

Aerosil ve Tinkal Parçacık Takviyesinin Yığın Kalıp Bileşiği (BMC) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Mert KILINÇEL^{1*}, Emrah YILMAZ²

¹Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Duzce, Türkiye

²Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Duzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2024
Düzeltilme: 05/07/2024
Kabul: 17/07/2024

Anahtar Kelimeler

BMC
Kompozit
Parçacık takviyesi
Tinkal
Füme silika

Article Info

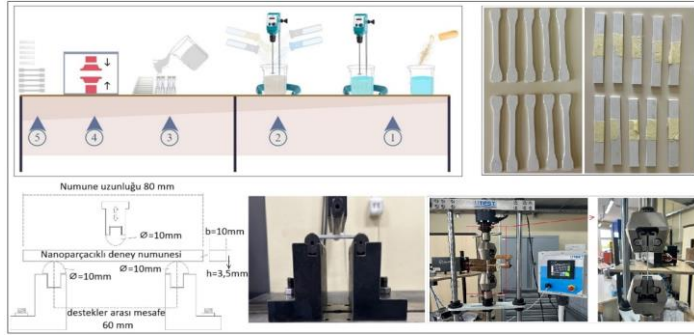
Research article
Received: 23/05/2024
Revision: 05/07/2024
Accepted: 17/07/2024

Keywords

BMC
Composite
Particle reinforcement
Tinkal
Fumed silica

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, elektrik panoları üretim tesisinde kullanılan reçetelere tinkal ve füme silika (aerosil) tozları eklenerek FRP kompozitlerin mekanik dayanımlarını artırmak amaçlanmıştır. Farklı oranlarda tinkal ve aerosil içeren BMC hamurları hazırlanmış, numuneler çekme ve eğme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, tinkal katkısının çekme dayanımında iyileştirme sağladığını, aerosil katkısının ise kırılabilirliği artırdığını göstermiştir.



Şekil A: Numune üretim ve test görselleri / Figure A: Sample production and test images

Önemli noktalar (Highlights):

- FRP'lerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için tinkal ve aerosil eklenmiştir. / Tinkal and aerosil were added to improve the mechanical properties of FRPs.
- %1 ve %2 tinkal, %1 ve %3 aerosil ile kompozitler hazırlanmıştır. / Composites were prepared with 1% and 2% tinkal, and 1% and 3% aerosil.
- En yüksek eğilme dayanımı %2 aerosil ile 69,98 MPa olarak kaydedilmiştir. / The maximum bending strength was recorded at 69.98 MPa with 2% aerosil.

Amaç (Aim):

Bu çalışmanın amacı, elektrik panosu üretim tesisinde kullanılan reçetelere tinkal ve füme silika (aerosil) tozları ekleyerek FRP kompozitlerin mekanik dayanımlarını artırmaktır. / The aim of this study is to improve the mechanical strength of FRP composites by adding tinkal and fumed silica (aerosil) powders to the formulations used in an electrical panel production facility.

Özgünlük (Originality):

Bu çalışma, FRP kompozitlerde daha az kullanılan tinkal ve aerosil tozlarının etkilerini değerlendirerek, bu katkı maddelerinin kompozit malzemeler üzerindeki potansiyellerine dair yeni bilgiler sunmaktadır. / This study evaluates the use of tinkal and aerosil powders, which are less commonly applied in FRP composites, and investigates their effects on both tensile and bending strengths, providing new insights into the potential of these additives for composite materials.

Bulgular (Results):

%2 tinkal, çekme dayanımını %4,9 ve %6,7 artırmış, aerosil ise kırılabilirliği artırmıştır. En yüksek eğilme dayanımı %2 aerosil ile 69,98 MPa olmuştur. / 2% tinkal improved tensile strength by 4.9% and 6.7%, while aerosil increased brittleness. The highest bending strength of 69.98 MPa was achieved with 2% aerosil.

Sonuç (Conclusion):

Tinkal ve aerosil, BMC kompozitlerin mekanik özelliklerini artırabilir. Tinkal çekme, aerosil ise eğilme dayanımını iyileştirmektedir. / Tinkal and aerosil can enhance the mechanical properties of BMC composites. Tinkal boosts tensile strength, while aerosil improves bending strength.



Aerosil ve Tinkal Parçacık Takviyesinin Yığın Kalıp Bileşiği (BMC) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Mert KILINÇEL^{1*} , Emrah YILMAZ²

¹Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Duzce, Türkiye

²Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Duzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2024
Düzeltilme: 05/07/2024
Kabul: 17/07/2024

Anahtar Kelimeler

BMC
Kompozit
Parçacık takviyesi
Tinkal
Füme silika

Öz

Fiber takviyeli plastikler (FRP) olarak bilinen kompozit malzemelerin yüksek dayanım ve düşük ağırlık gibi nitelikli özellikleri sebebi ile endüstride yaygın kullanım alanına sahiptir. Endüstrideki kullanım yerine göre FRP kompozitlerin birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan biri olan yığın kalıp bileşiği (BMC) yöntemi ise belirli ölçülerde kırılmış fiber takviyelerinin termoset matris malzemeleri ve çeşitli dolgu malzemeleri ile karıştırılarak hamur haline getirilmesi, ardından ısıtılmalı metal yapı kalıplarda şekillendirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu çalışmada elektrik panolarının üretildiği bir tesisin halihazırda üretim yaptığı reçetelerine tinkal ve füme silika (aerosil) tozları takviye edilerek son ürünlerin mekanik dayanımlarını artırmak amaçlı deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. BMC hamurlarının hazırlıkları aşamasında bu tozların literatürde yer alan kullanım oranları dikkate alınarak tinkal tozlarından kütlece %1 ve %2, aerosil tozlarından ise %1 ve %3 oranlarında katkı yapılmıştır. Elde edilen karışımlar FRP kompozitler için çekme ve eğme test standartlarına göre hazırlanmış olan metalik kalıplara dökülmüş ve 100°C sıcaklıkta 5 dakika süre ile kürlenmiştir. Elde edilen test numuneleri çekme, 3 nokta eğilme ve FTIR analizlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde kütlece %2 oranında takviye edilen tinkal parçacıklarının çekme dayanımı değerlerinde sırasıyla %4,9 ve %6,7 oranında iyileştirme sağladığı görülmüştür. Buna karşın aerosil parçacıklarının kompozit yapıyı bir miktar daha kırılğan hale getirdiği görülmüştür. Eğilme dayanımlarında ise eklenen katkıların tümünde belirli oranda iyileştirme gözlemlenirken en yüksek eğilme dayanımı değeri kütlece %2 oranında takviye edilen aerosil katkılı numunelerde 69,98 MPa olarak not edilmiştir. Bu bulgular, tinkal ve aerosil'in BMC kompozitlerin performansını artıracak potansiyel katkı maddeleri olduğunu göstermektedir.

