene sulfide composites, *Mater. Des.*, 44:493–9.
- [49] **Li S., Qi S., Liu N., Cao P. (2011)**. Study on thermal conductive BN/novolac resin composites, *Thermochim Acta*, 523:111–5.
- [50] **Liang JZ. (2013)**. Thermal conductivity of PP/Al(OH)<sub>3</sub>/Mg(OH)<sub>2</sub> composites, *Composites Part B*, 44:248–52.
- [51] **Adams PM., Katzman HA., Rellick GS., Stupian GW. (1998)**. Characterization of high thermal conductivity carbon fibers and a self-reinforced graphite panel, *Carbon*, 36:233–45.
- [52] **Manocha LM., Warriar A., Manocha S., Sathiyamoorthy D., Banerjee S. (2006)**. Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials – I. Unidirectional composites, *Carbon*, 44:480–7.
- [53] **Mamunya YP., Davydenko VV., Pissis P., Lebedev E. (2002)**. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders, *EurPolym. J.*, 38:1887–97.
- [54] **J. Konieczny, B. Chmielnicki, A. Tomiczek (2013)**. Evaluation of selected properties of PA6-copper/graphite composite, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 60, Issue 1*.

- [55] Hill RF., Supancic PH. (2004). Determination of the thermal resistance of the polymer-ceramic interface of alumina-filled polymer composites, *J. Am. Ceram. Soc.*, 87:1831–5.
- [56] Lee WS., Han IY., Yu J., Kim SJ., Byun KY. (2007). Thermal characterization of thermally conductive underfill for a flip-chip package using novel temperature sensing technique. *Thermochim Acta.*, 455:148–55.
- [57] Yu SZ., Hing P., Hu X. (2002). Thermal conductivity of polystyrene-aluminum nitride composite, *Composites A*, 33:289–92.
- [58] Pezzotti G., Kamada I., Miki S. (2000). Thermal conductivity of AlN/polystyrene interpenetrating networks, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 20:1197–203.
- [59] Morelli DT., Heremans JP. (2002). Thermal conductivity of germanium, silicon, and carbon nitrides, *Appl. Phys. Lett.*, 81:5126–8.
- [60] Zhou TL., Wang X., Mingyuan GU., Liu XH. (2008). Study of the thermal conduction mechanism of nano SiC/DGEBA/EMI-2,4 composites, *Polymer*, 49:4666–72.
- [61] Hong JP., Yoon SW., Hwang T., Oh JS., Hong SC., Lee Y., Nam JD. (2012). High thermal conductivity epoxy composites with bimodal distribution of aluminum nitride and boron nitride fillers, *Thermochim. Acta.*, 537:70–5.
- [62] Yokota H., Ibukiyama M. (2003). Microstructure tailoring for high thermal conductivity of beta-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, 86:197–9.
- [63] Xia ZP., Li ZQ. (2007). Structural evolution of hexagonal BN and cubic BN during ball milling, *J Alloys Compd.*, 436:170–3.
- [64] Zhang K., Zhang L. (2012). The model of structure phase transformation for phase change from graphite to diamond through explosion, *ProcEng.*, 27:1364–72.
- [65] Teng CC., Ma CCM., Chiou KC., Lee TM. (2012). Synergetic effect of thermal conductive properties of epoxy composites containing functionalized multi-walled carbon nanotubes and aluminum nitride, *Composites B*, 43:265–71.
- [66] Hongyu Chen, Valeriy V. Ginzburg, Jian Yang, Yunfeng Yang, Wei Liu, Yan Huang, Libo Du, Bin Chen. (2016). Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications, *Progress in Polymer Science*, 59, 41–85.
- [67] Yung KC., Liem H. (2007). Enhanced thermal conductivity of boron nitride epoxy-matrix composite through multi-modal particle size mixing, *J. Appl. Polym. Sci.*, 106:3587–91.
- [68] Bae JW., Kim W., Cho SH., Lee SH. (2000). The properties of AlN-filled epoxy molding compounds by the effects of filler size distribution, *J. MaterSci*, 35:5907–13.
- [69] Choi S., Kim J. (2013). Thermal conductivity of epoxy composites with a binary-particle system of aluminum oxide and aluminum nitride fillers, *Composites B*, 51:140-7.
- [70] Leung SN., Khan MO., Chan E., Naguib HE., Dawson F., Adinkrah V., Lakatos-Hayward L. (2013). Synergistic effects of hybrid fillers on the development of thermally conductive polyphenylene sulfide composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 127:3293–301.
- [71] Tatsuki Ohji, Paolo Colombo, Makio Naito, Javier E. Garay, Hua-Tay Lin. (2014). Thermal Degradation Control Study of Carbon Fiber/Polyamide 6 Composite using Hexagonal Boron Nitride Powder, *Innovative Processing and Manufacturing of Advanced Ceramics and Composites II*.
- [72] Ru Xia, Bin Yang, Manman Sun, Jiasheng Qian, Peng Chen, Jibin Miao, Ming Cao, Lifan Su. (2018). Morphology, Thermal and Crystallization Properties of Polyamide-6/Boron Nitride (BN) Thermal Conductive Composites, *Polymer Korea*, 42 (2):230-241.



