

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*

BİDGE Yayınları

İleri Malzemeler ve Modern Üretim Teknolojileri Güncel Gelişmeler

Editör: HASAN KOTEN

ISBN: -

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: -

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltpe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İleri Malzemeler ve Modern Üretim Teknolojileri Güncel Gelişmeler

Önsöz

Bilim ve teknolojinin hızla geliştiği günümüzde, metalürji ve malzeme mühendisliği disiplinleri, endüstriyel üretimden enerji teknolojilerine, havacılık ve savunma sanayinden ileri malzemelere kadar geniş bir yelpazede yenilikçi çözümler sunmaktadır. Gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda yeni malzemelerin tasarlanması, mevcut malzemelerin performanslarının artırılması ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, bu alanın önemini her geçen gün daha da artırmaktadır. Bu kapsamda hazırlanan [Kitap Adı], metalürji ve malzeme mühendisliği alanında gerçekleştirilen güncel bilimsel çalışmaları bir araya getirerek araştırmacılar, akademisyenler, lisansüstü öğrenciler ve sektör profesyonelleri için kapsamlı bir başvuru kaynağı oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu kitapta yer alan bölümler, alanında uzman araştırmacıların katkılarıyla hazırlanmış olup; ileri mühendislik malzemeleri, karakterizasyon teknikleri, üretim teknolojileri, yüzey mühendisliği uygulamaları, nanomalzemeler, kompozit sistemler, eklemeli imalat yöntemleri, sürdürülebilir malzeme teknolojileri ve güncel araştırma yaklaşımları gibi birçok önemli konuyu kapsamaktadır. Her bir çalışma, ilgili alandaki son gelişmeleri ortaya koyarken aynı zamanda gelecekte gerçekleştirilecek araştırmalara da ışık tutmayı hedeflemektedir. Bilimsel bilginin paylaşılması ve disiplinler arası iş birliklerinin güçlendirilmesi amacıyla hazırlanan bu eserin, metalürji ve malzeme mühendisliği alanındaki bilgi birikimine katkı sağlayacağına ve okuyucular için değerli bir kaynak olacağına inanıyoruz. Kitabın hazırlanmasına emek veren tüm bölüm yazarlarına, değerlendirme sürecinde katkı sunan hakemlere ve yayın aşamasında destek sağlayan tüm paydaşlara teşekkür ederiz. Bu çalışmanın, bilimsel araştırmaların gelişimine katkıda bulunması ve yeni çalışmalara ilham vermesi en büyük temennimizdir.

Prof. Dr. Hasan KÖTEN
Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|---|
| BORİK ASİT KATKILI POLİPROPİLEN KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ETKİSİ | 1 |
|---|---|

*RAHİM KESKİNOĞLU, MEHMET ÇAĞRI TÜZEMEN, CEMAL
ÇARBOĞA*

BÖLÜM 0

BORİK ASİT KATKILI POLİPROPİLEN KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ETKİSİ

RAHMİ KESKİNOĞLU¹

MEHMET ÇAĞRI TÜZEMEN²

CEMAL ÇARBOĞA³

Giriş

Polimer esaslı malzemeler, son kırk yılda geleneksel mühendislik malzemeleri olan metaller ve seramiklerle rekabet edebilen, hatta birçok uygulamada onları ikame eden bir konuma gelmiştir. Özellikle termoplastik polimerler; düşük yoğunlukları, kolay işlenebilirlikleri, kimyasal dirençleri ve maliyet açısından avantajlı olmaları nedeniyle otomotiv, beyaz eşya, ambalaj, elektrik-elektronik, tıbbi cihazlar ve inşaat sektöründe yoğun biçimde kullanılmaktadır (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004). Polipropilen PP, rafine petrokimya ürünlerinden elde edilen propilen monomerinin polimerizasyonu ile üretilen yarı kristal bir polimerdir.

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0006-6883-3510

² Doç. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1746-2864

³ Prof. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6781-4955

Üretim teknolojisinde özellikle Ziegler–Natta ve metallocen kataliz sistemlerinin gelişimi, PP'nin taktisitesinin (izotaktik, sindiyotaktik, ataktik) kontrol edilebilmesine ve böylece farklı özellik kombinasyonlarına sahip PP türlerinin üretilebilmesine imkân tanımıştır (Weidenfeller ve ark., 2004).

