



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Buğday Samanı ve Kenevir Lifi ile Üretilen Miselyum Biyokompozitleri

Mycelium Biocomposites Produced by Using Wheat Straw and Hemp Fiber

Merve Mocan *^{ORCID}, Rukiye Akış^{ORCID}, Nurseda Akgürsu^{ORCID}, İlayda Albayrak^{ORCID}

Gebze Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Gebze/Kocaeli, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: mmocan@gtu.edu.tr

Öz

Genleştirilmiş polistiren (EPS) köpük, dayanıklılığı, hafifliği ve uygun maliyeti nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir ambalaj malzemesidir. Bununla birlikte düşük yoğunluğu, geri dönüşümünün ekonomik sebeplerle tercih edilmemesine yol açmakta ve doğada bozunmayan yapısı nedeniyle çevrede yüksek miktarda plastik kirliliğine sebep olmaktadır. Bundan dolayı, birçok ülke EPS ambalaj ürünlerini yasaklamaya başlamıştır. Çevresel etkiyi azaltmak için EPS'nin biyo-esaslı ve biyobozunur alternatiflerle değiştirilmesi gerekmektedir. Miselyum esaslı malzemeler tamamen biyo-esaslı ve biyobozunur oldukları için, boyutsal kararlılığa sahip köpüğümsü yapısı ile EPS ambalaj için güçlü bir aday olarak sunulabilirler. Ancak, malzeme özelliklerinin halen geliştirilmesi gerekmektedir. Besiyeri olarak kullanılan doğal liflerin türü ve boyutu değiştirilerek, miselyum esaslı biyokompozitlerin son ürün özellikleri ayarlanabilir ve geliştirilebilir. Bu çalışmada, *Pleurotus ostreatus* miselyumu, kenevir lifi ve buğday samanı kullanılarak tamamen biyo-esaslı ve biyobozunur biyokompozit köpük ürünleri üretilmiştir. Bu doğal liflerin türünü ve boyutunu değiştirilerek elde edilen biyokompozitlerin özellikleri incelenmiştir. *Pleurotus ostreatus* miselyumuna kenevir lifi ve buğday samanının ayrı ayrı ve birlikte ve farklı boyutlarda katılması ile malzemelerin yapısal, mekanik, ısı, morfolojik, su emme ve yanıcılık özelliklerine etkisi ilk kez karakterize edilmiş olup besiyer çeşidine göre basma dayanımı 21-30 kPa, su emme %147-348 arasında değişmiş, 234-552 °C'ye kadar sıcaklık dayanımı göstermiş, 90 saniyeye kadar süren yanma testinde kenevir içeren numunelerde tutuşma görülmemiş olup kenevir ve buğday samanının birlikte kullanılması ürün özelliklerinin geliştirilmesinde sinerjistik etki tespit edilmiştir. Miselyum esaslı biyokompozitlerin petrol esaslı ve doğada bozunmayan polimerlere sürdürülebilir bir alternatif olarak güçlü bir potansiyel taşıdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Miselyum Biyokompozit, Tarım Atıkları, Buğday Samanı, Kenevir Lifi, Sürdürülebilir Biyo-esaslı Biyobozunur Köpük Ambalaj, Döngüsel Ekonomi.*

Abstract

Expanded polystyrene (EPS) foam is a frequently preferred packaging material due to its durability, lightness and affordable cost. However, its low density makes recycling not preferred for economic reasons, and due to its non-biodegradable nature, it causes high amounts of plastic pollution in the environment. Therefore, many countries have started to ban EPS packaging products. EPS needs to be replaced with bio-based and biodegradable alternatives to reduce environmental impact. Since mycelium-based materials are completely bio-based and biodegradable, they can be presented as a strong candidate for EPS packaging with their dimensionally stable foam structure. However, material properties still need to be improved. By changing the type and size of natural fibers used as medium, the end product properties of mycelium-based biocomposites can be adjusted and improved. In this study, completely bio-based and biodegradable biocomposite foam products were produced using *Pleurotus ostreatus* mycelium, hemp fiber and wheat straw. For the first time, the effects of adding hemp fiber and wheat straw separately, together, and in different sizes to *Pleurotus ostreatus* mycelium on the structural, mechanical, thermal, morphological, water absorption, and flammability properties of materials have been characterized. Depending on the substrate type, the compression strength ranged from 21 to 30 kPa, while water absorption varied between 147% and 348%. The materials exhibited temperature resistance up to 234-552°C. No ignition was observed in samples containing hemp during the combustion test lasting up to 90 seconds. Furthermore, in the improvement of product properties a synergistic effect was identified when hemp and wheat straw were used together and it has been shown that mycelium-based biocomposites have the potential as a sustainable alternative to petroleum-based and non-biodegradable polymers.

Keywords: *Mycelium Biocomposites, Agricultural Residues, Wheat Straw, Hemp Fiber, Sustainable Bio-based Biodegradable Foam Packaging, Circular Economy.*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Expanded polystyrene (EPS) is a commonly used plastic packaging material due to its lightweight, insulation properties,

and impact resistance, benefiting food preservation and transportation. However, its non-biodegradable nature, low recycling rates, and potential health risks linked to its production

chemicals have raised environmental concerns, leading to EPS bans in various countries[1]. This has triggered the search for alternative packaging materials to address the growing need for sustainable packaging solutions[2].

Mycelium biocomposites (BCs), as being strong alternatives to non-biodegradable packaging, are created by allowing mycelium, the filamentous substance in fungal roots, to grow on organic materials such as wheat straw, sawdust, wood chips, cotton, and rice husk [3]. As the fungus colonizes the substrate, its hyphae absorb nutrients and form connections within the organic material's cellulose, hemicellulose, and lignin-rich components [4]. After full colonization, the substrate undergoes heat treatment to deactivate the organism. The resulting product is mycelium biocomposite, which exhibits an inert, lightweight and foamy structure[5]. Mycelium-based materials have gained attention especially for being fully bio-based, possessing a lightweight foam-like structure with sufficient dimensional stability, cost-effective raw materials, high fire resistance, and thermal and sound insulation properties. These materials also offer a complete biodegradability which enables organic recycling and their low carbon and energy footprint that aid in combating global warming by utilizing low-energy production and agricultural residues without competing with food resources[4]. Despite the potential, further development is needed to match the properties of petroleum-based plastics for a complete replacement.

This research aims to investigate the production of mycelium biocomposites by valorizing agricultural residues by blending hemp fibers and wheat straw with *Pleurotus ostreatus* mycelium, known for rapid growth[6]. The compatibility known between hemp fibers and mycelium enhances material properties in composites, resulting in increased bending strength[7]. Wheat straw supports mycelium growth and enhances composite durability. While prior research explores natural fibers' roles in mycelium growth, this study bridges gaps by investigating the final products' properties [8]. This study investigates mycelium biocomposites utilizing hemp and wheat straw independently and in combination, examining the influence of various wheat straw sizes on the final product. The study analyzes chemical structure, morphological, mechanical, thermal, water absorption, and flammability characteristics to gauge the potential of these biocomposites in practical applications. In the literature, a mycelium biocomposite study encompassing all of these characterizations for hemp and wheat straw substrates has not been observed.