Investigation of the Effects of Aerosil and Tincal Particle Reinforcement on the Mechanical Properties of Bulk Moulding Compound (BMC) Composites

Article Info

Research article
Received: 23/05/2024
Revision: 05/07/2024
Accepted: 17/07/2024

Keywords

BMC
Composite
Particle reinforcement
Tinkal
Fumed silica

Abstract

Fiber Reinforced Plastic (FRP) composites find wide applications in various industries due to their high strength and low weight properties. Depending on the application in the industry, there are several manufacturing methods for FRP composites. One of these methods, Bulk Moulding Compound (BMC), involves mixing chopped fibre reinforcements with thermoset matrix and various fillers to form a dough, which is then shaped in heated metal molds. In this study, an experimental investigation was conducted with the aim of enhancing the mechanical properties of the final products by reinforcing talc and fumed silica (aerosil) powders into the recipes of a facility producing electrical panels. During the preparation stage of BMC dough, tinkal powders were added at mass ratios of 1% and 2%, and aerosil powders were added at ratios of 1% and 3%, considering the usage rates reported in the literature. After this step mixtures were poured into metallic molds which prepared according to tensile and flexural testing standards for FRP composites and cured at 100°C for 5 minutes. The obtained test specimens were subjected to tensile, three-point bending, and FTIR analyses. Upon examination of the results, it was observed that tinkal particles reinforced at a mass ratio of 2% provided the highest improvement in tensile strength (5-10%). However, aerosil particles made the composite structure somewhat more brittle. In terms of flexural strength, while improvements were observed with all reinforced additives, the highest flexural stress value was noted as 69.98 MPa in the samples reinforced with 2% aerosil by weight. These findings suggest that Tincal and Aerosil could be potential additives to enhance the performance of BMC composites.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber takviyeli plastik (FRP) malzemeler, kara, hava ve deniz taşımacılığında yakıt tüketimini azaltma yetenekleri ve hafif yapısı nedeniyle tercih edilirken, hafiflik ve yüksek dayanıklılığın beklenildiği spor alanlarında da yüksek performans sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir [1,2]. Kompozit malzemeler, el yatırması [3,4], pultrüzyon çekme [5], reçine transfer kalıplama (RTM),[6], vakum infüzyon [7], otoklav kürlenme [8], levha kalıp bileşiği (SMC) [9], yığın kalıp bileşiği (BMC) [10] gibi çeşitli yöntemlere göre uygulamalarına göre üretilirler. BMC, inşaat, makine, ulaşım, medikal, elektrik ve elektronik endüstrilerinde özellikle küçük ve karmaşık geometriye sahip bileşenlerin seri üretimi için kolay üretim, hızlı üretim süreci, hafiflik ve düşük maliyet nedeniyle geniş bir şekilde kullanılmaktadır [11]. Yığın kalıp bileşimi olarak bilinen BMC hamuru ile üretilen kompozit malzemeler ise genellikle %5 ila %30 ağırlıkça lif içerir ve yüksek polyester dolguludur. Cam elyaf takviyeli polimer GFRP-BMC kompozitler, yaklaşık 3 ila 13 mm uzunluğunda %5 ila %30 kütle oranında kesilmiş lif içerir ve 35 ila %50'nin üzerinde kalsiyum karbonat (CaCO₃) tozu ile dolgusu içerir [12].

BMC kompozit malzemelerin endüstrideki kullanım yerlerine göre belirli özelliklerinin iyileştirilmesi beklenmektedir. Son ürünlerin kullanıldığı yer dikkate alınarak çekme, eğilme, sertlik ve aşınma dayanımları gibi mekanik özellikleri artırmaya yönelik farklı fiber ve parçacık takviyelerinin eklenmesi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca son ürün beklentileri arasında düşük ısı iletkenlik, düşük elektrik iletkenliği ve düşük ses geçirgenliği gibi özelliklerdir yer almaktadır [13–17].

Aerosil, bir tür silika nanoparçacığı olarak, yığın kalıp bileşiği (BMC) dahil olmak üzere reçine kompozitlerin çeşitli özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [18–22]. Aerosil'in yangın ve patlama önleyici formülasyonlarda akışkanlığı artırdığı ve sıvı kristal öncülerinin jelasyon süreçlerini etkilediği gösterilmiştir [23]. Aerosil nanoparçacıkları, kristalizasyon geçişi için entalpiyi artırırken aktivasyon enerjisini azaltmaktadır [24]. Aerosil, epoksi kompozitlerin termal stabilitesini artırdığı, proliz sürecini yavaşlattığı ve arayüzey etkileşimlerini güçlendirerek eğilme mukavemetini artırdığı görülmüştür [25] BMC hamuru üretiminde de Aerosil, mekanik özellikleri geliştirmek ve belirli karakteristikleri düzenlemek için kullanılmıştır. Rajae et al. [26] BMC malzemedeki, Aerosil'in

çekme, eğilme ve darbe dayanımı özelliklerini iyileştirdiği bildirmiştir. Bu çalışmalar, Aerosil'in kompozit malzemelerin performansını ve özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini vurgulamaktadır.