Termoplastikler içinde (PP), polietilenden sonra dünyada en çok üretilen ikinci polimerdir. PP; düşük yoğunluğu ($\sim 0,90 \text{ g/cm}^3$), iyi mekanik özellikleri, kimyasal ve elektriksel dayanımı ile çok amaçlı bir mühendislik plastikleri sınıfı oluşturmakta ve farklı katkılarla modifiye edilerek çok geniş performans aralıklarına taşınabilmektedir (Weidenfeller ve ark., 2004). PP'nin yüksek üretim hacmi, onu hem akademik çalışmalar için cazip bir model malzeme hem de endüstri için kritik bir ürün haline getirmektedir.

BA (H_3BO_3); Bor elementinin üç oksijen atomuyla birleştirilmesiyle meydana gelen, toksik etkisi olmayan, antimikrobiyal özelliği kanıtlanmış iyi bir antiseptik ajandır. Endüstride cam, seramik, tekstil, deterjan ve kozmetikte sıkça kullanılır. Ayrıca, cam üretiminde stabilizatör ve yangına dayanıklılığı arttırıcı katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Eti Maden, 2019; Kabu & Akosman, 2013; Nielsen, 2014). Polimer kompozit bağlamında borik asit ve diğer bor bileşikleri; Alev geciktirici katkı olarak, termal stabilite arttırıcı olarak, bazı sistemlerde bariyer özelliklerini iyileştiren katkı olarak, çeşitli korozyon ve biyolojik etkiler üzerinde düzenleyici ajan olarak değerlendirilmiştir (Dibek vd., 2020; Dogahe vd., 2022; Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019; Kabu & Akosman, 2013; Nazarenko vd., 2016; Nielsen, 2014; Pehlivanlı, 2016, 2021; Svishcheva vd., 2021; Tian vd., 2022; Ünal vd., 2023). Bu bulgular, BA'nın PP kompozitlerinde hem yapısal hem de fonksiyonel bir katkı olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Malzeme ve Yöntem

Çalışmanın amacı doğrultusunda tüm süreç; tekrarlanabilir, izlenebilir ve literatürle karşılaştırılabilir bir deneysel altyapı üzerine kurulmuştur. Kompozit malzemelerin hazırlanması, üretimi, plaka basımı ile uygulanan, reolojik ve fiziksel deneysel yöntemleri PETKİM polimer laboratuvarlarında yapılmıştır.

Kullanılan malzemeler

Polipropilen (PP); Matris malzeme olarak tercih edilen polipropilen (PP) nin içerisine; inorganik fonksiyonel dolgu borik asit (BA) eklenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan PP türü ticari MH418 sınıfıdır; tüm kompozisyonlar MH418 PP matrisi üzerinde tasarlanmış ve referans olarak Tablo 1. de mekanik, fiziksel ve reolojik özellikleri belirtilen katkısız MH418 PP dikkate alınmıştır. Çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan PP, ticari bir izotaktik homopolimeridir.

Tablo 1. Polipropilen PETOPLen MH418 özellikleri

| ÜRETİCİ | PETKİM | TİCARİ KOD | MH418 | FORM | GRANÜL |
|--------------------------------------|--------|-------------|-------------------|---------------|--------|
| ÖZELLİKLER | | TİPİK DEĞER | BİRİM | TEST METODU | |
| Erime Akış Hızı (230°C/2.16 kg) | | 4,9 | g/10 min | ASTM D1238 | |
| Yoğunluk | | 0,905 | g/cm ³ | ISO 1183-1 | |
| Ergime Noktası (DSC, 2.ısıtma) | | 163 | °C | ASTM D3418 | |
| Akmada Gerilme Dayanımı | | 34 | MPa | ASTM D638 | |
| Bükülme Modülü, 23°C | | 1450 | MPa | TS EN ISO 178 | |
| Izod Darbe Dayanımı, 23°C (çentikli) | | 30 | J/m | ASTM D256 | |
| Rockwell Sertliği | | 94 | R-scale | ASTM D785 | |
| Deformasyon Sıcaklığı, 0.45 MPa | | 94 | °C | ISO 75 | |

Bu çalışmada Şekil 1. de görüldüğü gibi granül halinde bulunan PP MH418, BA için taşıyıcı faz görevi görmekte ve kompozit sistemin ana sürekliliğini sağlamaktadır.