Materials and Methods

Materials: *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom) mycelium, was purchased from the Yalova Atatürk Horticultural Central Research Institute, Türkiye. Wheat straw kindly provided from a farm in Manisa, while hemp fibers were kindly provided by Ketene Bitkisel Üretim Tekstil San. Tic. A.Ş. Türkiye. Wheat straw was ground to two separate sizes, thick (30.34 ± 5.86 mm) and thin (8.90 ± 7.10 mm), using a Demsan Brader HC 1500 GR blade mill at standard speed for 15 and 30 seconds, respectively. Hemp was reduced to a single size (34.20 ± 5.60 mm) by cutting with scissors. (Figure 1). The lengths and standard deviation values were determined by measuring at least 100 samples using calipers.

Production of Mycelium Biocomposites: The wheat straw and hemp, intended for use as substrates, underwent sterilization at 121°C for 40 minutes. All equipment, including the workbench and gloves, was sterilized with a 95% ethyl alcohol solution to prevent sample contamination. The mycelium was combined

with the substrate in a sterilized plastic container and left to grow under dark conditions at 25°C and 80% relative humidity. Different substrates were tested: fine wheat straw (İBBK), coarse wheat straw (KBBK), hemp (KBK), and a combination of fine wheat straw with hemp (İB-K). The growth process took approximately 12-14 days, followed by drying at room temperature for four days. Additionally, some samples were dried in an oven at 70°C to examine the effect of drying conditions on material properties.

Chemical Structure Analysis: FTIR spectroscopy (Perkin Elmer Spectrum 100) was used to analyze the chemical structure of the biocomposite samples. Measurements were taken at multiple points on each sample to generate representative spectra.

Mechanical Properties: Compression testing of mycelium biocomposites was performed using an Instron 5569 universal testing machine. Three samples from each test set ($100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$) were analyzed to determine the compression stress at 10% deformation and the slope of the linear elastic region, providing the elastic modulus values.

Morphological Properties: Morphological analysis of the sample surfaces was conducted using a Philips XL30 SFE scanning electron microscope (SEM). The specimens were coated with a thin layer of gold to prevent charge effects, and at least five different regions were analyzed to capture representative images. The measurements on the images were determined using the ImageJ software.

Flammability Characteristics: For the combustion test, conducted by modifying the TS EN ISO 6941 standard. A single flame source was used vertically, positioning the sample to be tested 4.5 cm above the flame source and parallel to the ground. Samples were exposed to the flame source for 10, 30, 60, and 90 seconds.

Water Absorption Properties: The water absorption capacity of the mycelium biocomposite materials was assessed following a modified version of ASTM C272/C272M-18 standard. Samples were immersed in pure water at $22 \pm 1^\circ\text{C}$ for 2 and 24 hours to measure absorption. The change in weight after immersion was measured.

Thermal Properties: Thermogravimetric analysis (TGA) was performed using a Netzsch STA 449 F3 Jupiter device. The biocomposite samples were heated in air at a rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$ up to 800°C to assess their thermal stability.

Results and Discussion

Chemical Structure Analysis

FTIR spectra revealed the molecular characteristics in mycelium biocomposites (Figure 9). Peaks represented diverse components, including polysaccharides, proteins, lignocellulosic structures, chitin, and specific structural vibrations within protein, lignin, and cellulose compounds [4, 9, 10]. The composition analysis indicated a higher cellulose content in hemp, while wheat straw demonstrated a higher amount of lignin, as supported literature [11],[12].

Mechanical Properties

Compressive strength and elastic modulus differed among biocomposites (Table 1). Thin wheat straw-based biocomposite exhibited the highest compressive strength, followed by thin wheat-hemp, hemp, and thick wheat straw biocomposite aligning with findings in the literature (Table 3). Parallel trends were observed in elastic modulus, further emphasizing the effect of drying conditions on the mechanical properties [13].

Morphological Properties

Morphological analyses showed distinct structural variations among biocomposites (Figure 11). Thick wheat straw biocomposite displayed intermittent mycelium layer and large voids, while the thin wheat straw-based biocomposite exhibited a tighter structure with a well-connected mycelium. Hemp biocomposite demonstrated a good adhesion [7].

Flammability Properties

Samples were exposed to a flame for durations of 10, 30, 60, and 90 seconds in the combustion test (Figure 12). Notably, styrofoam caught fire even before completing 10 seconds, while all other biocomposite samples only exhibited slight charring without ignition during this period. At 30 seconds, no ignition was observed, but there was increased charring compared to the previous stage. Despite no ignition in any sample after 60 seconds, intensified charring was evident. Hemp and hemp-wheat straw biocomposite samples did not ignite even at the 90 second period, while wheat straw in both dimensions ignited at 75 seconds. Additionally, hemp-containing biocomposites exhibited less charring, possibly due to the tighter mycelium coverage, containing chitin, which is known to delay combustion [14, 15]. This is likely attributed to the elevated chitin content of the mycelium, potentially influenced by the high cellulose content present in the hemp substrate [16]. The lower flammability of all mycelium biocomposites compared to styrofoam is another superior property of these novel materials.

Water Absorption Properties

Water absorption values for mycelium-based biocomposite samples are presented in Figure 13 for 2 hours and 24 hours. Results showed that within 2 hours, samples containing thin wheat straw absorbed more water than those with thick wheat straw (IBBK: 314.44%; KBBK: 259.94%), nearly equalizing after 24 hours (IBBK: 346.59%; KBBK: 348.56%). This difference is attributed to the greater surface area per unit mass of thin wheat straw compared to thick wheat straw in IBBK. Hemp biocomposite (KBK) absorbed less water than both dimensions of wheat straw biocomposite samples for both durations. Biocomposites with wheat straw and hemp together showed the lowest water absorption (2 hours: 147.33%; 24 hours: 167.58%). The synergy observed between hemp and thin wheat straw, as discussed earlier, may stem from hemp's high cellulose content, promoting chitin production. Moreover, thin wheat introduces

additional voids, facilitating mycelium growth. This combination likely yields a dense mycelial structure rich in hydrophobic chitin, thus decreasing water absorption.

Thermal Properties

Thermogravimetric analysis examined the onset and completion temperatures of decomposition for the produced biocomposites and styrofoam (Figure 14, Table 2). Styrofoam began decomposing the latest but completed decomposition quickly. Among the biocomposites, KBBK showed the earliest decomposition and weakest mechanical properties, followed by IBBK with a 12°C difference. KBK exhibited slightly more resistance than IBBK. When thin wheat straw and hemp were used together (IB-K), the highest thermal resistance was achieved (234.44°C). In line with previous findings, the thermal stability results further highlight the synergistic effect of utilizing hemp and thin wheat straw together as a substrate. The completion temperature of decomposition was 255°C higher for styrofoam than the highest thermal resistance observed in thick wheat straw biocomposite (663.45°C).