Bazı araştırmacılar, mekanik özellikleri iyileştirmek için reçine kompozitlere bor mineralleri eklemenin etkisini araştırmışlardır. Çalışmalar, polyester ve vinilester reçinelere Tinkal gibi bor minerali eklenmesi ile elde edilen kompozitlerin basınç ve yüzey sertliği gibi mekanik özelliklerini artırdığını tespit etmiştir [27]. Epoksi reçinelere bor nitrür (hBN ve cBN) ilavesinin kompozitlerin termal iletkenliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [28] Bor bileşiklerinin fenolik reçinelere dahil edilmesinin, elde edilen kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini artırdığı görülmüştür [29]. Yumuşak manyetik kompozitlerde bağlayıcı olarak borla modifiye edilmiş reçinelerin kullanılmasının, artan çapraz bağ yoğunluğu yoluyla kompozitlerin nihai özelliklerini artırmıştır [30]. Ayrıca bor bileşikleri, esneklik ve kırılabilirlik üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak, polimer kompozitlerin basınç dayanımı ve alev geciktiriciliğinin artırılması gibi özelliklerini optimize etmek için kullanılmıştır [31]. Bu iyileştirmeler, bor bileşiklerinin dikkatli bir şekilde seçilip reçine matrislerine dahil edilmesiyle, kompozitlerin özelliklerini çeşitli endüstriyel alanlardaki özel uygulama gereksinimlerini etkili bir şekilde karşılayacak şekilde uyarlamının mümkün olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, elektrik panolarının üretildiği bir tesisin halihazırda üretim yaptığı BMC hamur reçetelerine tinkal ve aerosil farklı oranlarda ikame edilerek BMC kompozitler üretilmiş ve bu kompozitlerin mekanik ve kimyasal davranışları araştırılmıştır. Çalışmanın özgün değeri, Türkiye'nin dünya bor rezervlerinin büyük bir kısmını elinde bulundurmasına rağmen, tinkal cevherinin termoset yapıları polimerlerde kullanımının sınırlı kalmış olması gerçeğine dayanarak, bu cevherin BMC kompozitlerdeki potansiyelini ortaya koymasındadır. Tinkal ve aerosil gibi malzemelerin farklı oranlarda ikame edilmesiyle üretilen BMC kompozitlerin mekanik ve kimyasal davranışlarının detaylı olarak incelenmesi, literatürde eksikliği hissedilen bir boşluğu doldurmada ve bu alanda gelecekte yapılacak araştırmalara önemli bir temel sağlamaktadır. Bu çalışma, tinkal cevherinin endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulmasına yönelik yeni perspektifler sunarak, Türkiye'nin bor rezervlerinin katma değerli ürünlere dönüştürülmesine katkıda bulunacaktır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel Ekipman (Experimental Equipment)

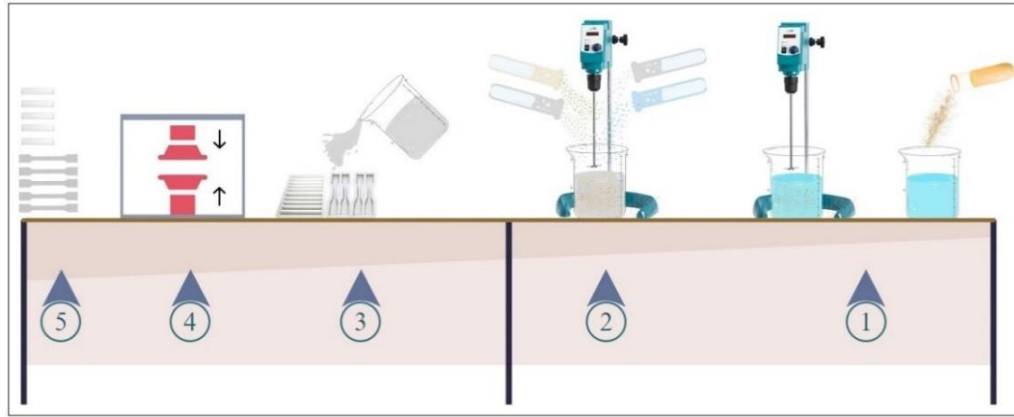
Bu çalışmada 6 mm-20 mm arası boyutlarda kırılmış cam elyaf liflerinin BMC polysteri ve çeşitli katkıları ile bir araya getirilmesi ile elde edilen BMC hamurlarına belirlenen oranlarda tinkal ve aerosil toz partikül ilaveleri yapılmıştır. Borun bir türevi olarak kullanılan %99 saflıktaki tinkal tozları Eti Maden kuruluşundan temin edilmiştir. Mekanik dayanıma etkisinin incelendiği bir diğer toz partikül olan silika malzemeden elde edilen aerosil tozları ise Ada Sevim firmasından temin edilmiştir. Hamurun son ürün haline gelmesi ve sertleşmesi için metil etil keton peroksit (MEK) kimyasalı kullanılmıştır.

2.2. Numune Hazırlama (Sample Preparation)

Çalışmada Federal Elektrik A.Ş. firmasının endüstriye hizmet verdiği üretim aşamalarının

standart prosedürüne ek olarak literatürde verilen değerler dikkate alınarak BMC hamur reçetelerine tinkal tozlarından kütlece %1 ve %2, aerosil tozlarından ise %1 ve %3 oranlarında katkı yapılmıştır. Bu katkıları firma önerisi üzerine 4000d/dk karıştırma hızında 5 dakika süre ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar çekme ve 3 nokta eğilme testi standartlarına uygun şekillerde işlenmiş metal yapıları kalıplara dökülmüştür. Ardından 5 dakika süre boyunca 100°C sıcaklıkta kürlenmesi sağlanmıştır. Her test için 10'ar tane test tekrar numunesi hazırlanmıştır. Hamur hazırlanması aşamasından test numunesi eldesine kadar geçen süreci anlatan şematik gösterim Şekil 1'de verilmiştir.

BMC hamur reçetelerinin oluşturulmasında dikkate alınan bileşenler ve bunların karışımdaki kütlece oranları firmanın test numunesi için verdiği ölçülere göre gerçekleştirilmiştir. Bu hamurların bileşenlerini içeren değerler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Toz partikül takviyeli numune hazırlanması aşamalarının şematik gösterimi (Schematic representation of the stages of sample preparation with particle-reinforced powder)

Tablo 1. BMC hamur bileşenlerin kütlece yüzde oranları (Mass percentage of the components of the BMC dough)

Bileşenler	Kütlece (%)
Polyester	15-20
Polistiren Çözeltisi	4-8
Acık Gri Pigment Pasta	1-3
Çinko Stearat	1-5
Magnezyum Oksit	1-4
CH-SO-Al Peroksit	1-4
Alüminyum Hidroksit	25-35
Kalsit (CaCO ₃)5 mikron	20-28
20 mm Kırpık cam elyaf	3-6
12 mm Kırpık cam elyaf	3-6
6 mm Kırpık cam elyaf	3-6