Şekil 1. Polipropilen (PP MH418)



Borik Asit (BA); Şekil 2. de görseli bulunan Tablo 2. de temel özellikleri belirtilen BA, çalışmada inorganik dolgu olarak kullanılmıştır (Svishcheva vd., 2021; Tian vd., 2022)

Şekil 2. Borik Asit (H_3BO_3)



Tablo 2. Kullanılan Borik Asit'in (H_3BO_3) Temel özellikleri

| | |
|------------------------|---|
| Kimyasal adı | Borik asit |
| Kimyasal formül | H_3BO_3 |
| CAS Numarası | 10043-35-3 |
| Üretici | Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü |
| Safılık | $\geq \%99$ (kütlesele) |
| Yoğunluk | $\approx 1,435$ g/cm ³ |
| Ergime noktası | $\sim 170-175$ °C (su kaybı ile bozunma) |
| Partikül boyutu | $d_{50} \approx 10-50$ µm (elek analizi / üretici verisi) |
| Form | İnce kristal/pudra |

Borik asit, ısıtıldığında kademeli su kaybı ile B₂O₃ benzeri cam fazına dönüşebilmekte, bu faz polimer yüzeyinde bariyer oluşumu sağlayarak alev geciktirici etki ortaya çıkarabilmektedir (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019; Nazarenko vd., 2016; Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023). Aynı zamanda, parçacık yapısı ve yoğunluğu nedeniyle PP kompozitlerde sertliği artıran sert bir dolgu fazı olarak görev yapar (Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023).

Kompozit formülasyonlarının tasarımı

Referans malzeme (RM) olarak seçilen saf PP ve kompozit formülasyonlarının dolgu oranları Tablo 3. te ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada A1 formülasyonunda %1, B1 formülasyonunda %3 ve C1 formülasyonunda %5 oranlarında BA kullanılmıştır.

Tablo 3. Kompozit Formülasyonlarının dolgu oranları

| NUMUNE KODU | PP | BA |
|-------------|------|----|
| RM | %100 | - |
| A-1 | %99 | %1 |
| B-1 | %97 | %3 |
| C-1 | %95 | %5 |

Numune hazırlama

Numune hazırlama, hammaddelerin kurutulması, parçacık boyutlarının ayarlanması, ön karıştırma, ekstrüzyon ile ergitme-karıştırma, granülasyon ve pres yoluyla numune üretim adımlarını içermektedir. Tüm proses adımları, literatürde PP kompozitleri için önerilen sıcaklık ve süre aralıklarına uygun olarak belirlenmiştir (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004; Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023).

BA ve PP nispeten düşük nem alma özelliğine sahip olması, kurutma işleminin prosesin ilk adımı olarak tercih edilmesine neden olmuştur. Ekstrüzyon ve presleme sırasında nemin; gözenek oluşumu, yüzey hataları, fiziksel zayıflık yaratmasını engellemek için malzemeler; literatürde biyobazlı dolgu içeren PP kompozitleri için önerilen kurutma stratejileri ile uyumlu (Fu ve ark., 2008; Honarvar vd., 2017; Keyiş, 2020). olarak, kompozit kuru karışımları (PP /BA) ekstrüzyona girmeden önce 80 °C'de azot sirkülasyonlu etüvde, 2 saat kurutma ve nem almalarını engelleme amacı ile kapalı kaplarda bekletme işlemleri yapılmıştır.

Matris malzeme olan PP nin içerisine dolgu malzemesi olarak tercih edilen malzemelerin; BA toz halinde, PP'nin granül halinde olması kompozit karışımının homojenlik problemini ortaya çıkarmaktadır. Homojen bir karışım elde etme amacı doğrultusunda granül halinde bulunan Polipropilen mekanik doğrayıcı içinde parçacık boyutu küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Granül halinde bulunan PP'nin parçacık boyutunu ortalama 200-250 mikron boyutuna dönüştürene kadar Süper Mikser marka devirmeli öğütücü makinası içinde 11000 d/d ve 20 Saniye / 4 tekrar şartlarında parçalanmıştır. Polimer parçacıklarının yapısal bozulmaya uğramaması için her 20 saniyelik mekanik parçalama işleme sonrasında 5 dakika 20 °C de soğutmaya tabi tutulmuştur.