Conclusion

This study explores mycelium biocomposites made from wheat straw and hemp, separately or together, as potential alternatives to non-biodegradable styrofoam. Their structural, mechanical, combustion, water absorption, and thermal properties were examined. Hemp had higher cellulose and lower lignin compared to wheat straw. Thin wheat straw mycelium biocomposites (IBBK) exhibited superior strength, whereas thick wheat straw biocomposite (KBBK) fell behind. Wheat straw biocomposites seemed to contain more voids, while hemp formed tighter bonds with no observed effect on the mechanical properties. Hemp-containing biocomposites (KBK) resisted ignition for up to 90 seconds. IBBK absorbed more water than KBBK, with thin wheat-hemp mixtures (IB-K) showing the least absorption. Substrate choice notably impacted thermal resistance, with IB-K being the most robust. Mycelium biocomposites decompose without any harmful chemicals occurs during the thermal degradation of EPS, offering another environmental advantage. Combining hemp and thin wheat (IB-K) created synergy, providing flame resistance, lower water absorption, and higher thermal resistance. Tailoring substrates shapes mycelium biocomposites for specific properties, offering an eco-friendly, low-flammability alternative to EPS with room for further enhancement.

1. Giriş

Plastik ambalajlar gıda işleme, depolama, taşıma için, gıdayı bozulmadan korumak için ve ambalajlanan malzemeyi dış etkenlerden korumak için sıklıkla tercih edilen malzemelerdir. Ambalaj malzemeleri Avrupa'nın en büyük plastik pazarı olup %40,5'ini oluşturmaktadır [2]. Bu plastiklerin de büyük çoğunluğunu genişletilmiş polistiren (EPS) adı verilen petrol- esaslı stiren monomerinin polimerizasyonu ile elde edilen kapalı gözenekli polistiren köpük veya strafor afını verdiğimiz malzeme oluşturmaktadır. EPS kolay ve ucuz üretilen, oldukça hafif, iyi yalıtım özelliklerine sahip olup ambalajlanan ürünü darbelerle karşı korumaktadır. Bunlarla beraber EPS oldukça yanıcı olup üretiminde kullanılan malzemelerin özelliklerinin önemli dezavantajları mevcuttur. Polistirenin monomeri olan stirene maruz kalmanın yemek borusu, pankreas, lenf ve kan kanseri riskini artırdığı tespit edilmiştir [17]. EPS şişirici ajanı olarak kullanılan pentan gazının kimyasal ürünlerin tehlikelerini tanımlayan, sınıflandıran Küresel Uyumlaştırılmış Sınıflandırma

ve Kimyasalların Etiketlenmesi Sistemi'ne (GHS) göre yutulduğunda ve solunum sistemine girmesi durumunda halinde ölümcül olup (H304) uyuşukluğa veya baş dönmesine neden olabileceği (H336), ayrıca sucul ortamda uzun süre kalıcı, toksik etkiye sebep olduğu (H411) ve oldukça yanıcı bir malzeme (H225) olduğu malzeme güvenlik formlarında belirtilmektedir. Ayrıca çoğu plastik malzemede olduğu gibi EPS de doğada bozunmamakta ve birikerek çevre kirliliği yaratmaktadır. Kıyılarda yığılan plastiklerin %23'ünün EPS olduğu [1] 1970'lerde incelenen bir çalışmada bile 14 çeşit balığın 8'inin sindirim sisteminde EPS tespit edilmiştir [18] günümüzde bu rakamların çok daha yüksek olduğunu tahmin etmek güç değildir.

Doğada bozunmayan plastik malzemelerin sadece %21,3'ü geri dönüştürülmekte %21,8'i yakılmakta, %53,8'i ise doğaya çöp olarak bırakılmaktadır [19]. Termoplastik olması dolayısıyla geri dönüşüme oldukça elverişli olan EPS'in geri dönüşümünün neredeyse hiç gerçekleştirilmemesi yoğunluğu çok düşük olmasından dolayı (Köpüğün %2'sini polistiren ve %98'i hava içerme) bu malzemenin geri dönüşümünde elde edilecek

kazancın düşük olmasıdır. Yukarıda bahsedilen sorunların ortadan kalkmasına yönelik EPS kullanımı birçok ülke tarafından yasaklanmaya başlanmıştır [1]. Bununla beraber günlük hayata kattığı avantajlardan dolayı ambalaj malzemesi ihtiyacı artarak devam etmekte olduğu için alternatif malzemelerin araştırılması gerekmektedir.

Son yıllarda miselyum esaslı malzemeler; tamamen biyo-esaslı, boyutsal kararlılığa sahip oldukça düşük yoğunluklu köpüğümsü bir yapıya sahip olmaları, hammaddelerinin düşük maliyeti ve bol bulunabilmesi, yüksek yanmazlık, ısı ve ses yalıtım özellikleri ve ambalajdan inşaata geniş potansiyel uygulama olanakları nedeniyle yoğun ilgi görmektedir [20]. Miselyum biyokompozitleri mantar kökündeki iplikli bir madde olan hiflerin birleşiminden meydana gelen miselyumun organik malzemeler üzerinde gelişmesine izin verilerek üretilir. Buğday samanı, tahta talaşı, odun parçacıkları, pamuk ve pirinç kabuğu gibi çeşitli organik maddeler, miselyum biyokompozitlerin yetiştirilmesi için yaygın olarak kullanılan besiyerleri arasındadır [3]. Fungusun besiyeri işgal etmesi sırasında, hifleri selüloz, hemiselüloz ve lignin açısından zengin materyal içinde iç içe geçerek besinleri emer ve bağlantılar oluşturur [4]. Besiyer tamamen miselyum tarafından işgal edildiğinde, organizmanın kritik bir sıcaklık eşliğinin üzerinde deaktivasyonu için bir ısı işlemine tabi tutulur. Sonuç olarak elde edilen ürün, inert, hafif, köpüğümsü ve biyobozunur bir malzeme olan miselyum biyokompozittir [21]. Miselyum biyokompozitler doğada tamamen bozunabilmekte ve daha fazla biyokompozit hammadde eldesi için organik geri dönüşümü mümkün kılarak döngüsel ekonomi sağlamaktadır. Aynı zamanda üretimi sırasında düşük enerji gereksinimi ve tamamen doğal malzemelerden elde edilmesi nedeniyle miselyum esaslı biyokompozitler, oldukça düşük karbon ve enerji ayak izine sahip ürünler olup küresel ısınma sorununa sürdürülebilir bir çözüm olarak önerilebilir. Miselyumun üretilmesi için kullanılan besiyeri gıda ürünleri olabileceği gibi tarım atıklarında mevcut olan doğal liflerden de faydalanılabildiği gibi gıda ile rekabet oluşturulmaması, düşük maliyet ve atık yönetimi sağlanarak aynı zamanda atıklardan katma değerli ürün eldesini sağlaması açısından avantaj oluşturmaktadır [4]. Besiyeri olarak değerlendirilen bu doğal lifler miselyum tarafından beslenmek amacıyla tüketilmekte iken aynı zamanda henüz tüketilmeyen kısmı malzemeyi mekanik olarak takviye ederek; anafazı miselyum, takviye malzemesi doğal lif olan bir tür biyokompozit (BK) malzemeyi oluşturmaktadır. Bununla beraber bu biyo-esaslı malzemeler petrol-esaslı alternatiflerine göre özellikleri biraz daha zayıf kalabilmektedir. Biyo-esaslı ve biyobozunur malzemelerin petrol-esaslı plastiklerin yerini alabilmeleri için özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, biyolojik etkinliği yüksek olan ve hızlı oluşturabilen mantar türlerinden biri olan *Pleurotus ostreatus* (istiridye mantarı) türüne ait miselyum [6] ve besiyeri olarak kenevir lifi ve buğday samanının kullanılarak bu tarım atıklarının katma değerlerinin artırılması hedeflenmiştir. Bir kompozit malzemede malzeme özelliklerinin daha iyi olmasına sebep olan en önemli faktör bileşenler arasındaki yüksek uyumdur. Besiyeri olarak kullanılan kenevir lifleri ve miselyum arasında yüksek uyum olduğu bilinmektedir [7]. Ayrıca *Pleurotus ostreatus* ve kenevir liflerinin kombinasyonunun verimli büyüme sağladığı dolayısıyla üretim zamanını hızlandırdığı ve kenevir miselyum uyumu kaynaklı olarak elde edilen ürünün yüksek eğilme mukavemetine sahiptir [8].