2.3. Test Yöntemleri (Test Methods)

Çalışmada mekanik özelliklerin incelenmesi için çekme testi ve 3 nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için Utest marka

universal bir çekme test cihazı kullanılmıştır. Eğme testi için de yine Utest marka 7012-50 kN model bir eğme test cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri lif takviyeli malzemeler için ilgili standart olması

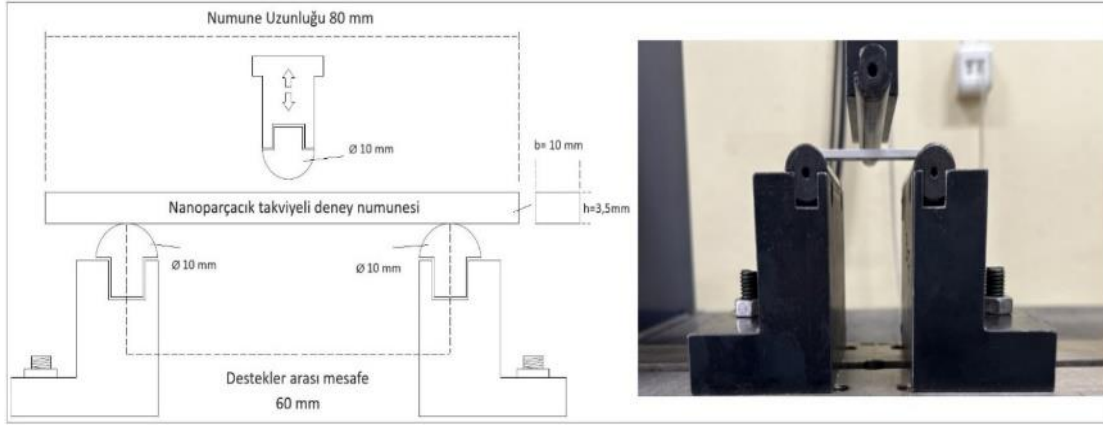
sebebi ile ISO 527-4 standardına göre gerçekleştirildiği düzeneğin resmini içeren görsel gerçekleştirilmiştir. Çekme testinin Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Çekme testi düzeneği görseli (Tensile test setup caption)

Modifikasyonlar sonucu elde edilen ürünlerin eğilme testleri elektronik sektöründe hizmet veren kuruluşun hizmet sektörü de dikkate alınarak

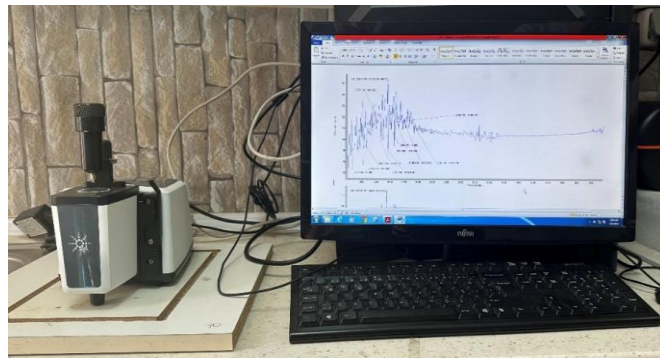
ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilmiştir. 3 nokta eğilme testinin gerçekleştirildiği düzeneğin görseli ve şematik çizimi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. 3 nokta eğilme testi düzeneği şematik çizim ve görseli (Schematic diagram and image of the 3-point bending test setup)

BMC hamuruna takviye edilen toz partiküllerin, katkısız haldeki referans numunelerden farklı olarak kimyasal yapısını incelemek için FT-IR analizleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında Agilent

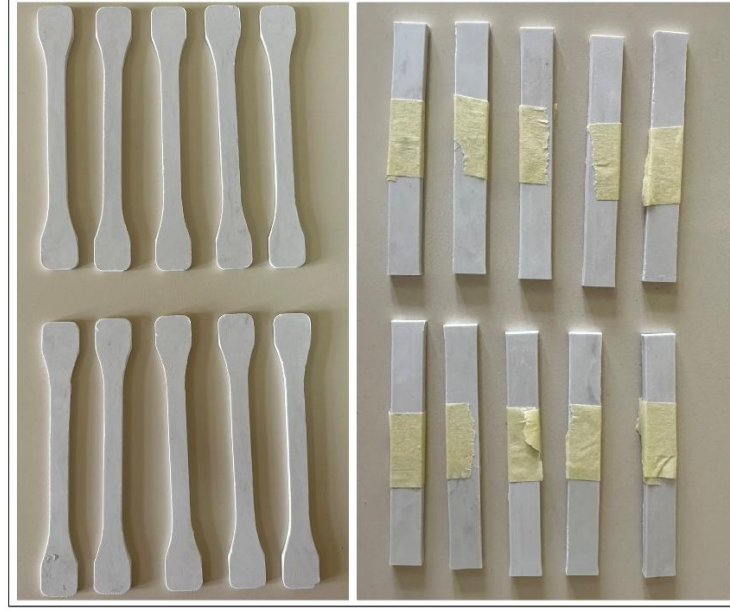
Technologies Cary-630 FTIR cihazı kullanılmıştır. Numunelerin FT-IR çekimlerinin gerçekleştirildiği cihazın görseli ise Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. FT-IR analizlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği (Experimental setup for FT-IR analyses)

Çekme testleri için ISO 527-4 standardı dikkate alınarak hazırlanan metal kalıplar içinde üretimler yapılmıştır. Böylece kalıptan çıkan numuneler çekme testlerinin doğrudan uygulanabilmesi için hazır halde elde edilmiştir. Ancak eğilme testi için ASTM D790 standardına göre hazırlanan

numuneler kürlenme işleminin tamamlanmasının ardından plakalardan kesilerek elde edilmiştir. Hem çekme testi hem de 3 nokta eğilme testi için hazırlanan numunelerine ait görseller Şekil 5’ te verilmiştir.