Her bir kompozit türü için bileşenler, % ağırlık oranları dikkate alınarak analitik terazide $\pm 0,01$ g hassasiyetle tartılmıştır. Tartım sırasında; Aynı seri numunelerin bileşenleri ardışık olarak tartılarak hata olasılığı azaltılmış, tartılan malzemeler, numune kodu ile etiketlenmiş, kilitli plastik poşetler içerisine azot konularak karıştırma işlemi gerçekleştirilene kadar saklanmıştır. Tartım sonrası kompozitler için hazırlanan malzemeler, belirtilen formülasyon oranlarında fiziksel olarak karıştırılmıştır. Malzeme bileşenlerinin ekstrüderde daha hızlı ve homojen dağılımlarını sağlamak, özellikle BA aglomerasyonunu minimuma indirmek amacı ile 20 devir/dakika

hızla çalışan Sinoped marka üç boyutlu mikser içerisinde 12 dakika süre boyunca karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma süresi, devri ve karışım sonucu gözle kontrol edilmiştir.

Malzeme üretimi

Hazırlanan kuru karışımlar, Petkim ARGE merkezinde bulunan laboratuvar tipi Brabender marka çift vidalı ko-rotasyonlu ekstrüderde 150 °C ile 185 °C sıcaklığında 50 devir/dakika vida hızında karıştırılarak eritilmiştir. Bu tür ekstrüderler, karıştırma etkinliği ve dolgu dağılımını iyileştirmede tek vidalı sistemlere göre üstün kabul edilmektedir (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004).

Ekstrüder parametreleri: Vida çapı: 20–25 mm, L/D oranı: 24–32, Vida tipi: Ko-rotasyonlu, karıştırma ve taşıma elemanları kombinasyonlu, Vida devri: 50–80 rpm, Sıcaklık profili (zon bazında): 1. Bölge (besleme): 150 °C, 2. Bölge: 170 °C, 3. Bölge: 185 °C, Kalıp: 185–190 °C

Besleme hızı, eriyik basıncını kontrol altında tutacak şekilde ayarlanmış; malzemenin yanma veya sararma gibi oksidatif bozunma belirtileri göstermemesi için eriyik sıcaklığı ve motor yükü gözlemlenmiştir.

Ekstrüderden çıkan eriyik şerit, oda sıcaklığını çok fazla düşürmeden su banyosunda kontrollü şekilde soğutulmuş, ardından granül kesme ünitesinden geçirilerek silindirik granüller hâline getirilmiştir. Granülasyon sonrası: Granüller filtrelenerek yabancı partiküllerden arındırılmış, kodlanmış paketlere alınarak azot ortamında etüv içinde 80 °C’de 2 saat kurutulmuş, numune üretimine kadar kuru ortamda saklanmıştır.

Granül haline getirilen malzemelere uygulanacak testler nedeniyle hazırlanacak olan test numuneleri, laboratuvar koşullarına bağlı olarak, daha esnek kesme ve numune geometrisi imkanı

sağladığı için sıcak - soğuk pres yöntemi ile üretimi tercih edilmiştir. Malzeme üretiminde tercih edilen sıcak–soğuk presleme ile yapılan işlemler; üst ve alt plaka sıcaklığı 230 °C getirildikten sonra hazırlanan malzemeler; 4 dakikalık ön ısıtma işleminin takibinde (basınç uygulanmadan, malzeme eriyip akışkan hâle gelene kadar) 5–8 dakikalık süre boyunca 60 bar basınca tabi tutularak sıcak presleme yapılmıştır. Sıcak kalıplama sonrasında plaka sıcaklığı 20–25 °C'ye düşene kadar kalıp içinde soğuk su sirkülasyonlu preste 150 bar basınç altında soğutma işlemi yapılmıştır. Presleme sonrası elde edilen plakaların kalınlıkları, hedef test standardındaki numune kalınlığına uygun olacak şekilde seçilmiştir. Tüm test numuneleri, deney öncesinde: 23 ± 2 °C sıcaklık ve %50 ± 5 bağıl nem koşullarında en az 24 saat bekletilerek kondisyonlama işlemine tabi tutulmuştur.