Ülkemizde yıllık artan bir orana 20 milyon tona yakın buğday üretilmektedir [22]. Bu üretim sonucunda açığa çıkan buğday samanı oldukça yüklü miktarda bir tarım atığı olarak ortaya

çıkılmaktadır. Buğday samanının miselyum gelişiminde verimli bir ortam sağlama avantajına sahip olduğu bilinmektedir [6]. Buğday samanı gibi tarımsal atıklar malzemelerin aşınma direncini artırmasından dolayı kompozit ürünün daha uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [23]. Bunun yanında kolay işlenebilirlik ve düşük yoğunluk gibi fiziksel özelliklerinden dolayı da tercih edilmiştir.

Literatürde buğday samanı, kenevir ve benzeri doğal liflerin çeşitli mantar miselyumlarının büyüme veriminde nasıl rol oynadığı incelenmiş olsa da [24] biyokompozit son ürünlerin özellikleri incelenmemiştir. Aynı şekilde buğday samanı, kenevir lifi kullanılarak farklı mantar miselyumları ile gerçekleştirilen biyokompozit üretim çalışmaları varsa da [4],[6] bu iki doğal lifin bir arada kullanıldığı ve farklı besiyer boyutlarının ürün özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada kenevir ve buğday samanını ayrı ayrı ve birlikte miselyum biyokompoziti üretiminde kullanılmıştır, ayrıca farklı boyutlarda buğday samanı kullanımının elde edilen ürün özelliklere etkileri incelenmiştir. Miselyum biyokompozitinin kimyasal yapı özellikleri Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, yapıbilim özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), mekanik özellikleri basma testi, ısı özellikleri termogravimetrik analiz (TGA) cihazı ile analiz edilmiş olup ürünün su emme ve yanıcılık özellikleri de incelenmiştir. Literatürde kenevir ve buğday samanı besiyeri için bu karakterizasyonların tamamını kapsayan bir miselyum biyokompozit çalışması gözlemlenmemiştir (Tablo 3).

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan Malzemeler

Pleurotus ostreatus (istiridye mantarı) miselyumları Yalova Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü'nden temin edilmiştir. Buğday samanı, Manisa'da bulunan bir çiftlikten ve kenevir lifleri Ketene Bitkisel Üretim Tekstil San. Tic. A.Ş. tarafından bilâbedel temin edilmiştir. Buğday samanı kalın ($30,34 \pm 5,86$ mm) ve ince ($8,90 \pm 7,10$ mm) olacak şekilde iki ayrı boyutta Demsan Brader HC 1500 GR bıçaklı öğütücüde standart hızda sırayla 15 ve 30 saniye boyunca ufaltılmış, kenevir tek boyutta ($34,20 \pm 5,60$ mm) kesilerek küçültülmüştür. Kenevirin küçültülmesi daha çok tüylenme şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Buğday samanının (a) temin edildiği, (b) ince kıyılmış ve (c) kalın kıyılmış hâli. Kenevirin (d) temin edildiği ve (e) boyutları küçültülmüş hâli.

Figure 1. Wheat straw (a) as supplied, (b) finely chopped and (c) coarsely chopped. Hemp (d) as supplied and (e) reduced in size.

Uzunluklar ve standart sapma değerleri en az 100 adet numunenin kumpas ile ölçülmesiyle tespit edilmiştir. Temin edilen EPS $0,0064$ g/cm³ yoğunluğa sahip olup

karakterizasyonlar aynı boyutlardaki miselyum biyokompozit ve EPS numuneleri ile gerçekleştirilmiştir.

2.2. Miselyum Biyokompozitlerin Üretimi

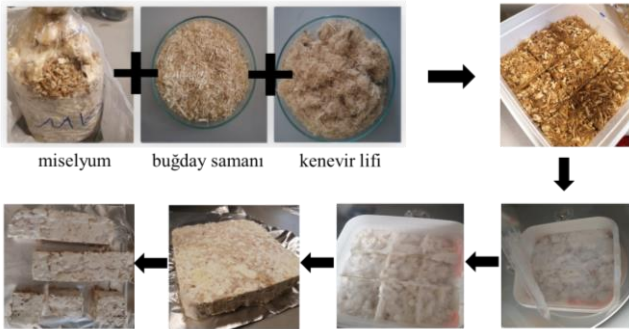
Öncelikle besiyeri olarak kullanılması planlanan buğday samanı ve kenevir küçük ölçülere getirildi. Hammaddelerin 121 °C'de ve 40 dakika boyunca otoklavda sterilizasyonu sağlanmıştır. Tezgâh, eldiven ve diğer tüm ekipmanlar, numunelerin bulaşını önlemek için %95 etil alkol çözeltisi ile temizlenerek kullanılmıştır.