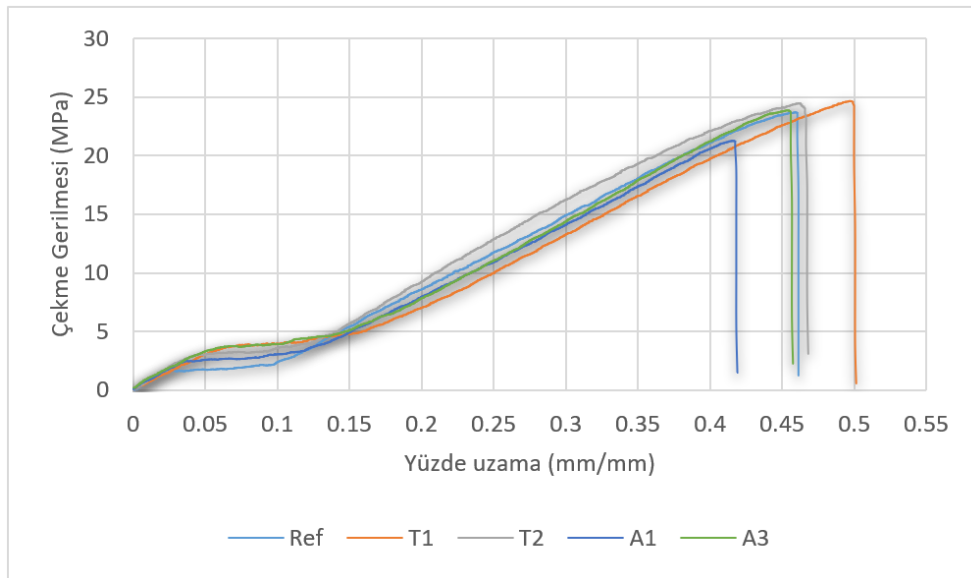


Şekil 5. İlgili standartlara göre hazırlanan çekme ve eğilme testi numunelerine ait görseller (Images of tensile and bending test specimens prepared according to relevant standards)

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, BMC hamurlara farklı oranlarda Tinkal (%1 ve %2) ve Aerosil (%1 ve %3) eklenerek hazırlanan dört farklı kompozit

malzemenin çekme ve eğilme dayanımları, referans malzeme ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve BMC numunelerin test sonuçları Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.



Şekil 6. BMC kompozitlerin numunelerinin çekme eğilme eğrileri (Tensile-bending curves of BMC composite specimens)

Şekil 6'ya göre, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, tinkal ve aerosil eklenmiş BMC hamurlarının yüzde uzama (mm/mm) ile çekme dayanımı (MPa) arasındaki ilişki, katkı maddelerinin konsantrasyonlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Referans malzemenin çekme dayanımı ortalama olarak 22,52 MPa olarak

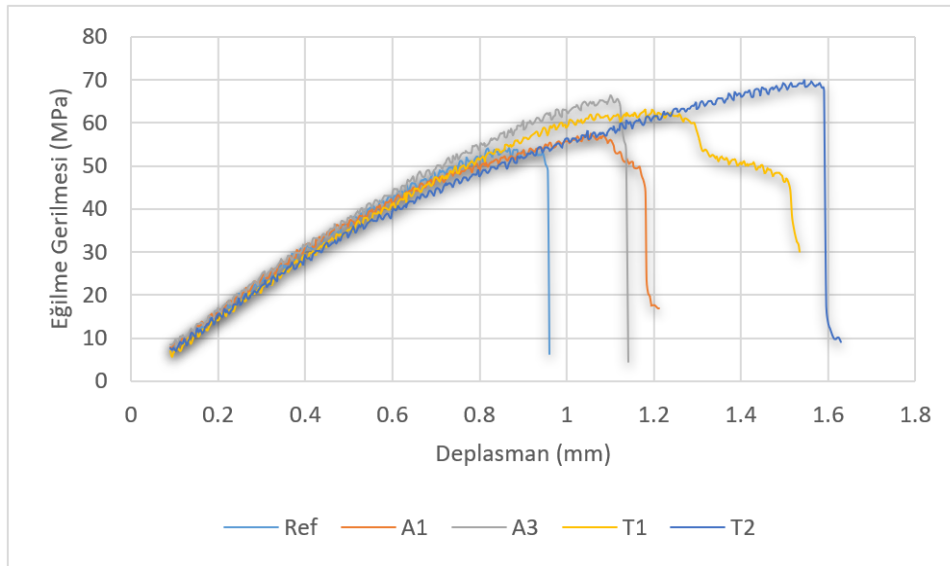
ölçülmüştür. Referans malzeme ile karşılaştırıldığında, tinkal içeren BMC kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinde sırasıyla %4,9 ve %6,7 oranında artış hesaplanmıştır. Özellikle %2 Tinkal eklenmesiyle en yüksek çekme dayanımı değerine ulaşılmıştır.

Tablo 2. Test numunelerinin çekme ve 3 nokta eğilme dayanım değerleri (Tensile and 3-point bending strength values of the test specimens)

Tinkal ve Aerosil İkameli BMC		
Numune adı	Çekme dayanım (MPa)	Eğilme dayanım (MPa)
Ref	22,52 ± 2,41	54,15
T1	23,63 ± 2,00	62,98
T2	24,03 ± 4,81	69,98
A2	21,29 ± 2,30	57,45
A3	21,37 ± 2,97	66,38

Aerosil eklenmiş BMC kompozitlerin çekme dayanım değerleri sırasıyla 21,29 MPa ve 21,37 MPa olarak tespit edilmiş ve referans malzemeye kıyasla sırasıyla %5,5 ve %5,1 çekme dayanımları oranında azalmıştır. Şekil 5 incelendiğinde, özellikle düşük konsantrasyonlarda Aerosil eklenmesinin BMC kompozitlerin çekme

dayanımını artırmada etkili olmadığını görülmüştür. Ayrıca, daha yüksek Aerosil konsantrasyonuna rağmen sadece minimal bir çekme dayanım düşüşü görülmesi, Aerosil'in malzeme yapısal bütünlüğü üzerinde beklenen pozitif etkiyi sağlamada sınırlı kaldığını göstermiştir.