- [73] **Brosse A. C.** (2008). Effect of multi-walled carbon nanotubes on the lamellae morphology of polyamide-6, *Polymer*, 49, 4680–6.
- [74] **S. Chatterjee, F. A. Nüesch, B. T. T. Chu.** (2011). Comparing carbon nanotubes and graphene nanoplatelets as reinforcements in polyamide 12 composites, *Nanotechnology*, 22, 275714, (8pp).
- [75] **Henry Kuo Feng Cheng, Nanda Gopal Sahoo, Yongzheng Pan, Lin Li, Siew Hwa Chan, Jianhong Zhao, Ge Chen.** (2010). Complementary Effects of Multiwalled Carbon Nanotubes and Conductive Carbon Black on Polyamide 6, *Wiley InterScience*.
- [76] **Djamal Eddine Kherroub, Mohammed Belbachir, Saad Lamouri, Larbi Bouhadjar, Karim Chikh.** (2013). Synthesis of Polyamide-6/Montmorillonite Nanocomposites by Direct In-situ Polymerization Catalysed by Exchanged Clay, *Oriental Journal of Chemistry*, Vol. 29, No. (4): Pg. 1429-1436.
- [77] **Shengzhao Li, Tuantuan Yang, Huawei Zou, Mei Liang, Yang Chen.** (2016). Enhancement in thermal conductivity and mechanical properties via large-scale fabrication of boron nitride nanosheets, *High Performance Polymers* 29 (3).
- [78] **Lee DJ., Lee B., Park KH., Ryu HJ., Jeon S., Hong SH.** (2015). Scalable exfoliation process for highly soluble boron nitride nanoplatelets by hydroxide-assisted ball milling, *Nano Lett.*, 15, 1238-1244.
- [79] **Yuan F., Jiao WC., Yang F., Liu WB., Liu JY., Xu ZH.** (2017). Scalable exfoliation for large-size boron nitride nanosheets by low temperature thermal expansion-assisted ultrasonic exfoliation, *J. Mater. Chem. C.*, 5, 6359-6368.
- [80] **Wu X., Liu H., Tang ZH., Guo BC.** (2016). Scalable fabrication of thermally conductive elastomer/boron nitride nanosheets composites by slurry compounding, *Compos. Sci. Technol.*, 123, 179-186.
- [81] **Lin Y., Williams TV., Xu TB., Cao W., Elsayed-Ali HE., Connell JW.** (2011). Aqueous dispersions of few-layered and monolayered hexagonal boron nitride nanosheets from sonication-assisted hydrolysis: critical role of water, *J. Phys. Chem. C*, 115, 2679-2685.
- [82] **Wang Y., Shi Z.X., Yin J.** (2011). Boron nitride nanosheets: large-scale exfoliation in methanesulfonic acid and their composites with polybenzimidazole, *J. Mater. Chem.*, 21, 11371-11377.
- [83] **C. Balasubramanian, S. Bellucci, G. Cinque, A. Marcelli, M. Cestelli Guidi, M. Piccinini, A. Popov, A. Soldatov, P. Onorato.** (2006). Characterization of aluminium nitride nanostructures by XANES and FTIR spectroscopies with synchrotron radiation, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 18, S2095–S2104.
- [84] **Ricardo Cha´vez-Medelli´n, Luis A. Sanchez de Almeida Prado, Karl Schulte.** (2010). Polyamide-12/Functionalized Carbon Nanofiber Composites: Evaluation of Thermal and Mechanical Properties, *Macromolecular Materials and Engineering*, 295 (4):397-405.
- [85] **H. Meng, GX. Sui, GY. Xie, R. Yang.** (2009). Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition, *Composites Science and Technology*, 69, 606–611.
- [86] **Zhang X, Liu J, Wang Y, Wu W.** (2017). Effect of polyamide 6 on the morphology and electrical conductivity of carbon black-filled polypropylene composites, *R. Soc. open sci.*, 4: 170769.
- [87] **Pravin V. Kodgire, Arup R. Bhattacharyya, Suryasarathi Bose, Nitin Gupta, Ajit R. Kulkarni, Ashok Misra.** (2006). Control of multiwall carbon nanotubes dispersion in polyamide6 matrix: An assessment through electrical conductivity, *Chemical Physics Letters*, 432, 480–485.