Miselyum, besiyeriyle birleştirilmesi için etil alkol ile arındırılmış plastik bir kaba (13 cm × 6 cm × 10 cm) aktarılmış (uzun dönem kullanımlarda daha kolay sterilizasyon için cam tavsiye edilir.) ve besiyeri ile karıştırılıp kapağı kapatılmıştır. Her bir deneme için 20 gram besiyeri ve 200 gram mantar miseli miktarı kullanılmıştır. Besiyerlerinin etkilerini gözlemek için tekli ve çiftli olarak besiyerleri kullanılmıştır. Tekli denemelerde ince buğday samanı (İBBK), kalın buğday samanı (KBBK), kenevir (KBK) miselyum biyokompozitleri üretilmiştir. Çiftli denemelerde ince buğday samanı ve kenevir lifi (İB-K) biyokompoziti bu besiyerlerin eşit ağırlıkta eklenmesi ile elde edilmiştir. Miselyumun gelişim gösterebilmesi için ihtiyaç duyduğu ortamın sıcaklığı 25 °C ve bağıl nemi %80 [25] olarak karanlık koşullarda büyümeye bırakılmıştır ve desikatör içinde istenen ortam sağlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. (a) İstiridye mantar miselyumunun temin edildiği şekli, (b) bir parçası. Üretimde kullanılan (c) desikatör ve (d) otoklav.

Figure 2. Oyster mushroom mycelium (a) as provided, (b) one piece. (c) Desiccator and (d) autoclave used in production.



Şekil 3. Miselyum biyokompozit üretim aşamaları.

Figure 3. Production stages of mycelium biocomposite.

Desikatörün içerisine numunelerle birlikte nemölçer ve istenilen ortam nemini sağlaması için bir beher içerisine yaklaşık 50 mL doymuş sodyum bromür (NaBr) çözeltisi eklenmiştir. Üretim süreci 12-14 gün aralığında gerçekleştirilmiş olup kuruması için gereken süre oda sıcaklığında 4 gün olarak belirlenmiştir. Ayrıca numuneler 70 °C'deki bir etüvde 12 saat bekletilerek de kurutulmuş olup ve kurutmanın malzeme özellikleri üzerindeki etkisi kenevir lifi ile hazırlanmış miselyum biyokompozit için incelenmiştir.

2.3. Kimyasal Yapı Analizi

Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR spektrofotometresinde (Şekil 4) 650 ila 4000 cm⁻¹ tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Temsili bir spektrumuna sahip olmak için ölçümler her bir biyokompozit numunelerinin en az üç noktasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. FTIR spektrofotometresi.

Figure 4. FTIR spectrophotometer.

2.4. Mekanik Özellikler

Miselyum biyokompozitlerin basma testi Instron 5569 cihazı (Şekil 5) ile yapılmıştır. Köpük malzemelerin boşluklu ve esnekliklerinin düşük olmasından dolayı çekme testine nazaran sonuçları malzeme kusurlarından daha bağımsız olan basma testi tercih edilmiştir. Test, 100 mm × 100 mm × 50 mm numune ölçüleriyle ISO 844 standardı baz alınarak her bir deney setinden üçer numune için gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait %10 deformasyona ait basma gerilimi ve doğrusal olarak elde edilen elastik bölgenin eğimi alınarak elastik modül değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 5. Basma testi cihazı.

Figure 5. Compression test device.

2.5. Yapıbilim Özellikleri

Numunelerin yüzeylerine ait yapıbilim (morfolojik) analizi, Philips XL30 SFEG taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı (Şekil 6) ile gerçekleştirilmiştir. Şarj etkilerini önlemek için tüm örnekler altın bir tabaka ile kaplanarak görüntüler 15 kV hızlandırma gerilimi kullanılarak elde edildi. Temsili bir görüntü elde etmek için en az beş farklı bölge analiz edildi. Fotoğraf üzerindeki boyutlar ImageJ programı kullanılarak tespit edildi.



Şekil 6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).

Figure 6. Scanning Electron Microscope (SEM).

2.6. Yanma Özellikleri

Yanma testi TS EN ISO 6941 standardının modifiye edilmesi ile gerçekleştirilmiş, düzenekte tek bir alev kaynağı dikey olarak kullanılmış, deneye tabi tutulacak numune alev kaynağından 4,5 cm yukarıda ve zemine paralel olarak konumlandırılmıştır. Numuneler; 10, 30, 60 ve 90 saniye boyunca alev kaynağına maruz bırakılmıştır [6].

2.7. Su Emme Özellikleri

Miselyum biyokompozit malzemelerin su emme kapasitelerini belirlemek için ASTM C272/C272M- 18 standardının modifiye edilmiş şekli kullanılmıştır. Bir kap içerisinde sıcaklığı $22 \pm 1^\circ\text{C}$ olan saf su doldurularak ve numune alttan desteklenen bir ağırlık ile suyun yüzeyinden 25 mm aşağıda olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 7). Oda sıcaklığında 5 gün kurutulduktan sonra numune 2 saat ve 24 saat süresince su içerisinde bekletilmiştir. Bu sürelerin sonunda kaptan çıkarılıp suyun fazlası alınarak hassas terazi ile ölçülüp suya daldırma öncesi ağırlığı ile kıyaslanmıştır [6].



Şekil 7. Su emme test düzeneği.

Figure 7. Water absorption test setup.

2.8. Isıl Özellikler

Biyokompozit numunelerinin ısıl kararlılığının ölçümü için Netzsch STA 449 F3 Jupiter cihazı ile termogravimetrik analiz (TGA) cihazı (Şekil 8) gerçekleştirilmiş olup hava ile $10^\circ\text{C}/\text{dak}$ hız ile 800°C 'ye kadar ısıtılmıştır.



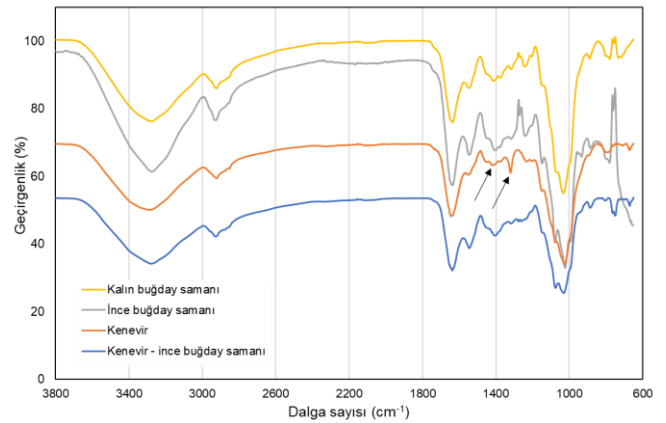
Şekil 8. Termogravimetrik analiz cihazı.

Figure 8. Thermogravimetric analyzer.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kimyasal Yapı Analizi

Kalın buğday samanı, ince buğday samanı, kenevir ve kenevir ile ince buğday samanı ile hazırlanmış miselyum biyokompozitlerinin FTIR spektrumlarında (Şekil 9) tespit edilen 3200 cm^{-1} piki polisakaritlerin O-H gerilmesi ve proteinlerdeki amid gruplarının N-H gerilim titreşimine tekabül etmektedir. $2800\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$ Aralığında lignoselülozik yapıların ve kitine ait C-H gerilmesi gözlemlenmektedir.



Şekil 9. a) Kalın buğday samanı, b) ince buğday samanı, c) kenevir ve d) kenevir-ince buğday miselyum biyokompozitlerinin FTIR spektrumları.