Şekil 7. BMC kompozitlerin 3 nokta eğilme test eğrileri (3-point bending test curves of BMC composites)

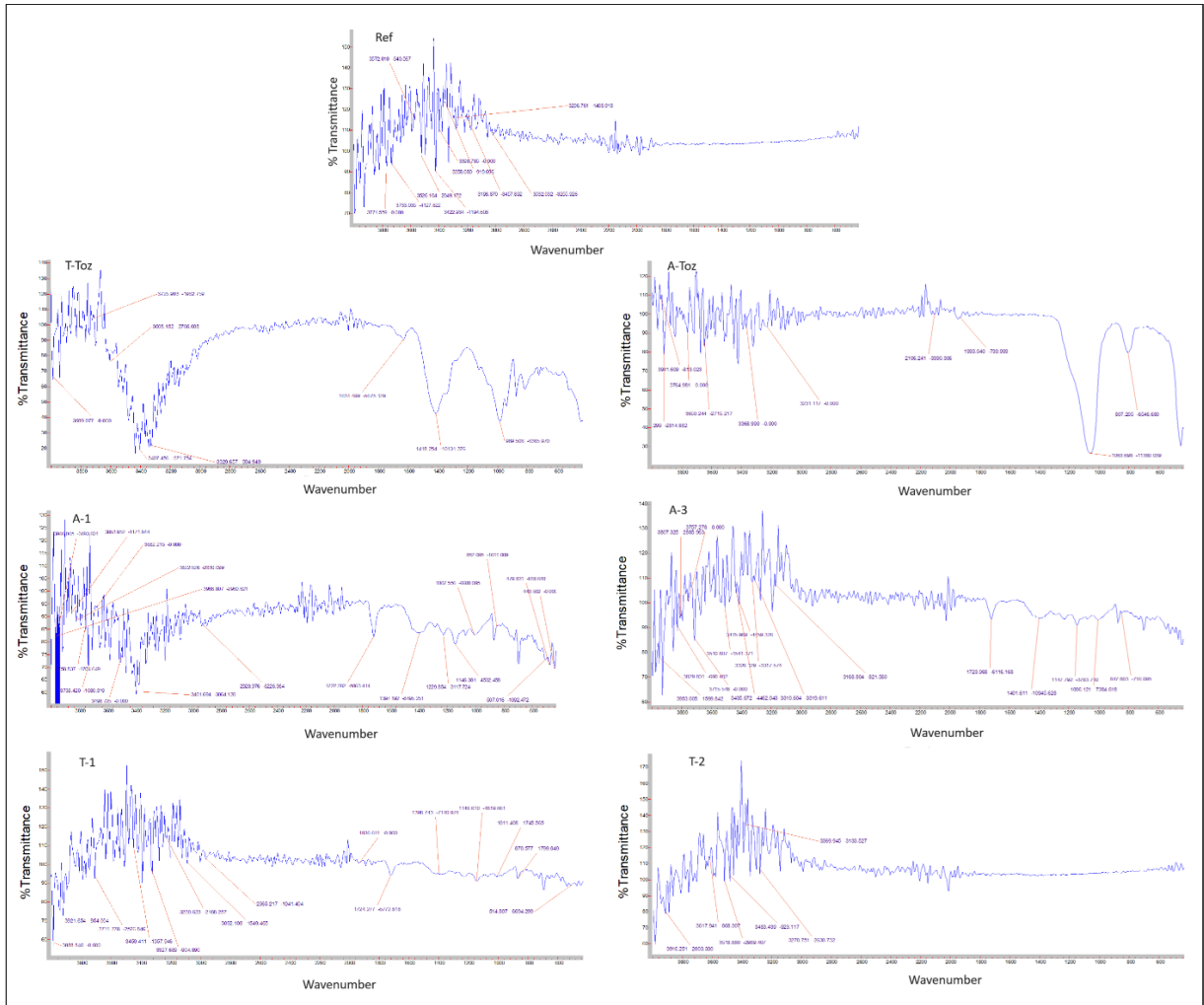
Şekil 7'de BMC reçinesine eklenen Tinkal ve Aerosil katkı maddelerinin BMC kompozitlerin eğilme özelliklerini nasıl etkilediği gösterilmiştir. %2 tinkal ilaveli BMC kompozit, referans malzemenin eğilme dayanımı değerine kıyasla yaklaşık %22.6 artışla 66,38 MPa değerine ulaşırken, %1 tinkal ikameli kompozit %6,1 artışla

57,45 MPa eğilme dayanımı sergilemiştir. Bu durum, tinkal'in, özellikle daha yüksek konsantrasyonlarda, BMC hamurunun yapısal bütünlüğünü ve böylece yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Diğer yandan %1 aerosil ilaveli numunelerde %16,3 oranında bir artış ile 62,98 MPa dayanım değerine

ulaşılırken, özellikle %3 aerosil ilave edildiğinde, diğer tüm örneklerden daha yüksek bir eğilme dayanımı olarak %29,2 artış ile 69,98 MPa değerine ulaşılmış ve maksimum dayanım değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu değerlere göre aerosil konsantrasyonunun malzemenin yapısal bütünlüğünü destekleyerek, eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabileceği düşünülmektedir.

Tinkal, özellikle daha yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabilmektedir. Buna karşılık, aerosil'in etkisi daha karmaşık olup, belirli bir konsantrasyonun üstünde olumsuz sonuçlar gösterebilmektedir. Ancak, tinkal ve aerosil uygun konsantrasyonlarda kullanıldıklarında, malzemenin eğilme dayanımını artırmada etkili bulunmuşlardır.

Şekil 8 incelendiğinde FT-IR spektroskopi sonuçları, tinkal ikameli T1 (%1 Tinkal) ve T2 (%2 Tinkal) örneklerinde referans malzemeye (Ref) göre belirgin kimyasal yapı değişikliklerini ortaya koymuştur. Özellikle 1000 cm⁻¹ ile 1200 cm⁻¹ arasındaki silika karakteristik bantlar, Tinkal eklenmesiyle daha belirgin ve yoğun hale gelmiştir. Bu gözlem, %2 Tinkal içeren T2 örneğinde daha da ağırlıklıdır, bu da Tinkal konsantrasyonunun artışının silika yapısal entegrasyonunu teşvik ettiğini göstermektedir. Ayrıca, yaklaşık 3400 cm⁻¹'de hidroksil gruplarına ait geniş bantlar, her iki Tinkal ikameli örnekte de genişleşmiş ve yoğunlaşmıştır, bu da tinkal'in hidrojen bağları oluşturma potansiyelinin ve dolayısıyla yapısal bütünlüğün arttığını işaret etmektedir. Bu bulgular, yüksek silika içeriği gerektiren uygulamalarda tinkal'in optimizasyonunun, malzemenin mekanik özelliklerini artırabileceğini göstermektedir.