Uygulanan Test Yöntemleri

Yoğunluk ölçümleri

Numunelerin yoğunluğu, ISO 1183-1 standardına uygun olarak arşimet prensibine dayalı daldırma yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntemde numunenin, havadaki kütlesi (m_1) ve distile su içindeki kütlesi (m_2) ölçülür. Yoğunluk (ρ), aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\rho = \rho_{\text{su}} \cdot \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

Burada ρ_{su} , test sıcaklığındaki su yoğunluğudur (yaklaşık 0,997 g/cm³, 23 °C).

Bu test, dolgu oranı ve türü değişikçe kompozit yoğunluğunun nasıl değiştiğini görmek için temel girdi sağlamıştır (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004).

Shore-D sertlik testi

Sertlik ölçümleri, ASTM D2240 standardına göre ZWICK/ROEL marka Shore-D durometre ile gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan prosedür; Numune kalınlığı en az 6 mm (daha ince plakalar iki veya daha fazla katman halinde üst üste preslenerek hedef kalınlığa getirilmiştir) olan her numunenin (homojen yüzeylerden) en az 5 farklı noktasından iğne temasından itibaren 15 saniye sonra değer okunarak ölçüm yapılmıştır.

Her seri için, farklı numunelerden alınan ölçümler birleştirilerek ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Bu test, BA katkısının sertlik üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır (Dogahe vd., 2022; Fu vd., 2008; Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023).

Erime akış indeksi (MFI)

Erime akış indeksi (MFI), polimer eriyiğinin belirli sıcaklık ve yük altında birim zamanda akan kütesini ifade eder. Test, ASTM D1238 standardına göre INSTRON CEAST MF20 Marka MFI cihazında gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan numuneler; 230 °C test sıcaklığında, 2,16 kg yük altında, 6 dakikalık ön ısıtma süresi sonrasında 10 dakika boyunca belirli zaman aralıklarında alınan eriyik parçaları tartılmış, g/10 dk cinsinden MFI hesaplanmıştır.

Her formülasyon için en az 5 tekrar yapılmış ve ortalama MFI değeri raporlanmıştır. MFI testleri, dolgu katkısının, PP eriyiğinin akış davranışına ve dolaylı olarak üretim prosesine (enjeksiyon/ekstrüzyon) etkisini değerlendirmek için kritik bir parametre sağlamaktadır (Fu vd., 2008; Pehlivanlı, 2016,2021; Weidenfeller vd., 2004).

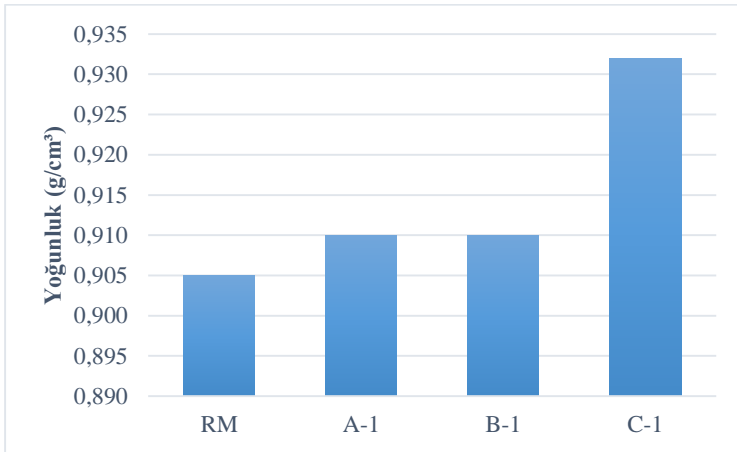
Bulgular

Bu bölümde, polipropilen (PP) matrisine borik asit (BA) eklenmesiyle elde edilen kompozitlerin yoğunluk, sertlik ve erime akış hızına ait deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Yoğunluk, Shore-D sertlik ve MFI testleri gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, dolgu oranının PP matris üzerindeki temel etkilerini göstermesi açısından önem taşımaktadır (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004).