Figure 9. FTIR spectra of a) thick wheat straw, b) thin wheat straw, c) hemp and d) hemp-thin wheat mycelium biocomposites (from top to bottom).

1630 cm^{-1} civarlarındaki pik elde edilen protein yapısındaki amid I'e ait C=O gerilmesi, aminoasitlere ait C=C gerilmesi ve/veya N-H bükülmesine ait olabilir [10]. 1545 cm^{-1} piki proteinde bulunan amid II yapısına (N-H bükülme, C-N gerilme) [9, 10], $1400\text{-}1450\text{ cm}^{-1}$ civarındaki piklerin lignin ve karbohidratlarda bulunan CH_2 bükülmesi ait olduğu tespit edilmiştir [4]. 1370 cm^{-1} selüloz ve hemiselülozda bulunan CH deformasyon titreşimine ait olmakla beraber [26] miselyumun selüloz ile beslenmesinin sonucu kitin oluşumunun da gözlemlendiği bölge olarak da verilmektedir [10]. $1310\text{-}1320\text{ cm}^{-1}$ selülozdaki CH_2 burkulması [4], $1230\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ Aralığında pikin lignine ait metoksil gruplarındaki C-O gerilmesine ait olup, 1150 cm^{-1} C-O gerilmesine, 1070 cm^{-1} civarlarındaki absorpsiyon piki C=O gerilmesine [26], $1020\text{-}1030\text{ cm}^{-1}$ bölgesi ise C=O bükülmesine [10] tekabül etmektedir. 880 cm^{-1} civarındaki absorpsiyon pikleri monosakkaritlere ait

glikosidik bağlara ve selülozun amorf bölgesine ait olduğu belirtilmektedir[26]. 750-790 cm^{-1} aralığında gözlemlenen absorpsiyon piklerinin polisakkaritlerde bulunan anomerik karbona ait olduğu düşünülmektedir [10]. Tüm numunelerin benzer yerlerde absorpsiyon pikleri vermektelerse de buğday samanı içeren biyokompozitlerde absorpsiyon pikinin 1410 cm^{-1} civarlarında, kenevir içeren biyokompozitlerde ise 1320 cm^{-1} 'lerdeki pikin daha şiddetli olduğu tespit edilmiştir. Yukarıda 1410 cm^{-1} 'larda pikin lignine, 1320'lerdeki pikin ise selüloza ait olduğu belirtilmiştir. Bu şiddetler arasındaki farkın kenevirin selüloz içeriğinin buğdaya göre yüksek olması ve buğdaydaki ligninin de kenevirdeki miktardan daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (kenevir: %74,1 selüloz, %7,6 hemiselüloz, %2,2 lignin[11]; buğday samanı: %32-45 selüloz, %20-45 hemiselüloz, %11-26 lignin[12]).

3.2. Mekanik Özellikler

Basma dayanımı için %10 deformasyondaki basma gerilimi ve elastik modül için elastik bölgedeki eğim hesaplanmıştır. Kalın buğday samanı, ince buğday samanı, kenevir ve kenevir- ince buğday samanı ile hazırlanan miselyum biyokompozitlerinin basma testleri sonuçları Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1. Miselyum BK'ler ve EPS'nin mekanik özellikleri.

Table 1. Mechanical properties of mycelium BCs and EPS.

| | Elastik modül (kPa) | Basma gerilimi (%10 gerinim) (kPa) |
|------------------------|---------------------|------------------------------------|
| İnce buğday BK | 3,91 ± 0,02 | 30,36 ± 3,78 |
| Kalın buğday BK | 2,83 ± 0,76 | 21,00 ± 2,36 |
| Kenevir BK | 3,45 ± 0,10 | 23,88 ± 4,36 |
| İnce buğday-kenevir BK | 3,00 ± 0,15 | 24,26 ± 0,15 |
| EPS | 5,13 ± 0,12 | 54,82 ± 4,97 |

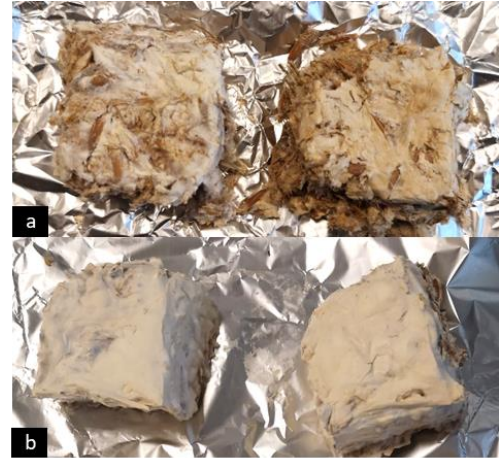
Miselyum biyokompozitler arasında ince buğday BK en yüksek basma değerine sahiptir (30,36 kPa). Bunu sırayla buğday-kenevir bileşimi, kenevir ve kalın buğday BK takip etmektedir. İBBK'nın basma gerilimi KBBK'ya göre %45 daha yüksek elde edilmiştir. İB-K BK'nın basma gerilimi ise yine KBBK'ya göre %15 daha yüksektir. Kalın buğday besiyerinin miselyum ile temas eden yüzey alanının daha düşük olması, daha fazla hacim kaplamasından ötürü daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu ve bu nispeten büyük boşlukların miselyum ile besiyerin yapışmasını azaltarak miselyumun beklenen yoğunlukta gelişmemesine sebep olduğunu düşünülmektedir [6]. Optimum boyutlardaki buğday samanının malzemeye daha yüksek miktarda takviye sağladığı görülmektedir. Elde edilen basma dayanımı değerleri literatürde kullanılan buğday samanı ve kenevir içeren miselyum biyokompozitlerin çoğuna benzer özellik göstermektedir (Tablo 3). Elastik modül değerleri incelendiğinde miselyum BK'lar arasında basma gerilimi en yüksek İBBK (3,91 kPa) iken bunu KBK ve İB-K BK ve takip etmektedir. En düşük elastik modülü en düşük basma gerilimine de sahip olan KBBK'ya aittir. İBBK elastik modülü KBBK'dan %38, KBK'nın ise %22 daha yüksek elde edilmiştir.

Kenevirin içine ince buğday samanının katılması kenevir BK'nın basma dayanımını artırmışsa da yine de değer ince buğday samanı BK'ninkine ulaşamamıştır. Bunlarla beraber BK'ların basma dayanımının ve elastik modül değerlerinin EPS ile yarışabilir düzeye ulaşması için daha fazla artırılması gerektiği

görülmektedir. Devam etmekte olan çalışmalarımız bu değerlere yaklaşıldığını göstermektedir.