Şekil 8. Katkılı ve katkısız BMC test numuneleri ve toz parçacıkların FT-IR spektrumları (FT-IR spectra of reinforced and unreinforced BMC test specimens and powder particles)

Şekil 8'e göre, Aerosil içeren A1 (%1 Aerosil) ve A-3 (%3 Aerosil) örneklerinin FT-IR spektrumları, referans malzemeye kıyasla önemli yapısal değişiklikleri açığa çıkarmaktadır. Özellikle 1100 cm⁻¹ civarında silika ile ilişkili bantların A3 örneğindeki belirgin yoğunluk artışı, Aerosil'in yüksek derecede matrise entegrasyonunu ve muhtemelen yapısal düzenlemelerin gerçekleştiğini göstermektedir. Hidroksil gruplarına ait bantlar da her iki Aerosil ikameli örnekte genişlemiş ve yoğunlaşmıştır, bu da serbest hidroksil gruplarının artışı ve bunların malzeme matrisi ile daha fazla hidrojen bağları oluşturması sonucunu doğurmuştur. Bu sonuçlar, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda Aerosil konsantrasyonunun malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli malzeme ve polyester bağlayıcılar kullanılarak BMC yöntemi ile gerçekleştirilen üretimlerde tinkal ve aerosil toz takviyelerinin son üründeki mekanik ve kimyasal davranışlarına etkileri incelenmiştir. Burada incelenen ürünler elektronik ekipmanların dış koruyucu gövdesi olarak kullanılan malzemeleri üreten bir firmanın hizmet verdiği ürünlerdir. Ürünlerin hammadde hazırlık aşamasında BMC hamurların hazırlanması için tinkal ve aerosil tozlarının literatürde yer alan kullanım oranları dikkate alınarak tinkal tozlarından kütlece %1 ve %2, aerosil tozlarından ise %1 ve %3 oranlarında katkı yapılmıştır. Elde edilen karışımlar FRP kompozitler için çekme ve eğme test standartlarına göre hazırlanmış olan metalik kalıplara dökülmüş ve 100°C sıcaklıkta 5 dakika süre ile kürlenmiştir. Kürlenmiş ürünler FRP malzemeler için ilgili standartlara göre çekme ve eğme testlerine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonuçlarından elde edilen çekme dayanımı dayanımları incelendiğinde, Tinkal'in özellikle %2 oranında kullanıldığında BMC kompozitlerde çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Tinkal eklenmiş BMC kompozitlerin çekme dayanımı değerleri, referans malzemeye kıyasla %4,9 ve %6,7 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte, Aerosil eklenmiş BMC kompozitlerde çekme dayanımında azalma gözlemlenmiş olup, düşük konsantrasyonlarda bile malzemenin çekme dayanımını artırmada etkili olamamıştır. Bu durum,

Aerosil'in belirli bir konsantrasyonun üzerinde olumsuz etki gösterebileceğini ortaya koymuştur.

Eğilme dayanımı testlerinde, Tinkal'in %1 ve %2 oranlarında eklenmesi, BMC kompozitlerin eğilme dayanımını sırasıyla %6,1 ve %22,6 oranında artırmıştır. Bu sonuçlar, Tinkal'in özellikle daha yüksek konsantrasyonlarda, BMC hamurunun yapısal bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Aerosil eklenmiş BMC kompozitlerde ise eğilme dayanımında A1 ve A3 numunelerinde sırasıyla %16,3 ve %29,2 oranlarında bir artış gözlemlenmiştir. Bu da yüksek Aerosil konsantrasyonunun malzemenin yapısal bütünlüğünü destekleyerek eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, Tinkal ve Aerosil'in uygun konsantrasyonlarda kullanılması, BMC kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini geliştirmekte etkili bulunmuştur. Tinkal, özellikle yüksek konsantrasyonlarda, kompozitlerin eğilme dayanımını önemli ölçüde artırırken, Aerosil'in etkisi daha karmaşık olup belirli bir konsantrasyonun üstünde olumsuz sonuçlar sergileyebilmektedir. Bu bulgular, Tinkal ve Aerosil'in, BMC kompozitlerin performansını artırmak için potansiyel katkı maddeleri olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, malzeme tasarımı ve mühendisliği uygulamalarında katkı maddelerinin dikkatli seçimi ve optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmada üretim ve hammadde desteği sunan Federal Elektrik A.Ş. firmasına teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declare that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mert KILINÇEL: Araştırmanın tasarımını yapmış, deneylerin planlanması ve yürütülmesi ile sonuçların değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

He designed the research and contributed to the planning and execution of the experiments and the evaluation of the results.

Emrah YILMAZ: Literatür taraması yapmış, verilerin analizi ve makalenin yazımı ile son düzenlemelerine katkıda bulunmuştur.