Yoğunluk sonuçları

Kompozitlere ait yoğunluk sonuçları, Şekil 3'te özetlenmiş olarak gösterilmiştir. Sonuçlara göre saf PP en düşük yoğunluk değerine sahiptir. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü PP'nin yoğunluğu 0,90–0,91 g/cm³ aralığındadır (Weidenfeller ve ark., 2004). BA katkılı numunelerde yoğunluğun saf PP'ye kıyasla belirgin şekilde arttığı görülmüştür. BA'nın yoğunluğu PP'den daha yüksek olduğundan, dolgu oranı arttıkça yoğunlukta bir artış eğilimi gözlenmesi literatürle uyumludur (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023).

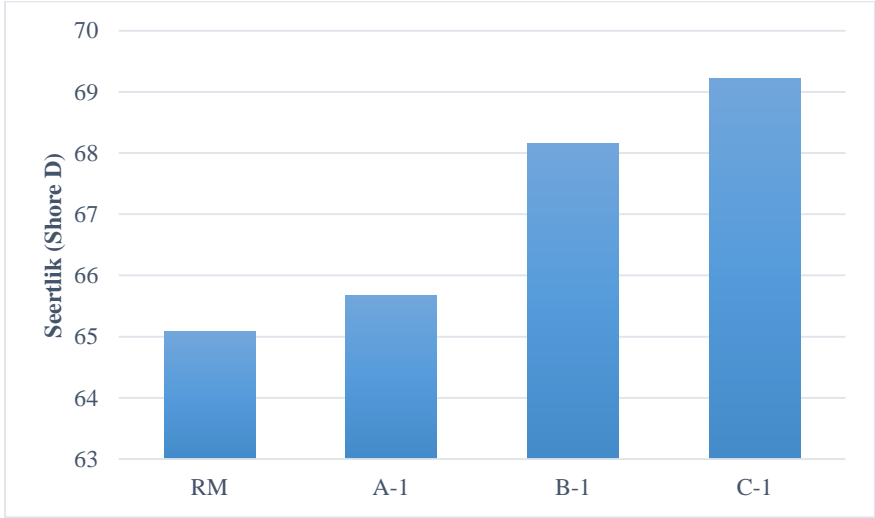
Şekil 3. Dolgu oranlarına göre yoğunluk değerlerinin değişimi



Shore-D sertlik sonuçları

Sertlik sonuçları, Şekil 4'te verilmektedir. Saf PP en düşük Shore-D sertlik değerini göstermiş, BA katkılı oranına paralel olarak sertlikte belirgin bir artış gözlenmiştir. BA, rijit inorganik bir faz olarak PP matrisin yüzeysel deformasyona direncini artırmıştır. BA'nın rijit inorganik faz olarak sertliği artırması literatürle uyumludur (Dogae vd., 2022; Nazarenko vd., 2016; Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023).