Ayrıca miselyum biyokompozitlerin kurutma şekillerinin malzeme özelliklerine etkisini incelemek için KBK üretiminde iki farklı kurutma yolu denenmiştir. İlki yukarıda sonuçları sunulmuş olan oda sıcaklığında 4 gün bekletme ile kurutma yöntemi diğeri de 70 °C'deki etüv ortamında kurutma olup oda sıcaklığında kurutulan numunelerde bir fark görülmezken etüvde kurutulan numunelerde koku ve renk değişimi (sararma) muhtemel bir küflenme gözlemlendi. Etüvlenmiş numune birkaç gün oda sıcaklığında beklediğinde ise numunenin dağıldığı ve sabit yapının korunmadığı görüldü (Şekil 10). Etüvde kurutulan BK'nın elastik modül ve basma gerilimi değerleri sırasıyla 1,09 ve 11,78 kPa olup kurutma farkı mekanik özelliklerde %68 ve %51 gibi ciddi azalmaya sebep olmuştur.

Etüvde kurutulan BK'nın duyuşal (görünüm, koku) ve mekanik özelliklerinde ciddi düşme tespit edilmesiyle literatürde sıklıkla belirtilen[13] etüv ile kurutmanın aslında malzemeye yarardan çok zarar getirdiği görülmüştür. Burada yüksek sıcaklık ürüne olumsuz etki edebildiği gibi biyokompozitlerin kuruma hızının küfün üreme hızından daha yavaş olduğu düşünülmüştür. Ayrıca etüvde hava devridaiminin olmamasının küflenmeye yol açabileceği ve hava devridaiminin sağlanması durumunda daha farklı sonuçların elde edilebileceği de düşünülmektedir. Devridaimsiz bir etüv varlığında numunelerdeki yüksek nemin öncelikle açık havada bir miktar kurutulup kalan eser miktarda nem ve aktivitenin sonlandırılması için yüksek sıcaklıkta kurutma daha faydalı olabilir.



Şekil 10. (a) Etüvde ve (b) açık havada kurutulmuş kenevir miselyum biyokompozit numunelerinin görünümü.

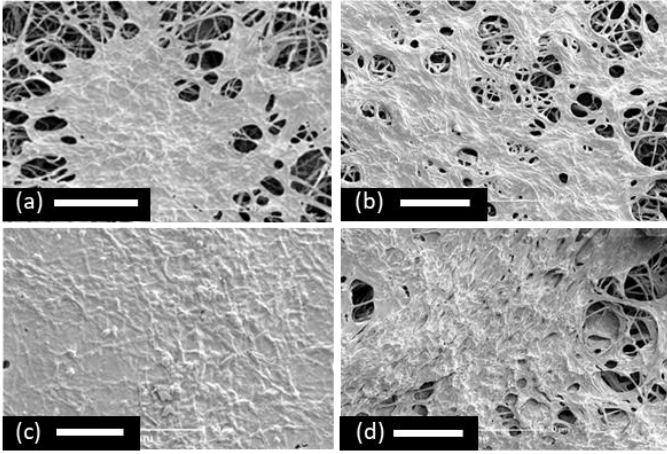
Figure 10. Appearance of hemp mycelium biocomposite samples dried (a) in the oven and (b) in the open air.

3.3. Yapıbilim (Morfoloji) Özellikleri

BK'lerin yapıbilim özelliklerini incelendiğinde ilk dikkat çeken KBBK'nın yapıdaki miselyumların belli bölgelerde küme şeklinde toplandığı 60 μm boyutlarında boşluklar içermesidir (Şekil 11). Buna karşın İBBK'nın yapısının daha sıkı, miselyumların birbirine daha bağlı olduğu ve boşlukların boyutlarının daha küçük olduğu (13,55±6,31 μm) gözlenmektedir. Bu yapı farkının etkisi, elde edilen mekanik özelliklerde de doğrulanmıştır. İBBK'da birbirine daha bağlı halde görülen yapının malzemenin basma dayanımında da artışa sebep olduğu düşünülmektedir. KBK yüzeyinin de miselyum tarafından tamamen kaplanmış olduğu görülmüştür. İB-K BK ise

KBBK'dan daha yoğun yapılı olmakla beraber bazı iri boşluklar ($31,84 \pm 8,32 \mu\text{m}$) ve tüm yapı boyunca köpük gibi küçük boşluklar da ($8,00 \pm 2,36 \mu\text{m}$) içermektedir.

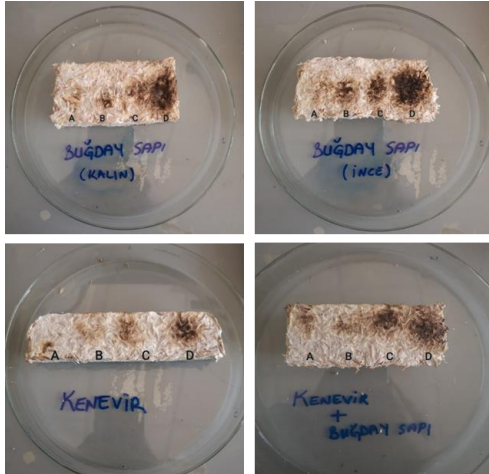
Morfolojik analiz buğday samanı içeren BK'lerin daha fazla boşluk içerdiğini ve kenevirin daha sık olarak bağlandığını göstermektedir. Bu, kenevir liflerinin güçlü bir yapışma yeteneği gösterdiğini ve kenevirin besiyeri olarak kullanıldığı kompozit malzemelerde miselyum büyümesinin daha başarılı olduğunu göstermekte olup literatürde de doğrulanıyor olsa da [27] bu yapı özelliği ince buğdayın ekstradan kattığı mekanik avantajlardan dolayı malzemenin mekanik özelliklerine yansımamıştır.



Şekil 11. (a) Kalın buğday samanı, (b) ince buğday samanı (c) kenevir (d) ince buğday samanı-kenevir BK SEM görüntüleri. Ölçek $50 \mu\text{m}$.

Figure 11. SEM images of (a) thick wheat straw, (b) thin wheat straw (c) hemp and (d) thin wheat straw-hemp BC. Scale $50 \mu\text{m}$.

3.4. Yanma Özellikleri



Şekil 12. a)10 sn, b)30 sn, c)60 sn ve d)75-90 sn'de miselyum BK'lerin yanmazlık özelliklerinin gösterimi.

Figure 12. Demonstration of the fireproof properties of mycelium BKs at a)10 sec, b)30 sec, c)60 sec and d)75-90 sec.