He conducted literature review, analyzed the data and contributed to the writing and final editing of the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Xu J, Mkaddem A, El Mansori M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. *Compos Struct* 2016;135:316–38. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>.
- [2] Frigione M, Lettieri M. Durability issues and challenges for material advancements in FRP employed in the construction industry. *Polymers (Basel)*2018;10.<https://doi.org/10.3390/polym10030247>.
- [3] Haripriya V, Kumbha S, Manickam S, Arul Jeevan TS. Study the materials behavior for kevlar chopped mate with kenef fiber composites by hand layup technique. *Mater Today Proc* 2022;69:650–3. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.545>.
- [4] Urtekin L., Gunes D., Yılan F., Çanlı M., The Effect of Layers on the Unidirectional Carbon Fibers of the Reinforced Polyester Resin Matrix Composite Material *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10 (2022) 495–503.
- [5] Harati Khalilabad E, Ruiz Empanza A, De Caso F, Roghani H, Khodadadi N, Nanni A. Characterization Specifications for FRP Pultruded Materials: From Constituents to Pultruded Profiles. *Fibers*2023;11.<https://doi.org/10.3390/fib11110093>.
- [6] Mendikute J, Plazaola J, Baskaran M, Zugasti E, Aretxabaleta L, Aurrekoetxea J. Impregnation quality diagnosis in Resin Transfer Moulding by machine learning. *Composite Part B Eng* 2021;221. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.10897>.
- [7] Lionetto F, Moscatello A, Totaro G, Raffone M, Maffezzoli A. Experimental and numerical study of vacuum resin infusion of stiffened carbon fiber reinforced panels. *Materials* 2020;13:1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13214800>.
- [8] Joshi SJ, Patel KS, Shah DB, Patel KM, Mawandiya BK. Development and performance analysis of out-of-autoclave curing process for CFRP composites. *Advances in Materials and Processing Technologies* 2022;8:1593–603. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1946754>.
- [9] Gortner F, Schöffler A, Fischer-Schuch J, Mitschang P. Use of bio-based and renewable materials for sheet molding compounds (SMC) – Mechanical properties and susceptibility to fungal decay. *Composites Part C: Open Access* 2022;7. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100242>.
- [10] Lafranche E, Cilleruelo L, Ryckebusch M, Krawczak P. A Novel Adaptive Process Control for Injection Moulding Of BMC And CIC Polyester Compounds. vol. 14. 2005.
- [11] Rajae P, Ashenai Ghasemi F, Fasihi M, Saberian M. Effect of styrene-butadiene rubber and fumed silica nano-filler on the microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin. *Compos B Eng* 2019;173. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.014>.
- [12] Faudree MC, Nishi Y, Salvia M. Increasing Impact Strength of a Short Glass Fiber Compression Molded BMC by Shortening Fibers without Change in Equipment. *Materials* 2022;15. <https://doi.org/10.3390/ma15031145>.
- [13] Faudree MC, Nishi Y. Tensile strength enhancement by shortening glass fibers with sub-millimeter length in bulk molding polymer compound. *Mater Trans* 2010;51. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2010121>.
- [14] Faulkner M, Zhao LS, Barrett S, Liu LN. Self-Assembly Stability and Variability of Bacterial Microcompartment Shell Proteins in Response to the Environmental Change. *Nanoscale Res Lett* 2019;14. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-2884-3>.
- [15] Ferreira F V., Lona LMF, Pinheiro IF, de Souza SF, Mei LHI. Polymer composites reinforced with natural fibers and nanocellulose in the automotive industry: A short review. *Journal of Composites Science*2019;3. <https://doi.org/10.3390/jcs3020051>.
- [16] Cao Y, Fukumoto I. Evaluation of Mechanical Properties of Injection Molding Composites Reinforced by Bagasse Fiber. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering* 2007;1. <https://doi.org/10.1299/jmmp.1.1209>.

- [17] Ahmad Fauzi AA, Osman AF, Alrashdi AA, Mustafa Z, Abdul Halim KA. On the Use of Dolomite as a Mineral Filler and Co-Filler in the Field of Polymer Composites: A Review. *Polymers (Basel)* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/polym14142843>.
- [18] Marinkovic A, Radoman T, Dzunuzovic E, Dzunuzovic J, Spasojevic P, Isailovic B, et al. Mechanical properties of composites based on unsaturated polyester resins obtained by chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). *Hem Ind* 2013;67. <https://doi.org/10.2298/hemind130930077m>.
- [19] Morote-Martínez V, Pascual-Sánchez V, Martín-Martínez JM. Improvement in mechanical and structural integrity of natural stone by applying unsaturated polyester resin-nanosilica hybrid thin coating. *Eur Polym J* 2008;44. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.07.027>.
- [20] Mirabedini SM, Kiamanesh A. The effect of micro and nano-sized particles on mechanical and adhesion properties of a clear polyester powder coating. *Prog Org Coat* 2013;76. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.07.009>.
- [21] Kabakçı G, Kılınçel M, Tezel GB. Nanofiller Effects on the Isothermal Curing Kinetics of Epoxy Resin. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 2023;57:1490–502. <https://doi.org/10.1134/S004057952306009X>.
- [22] Kabakçı G, Kılınçel M, Tezel GB. Thermo-mechanical behaviours investigation of Nano-Sized Al₂O₃, TiO₂, and Graphene Nanoplatelet Reinforced Epoxy Composites. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2024;12:1201–16. <https://doi.org/10.29130/dubited.1422620>.
- [23] Saenko E V., Huo Y, Shamsutdinov AS, Kondrashova NB, Valtsifer I V., Valtsifer VA. Mesoporous Hydrophobic Silica Nanoparticles as Flow-Enhancing Additives for Fire and Explosion Suppression Formulations. *ACS Appl Nano Mater* 2020;3. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b02309>.
- [24] Sharma D, Iannacchione G. Kinetics of induced crystallization of the LC1-xSilx system. *Journal of Physical Chemistry B* 2007;111. <https://doi.org/10.1021/jp067736o>.
- [25] Kim KM, Kim H, Kim HJ. Enhancing thermo-mechanical properties of epoxy composites using fumed silica with different surface treatment. *Polymers (Basel)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/polym13162691>.
- [26] Rajae P, Ashenai Ghasemi F, Fasihi M, Saberian M. Effect of styrene-butadiene rubber and fumed silica nano-filler on the microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin. *Compos B Eng* 2019;173. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.014>.
- [27] Yılmaz E, Aydoğmuş E, Demir A. Life cycle assessment and characterization of tincal ore reinforced polyester and vinylester composites. *Journal of the Turkish Chemical Society Section B: Chemical Engineering* 2022;5:183–94.
- [28] Yung KC, Liem H. Enhanced thermal conductivity of boron nitride epoxy-matrix composite through multi-modal particle size mixing. *J Appl Polym Sci* 2007;106. <https://doi.org/10.1002/app.27027>.
- [29] Wang S, Jing X, Wang Y, Si J. Synthesis and characterization of novel phenolic resins containing aryl-boron backbone and their utilization in polymeric composites with improved thermal and mechanical properties. *Polym Adv Technol* 2014;25. <https://doi.org/10.1002/pat.3216>.
- [30] Chai Y, Liu J, Zhao Y, Yan N. Characterization of Modified Phenol Formaldehyde Resole Resins Synthesized in Situ with Various Boron Compounds. *Ind Eng Chem Res* 2016;55. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b02156>.
- [31] Uygunoglu T, Gunes I, Brostow W. Physical and mechanical properties of polymer composites with high content of wastes including boron. *Materials Research* 2015;18. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.009815>.