Şekil 4. Dolgu oranlarına göre sertlik (Shore D) değerlerinin değişimi

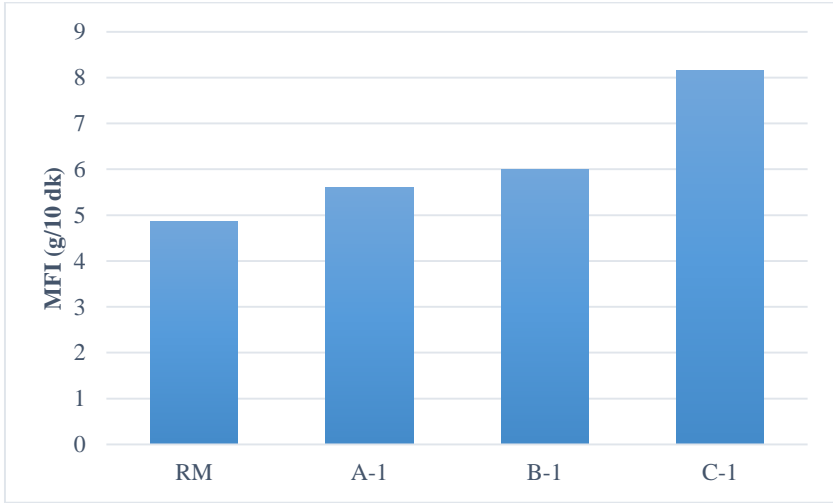


PP matrisi içindeki BA oranlarındaki değişimlerin, malzemenin sertlik yanıtını anlamlı ölçüde etkilediğini göstermektedir. PP/BA oranının ve bağlayıcı miktarının ayarlanmasıyla, sistemin hem daha yumuşak hem de daha sert çalışan kompozisyonlara doğru kaydırılabildiği gözlenmektedir. Elde edilen sertlik sonuçları, formülasyonlar arasındaki bileşim farklılıklarının sertlik üzerinde de belirgin rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Erime akış indeksi (MFI)

Erime akış indeksi (MFI) sonuçları, Şekil 5'te gösterilmiştir. Literatürde partikül dolgu ilavesi çoğu durumda viskoziteyi artırıp MFI'yi düşürme eğilimindedir (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004). Saf PP, en yüksek MFI değerine sahiptir; bu da en düşük eriyik viskozitesine karşılık gelmektedir (Weidenfeller ve ark., 2004). BA katkılı numunelerde, MFI değerinin saf PP'ye kıyasla azaldığı (eriyik viskozitesinin arttığı) görülmüştür. BA parçacıkları, eriyik içinde hareket eden PP zincirlerini fiziksel olarak sınırlandırmakta ve dolgu yüklemesiyle akışa karşı direnç artmaktadır (Pehlivanlı, 2016,2021; Weidenfeller ve ark., 2004).

Şekil 5. Dolgu oranlarına göre erime akış hızı MFI (g /10 dk) değerlerinin değişimi



C-1 (5% BA) MFI'yi çok yükseltmiş, bu eriyik viskozitesinin düştüğünü ima eder. Bu durum literatürle çelişiyor gibi görünse de, PP'de proses sırasında zincir kırılması veya termooksidatif etkiler (BA'nın dehidrasyonu ile taşınan su, lokal sıcaklık artışları, kayma altında degradasyon) MFI'yi yükseltebilir. Yani burada BA sadece dolgu gibi değil, proses koşullarında PP'nin molekül ağırlığını

düşüren bir etkiyi tetiklemiş olabilir. (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004).

En yüksek MFR değeri ise %95 PP+%5 BA bileşimine sahip C-1 kodlu numunede 8.16 g/10 dk olarak ölçülmüştür. Bu durum, PP matrisi içindeki BA oranlarındaki değişimlerin eriyik akışkanlığı üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermektedir. Genel olarak, BA miktarının artışı ile zincir hareketliliğinde ve eriyik viskozitesinde meydana gelen değişimler, MFR değerlerinin artması ya da azalması şeklinde kendini göstermektedir. Bu durum, formülasyon bileşiminin eriyik akışkanlığı açısından optimize edilebileceğini ve hedeflenen proses koşullarına (enjeksiyon, ekstrüzyon vb.) uygun MFR aralıklarının tasarım yoluyla seçilebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen erime akis hızı sonuçları, yoğunluk ve sertlik gibi diğer karakterizasyon verileri ile birlikte değerlendirildiğinde, PP/BA sistemlerinde morfoloji, zincir hareketliliği ve makro ölçekte proses edilebilirlik arasındaki ilişkinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Sonuç

Çalışma kapsamında; Polipropilen (PP) matris malzeme içerisine borik asit (BA) dolgu kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiş; yoğunluk, Shore-D sertlik ve Erime akış hızı (MFI) sonuçları literatürde yer alan benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

PP matrisine BA katkıları, ekstrüzyon ve sıcak-soğuk presleme yöntemi ile başarılı bir şekilde dahil edilerek; homojen dağılıma sahip numuneler elde edilmiş, yoğunluk ölçümlerindeki düşük standart sapmalar ve sonuçların tekrarlanabilirliği, üretim prosesinin kararlı olduğunu göstermiştir (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004).