- [88] **Wolfgang Bauhofer, Josef Z. Kovacs.** (2009). A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites, *Composites Science and Technology*, 69, 1486–1498.
- [89] **McNamara AJ., Joshi Y., Zhang ZM.** (2012). Characterization of nanostructured thermal interface materials—a review, *International Journal of Thermal Sciences*, 62: 2-11.
- [90] **Gharagozloo-Hubmann K., Boden A., Czempiel G.J., Firkowska I., Reich S.** (2013). Filler geometry and interface resistance of carbon nanofibres: Key parameters in thermally conductive polymer composites, *Applied Physics Letters*, 102 (21): 213103.
- [91] **Hu M., Koblinski P., Schelling PK. Kapitza.** (2009). conductance of silicon–amorphous polyethylene interfaces by molecular dynamics simulations, *Phys. Rev. B*, 79: 104305.
- [92] **Shin H., Yang S., Chang S., Yu S., Cho M.** (2013). Multiscale homogenization modeling for thermal transport properties of polymer nanocomposites with Kapitza thermal resistance, *Polymer*, 54 (5): 1543-1554.
- [93] **Huang X., Zhi C., Jiang P., Golberg D., Bando Y., Tanaka T.** (2013). Polyhedral oligosilsesquioxane-modified boron nitride nanotube based epoxy nanocomposites: an ideal dielectric material with high thermal conductivity, *Advanced Functional Materials*, 23 (14): 1824-1831.
- [94] **Huang X., Iizuka T., Jiang P., Ohki Y., Tanaka T.** (2012). Role of interface on the thermal conductivity of highly filled dielectric epoxy/AlN composites, *The Journal of Physical Chemistry C*, 116 (25): 13629-13639.
- [95] **Huang X., Wang S., Zhu M., Yang K., Jiang P., Bando Y., Golberg D., Zhi C.** (2014). Thermally conductive, electrically insulating and melt-processable polystyrene/boron nitride nanocomposites prepared by in situ reversible addition fragmentation chain transfer polymerization, *Nanotechnology*, 26 (1): 015705.
- [96] **Shtein M., Nadiv R., Buzaglo M., Kahil K., Regev O.** (2015). Thermally conductive graphene-polymer composites: size, percolation, and synergy effects, *Chemistry of Materials*, 27 (6): 2100-2106.
- [97] **Y. Agari, A. Ueda, M. Tanaka, S. Nagai.** (1989). Thermal Conductivity of a Polymer Filled with Particles in the Wide Range from Low to Super-High Volume Content.
- [98] **Congliang Huang, Xin Qian, Ronggui Yang.** (2018). Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites, *Materials Science & Engineering R* 132, 1–22.
- [99] **Y. S. Xu, D. D. L. Chung.** (2000). Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments, *Compos. Interfaces*, vol. 7, pp. 243–256.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Görkem YILDIZ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 17/07/1991 BURSA  
**E-posta** : gorkemy16@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

#### Sözlü Sunum:

Yildiz G., Akkoyun M., ‘Investigation of Electrical, Thermal and Mechanical Properties of PA6/AlN/BN Hybrid Polymer Composite’, The IRES International Conference on Nanoscience, Nanotechnology & Advanced Materials, Ekim 2019, İstanbul

#### Proje:

BTÜ-BAP Lisansüstü Tez Projesi (Proje No: 190Y007), ‘Polimer kompozit esaslı Li-ion batarya paketlerinin geliştirilmesi ve özelliklerinin araştırılması’, 08.02.2019 – 08.02.2020

#### Ödül:

PA6/BN/AlN Kompozit Esaslı Li-ion Batarya Paketlerinin Geliştirilmesi, BTTO Yenilikçi Ürün ve Üretim Teknolojileri AR-GE Proje ve Fikir Pazarı, Mayıs 2019, Bursa, Poster sunumu 2. ödülü