Tüm formülasyonlarda saf PP'ye göre BA katkısı yoğunluk artışında daha baskın etki göstermiştir (Kabu & Akosman, 2013;

Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004). Shore-D sertlik değerleri; PP matrisi içindeki BA oranlarındaki değişimlerin, malzemenin sertlik yanıtını anlamlı ölçüde etkilediğini göstermektedir. PP/BA oran miktarının ayarlanmasıyla, sistemin hem daha yumuşak hem de daha sert çalışan kompozisyonlara doğru kaydırılabildiği gözlenmektedir. Elde edilen sertlik sonuçları, formülasyonlar arasındaki bileşim farklılıklarının sertlik üzerinde de belirgin rol oynadığını ortaya koymaktadır.

BA ilavesi, saf PP'ye kıyasla MFI'yi düşürmüştür. Bu sonuç, dolgu miktarının eriyik viskozitesini değiştirdiğini, dolayısıyla işlenebilirlik üzerinde dikkatle yönetilmesi gereken bir etki oluşturduğunu göstermektedir (Fu vd., 2008; Pehlivanlı, 2016, 2021; Weidenfeller vd., 2004).

Kaynakça

Dibek, E., Babayeva, A., Sezer Kürkçü, M., Akgüç Çöl, N., & Çöl, B. (2020). Bor içeren bazı biyoaktif bileşikler. *Boron*, 5(1), 29–39.

Dogahe, K. S., Akbari, S., & Kish, M. H. (2022). Physico-mechanical properties of poly(vinyl alcohol), poly(vinyl alcohol)/boric acid and PVA nanocomposites with amino-functionalized/pristine halloysite nanotubes. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(1), Article 51424.

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2019). *Borik asit – Ürün teknik bilgi föyü* (EYS FRM-ETİ-00 17 / 23/9/2014-02; rev. 2023/01). Eti Maden.

Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B., & Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961.

Honarvar, Z., Farhoodi, M., Khani, M. R., & Shojaee-Aliabadi, S. (2017). Antimicrobial chicken meat packaging based on carboxymethyl cellulose-coated polypropylene films containing *Zataria multiflora* essential oils. *International Journal of Nutrition and Food Engineering*, 11(8), 613–620.

Kabu, M., & Akosman, S. (2013). Biological effects of boron. In D. M. Whitacre (Ed.), *Reviews of environmental contamination and toxicology* (pp. 57–75). Springer.

Keyiş, D. (2020). *3,4-Dihidroksibenzaldehit ile modifiye edilmiş kitosanin hazırlanması ve sulu ortamlardan bor adsorpsiyon özelliklerinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi]. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Nazarenko, O. B., Melnikova, T. V., & Visakh, P. M. (2016). Thermal and mechanical characteristics of polymer composites based on epoxy resin, aluminium nanopowders and boric acid. *Journal of Physics: Conference Series*, 671, Article 012040.

Nielsen, F. H. (2014). Update on human health effects of boron. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 28(4), 383–387.

Pehlivanlı, Z. O. (2016). H₃BO₃/PP kompozitlerinin ısı iletim katsayılarının incelenmesi. *GU Journal of Science Part C*, 4(3), 91–96.

Pehlivanlı, Z. O. (2021). Manufacturing and characterization of polypropylene/boric acid composite. *Polymer Bulletin*, 78(7), 4033–4046.

Svishcheva, N. B., Khaptakhanova, P. A., Kasatov, D. A., & Uspenskii, S. A. (2021). Preparation and study of properties of boron-containing polymer based on lactic and boric acids. *Russian Chemical Bulletin*, 70(9), 1725–1728.

Tian, X., Sun, Y., Xie, H., Shi, B., Zhong, J., Sheng, D., & Yang, Y. (2022). Preparation of graphene oxide/waterborne polyurethane via boric acid cross-linked dopamine: Enhanced barrier and mechanical properties. *Frontiers in Materials*, *9fx*, Article 1046125.

Ünal, H., Yetgin, S. H., & Köse, S. (2023). Determination of mechanical performance of boric acid filled polypropylene based polymer composites. *Journal of Scientific Reports-A*, *55*, 185–192.

Weidenfeller, B., Höfer, M., & Schilling, F. R. (2004). Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *35*(4), 423–429.

Yılmaz, M. T. (2012). Minimum inhibitory and bactericidal concentrations of boron compounds against various bacterial strains. *Turkish Journal of Medical Sciences*, *42*(Ek 2), 1423–1429.