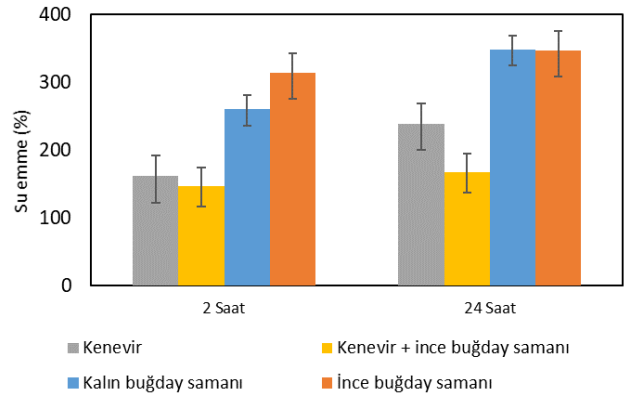
Yanma testinin yapılması için hazırlanan deneyde kullanılan numuneler sırasıyla 10, 30, 60 ve 90 saniye boyunca alev kaynağına maruz bırakılmıştır (Şekil 12). İlk olarak, 10 saniye boyunca alev kaynağına maruz bırakılan straforun 10 saniye tamamlanmadan tutuştuğu, diğer tüm BK numunelerin bu sürede tutuşma olmadan sadece hafif karardığı gözlenmiştir. İkinci olarak, 30 saniye boyunca alev kaynağına maruz bırakıldığında

da hiçbir numunede tutuşmanın olmadığı gözlenmiştir. Ancak bir öncekinden daha fazla kararma olmuştur. 60 saniye boyunca alev kaynağına maruz bırakıldığında hiçbir numunede yine tutuşma olmamış ama öncekilere göre daha yoğun bir kararma gözlemlenmiştir. Kenevir ve ince buğday samanı-kenevir BK numunelerinde 90. saniyede bile tam tutuşma gözlenmemiş olup buğday samanının BK'nin iki boyutu için de 75. saniyesinde tutuşmanın başladığı gözlenmiştir. Ayrıca kenevir içeren BK'de daha az kararma olduğu gözlemlenmiştir. Kenevirin gerçekleştirdiği bu avantajların morfolojik analizde de görüldüğü gibi miselyum ile daha sıkı kaplanması olduğunu düşündürmektedir. Zira miselyumun yapısında bulunan kitin yanmayı geciktirici bir malzeme olarak bilinmektedir [14, 15]. Muhammad Haneef ve çalışma ark. yaptıkları araştırmada saf selüloz ile beslenen miselyumun kitin miktarının daha fazla olduğuna dikkat çekmiş olup [16] kenevirdeki selüloz miktarının buğdaya nazaran daha fazla olduğu FTIR analizinde bahsedilmişti. Dolayısıyla kenevir içeren besiyeri tüketen miselyumların yapısında daha fazla kitin oluşturmasına, bunun da yanmazlığa olumlu etki etmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

Burada kullanılan tüm miselyum BK'lerin strafordan daha az yanıcı olması bu malzemelerin üstün özelliklerinden biridir. Literatürde kenevir ve buğday samanı besiyeri kullanılarak üretilen miselyum biyokompozitlerinin yanmazlık test sonuçları oldukça sınırlı olup Fusarium oxysporum ile besiyeri olarak kullanılmış kağıt ve bayat kahve atıklarının kullanılarak hazırlanmış miselyum biyokompozitinde 80 saniyeye kadar tutuşmanın gözlenmediği, bu çalışmadan farklı olarak 80 saniye ardından malzemenin 30 dakika boyunca için için yanarak tükendiği belirtilmiştir[28].

3.5. Su Emme Özellikleri

Deneylerde kullanılan miselyum esaslı biyokompozit numunelerin su emme değerlerine ilişkin değerler Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Miselyum BK'lerin su emme davranışları.

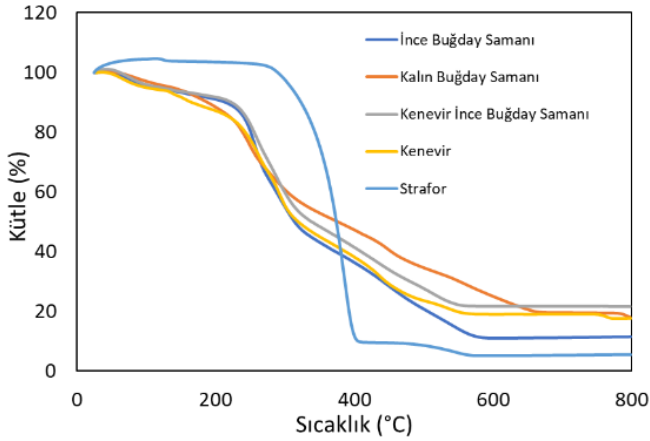
Figure 13. Water absorption behavior of mycelium BCs.

Su emme testi 2 saat ve 24 saat için gerçekleştirilmiştir. Bu deneyden elde ettiğimiz verilere göre 2 saat içinde ince buğday samanı içeren numunelerin kalın buğday samanına göre daha fazla su emdiği (İBBK: %314,44; KBBK: %259,94) 24 saat süre sonunda birbirleriyle neredeyse eşitlendiği görülmektedir (İBBK: %346,59; KBBK: %348,56). İBBK'nin KBBK'ye göre daha fazla su emmesinin sebebi ince buğdayın birim kütleye düşen yüzey alanının kalın buğday besiyerine göre daha fazla olması şeklinde açıklanabilir. Kenevir biyokompozit (KBK) numunesinin su emme miktarı iki süre için de iki farklı boyuttaki buğday samanı BK numunelerinden daha azdır.

Buğday samanı ve kenevirin birlikte kullanıldığı numunelerinde (İB-K) ise su emme miktarının en az olduğu (2 saat: %147,33; 24 saat: %167,58) tespit edilmiştir. Kenevir ile ince buğdayın birlikte bu sinerjiyi oluşturmasının muhtemel sebebi bir önceki başlıkta da tartışılmış olduğu gibi kenevirdeki yüksek miktarda selülozun yüksek oranda kitin üretimine sebep olması, bununla beraber ince buğdayın da yapıya ekstra boşluklar getirerek miselyum büyümesine alan açması ve elde edilen hidrofobik olan kitin miktarı yüksek ve yoğun miselyum yapısının su emmeyi azaltması olduğu düşünülmektedir.

3.6. Isıl Özellikler

Üretilen biyokompozitlerin ve straforun termogravimetrik analizlerinde bozunmaya başladığı ve bozunmanın bittiği sıcaklıklar incelenmiştir (Şekil 14, Tablo 2).



Şekil 14. Miselyum BK'lerin termal davranışları.

Figure 14. Thermal behavior of mycelium BCs.

Tablo 3. Bu çalışmadaki ve literatürde kenevir ve buğday samanı içerikli çalışmaların karakterizasyon sonuçları.

Table 3. Characterization results of this study and studies containing hemp and wheat straw in the literature.

| Miselyum Türü | Besiyer | Basma Dayanımı (kPa) (% def.) | Yanmazlık Testi | Su emme (%) | Bozunmaya başladığı sıcaklık (°C) | Uygulama | Ref |
|---|--|-------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------|
| Pleurotus ostreatus | Buğday samanı | 20 (%20) | - | - | - | Mimari | [29] |
| Trametes versicolor | Kenevir | 17-33 (%10) | - | 24s 24-27 | - | Yalıtım malzemesi | [4] |
| Pleurotus ostreatus, Oudemansiella radicata, Acremonium sp. | Buğday kepeği, pamuk sapı | 70-240 (%10) | - | 2s 58-95 24s 138-145 | 250-270 °C | İnşaat ve yapı malzemesi | [30] |
| Ganoderma lucidum | Buğday samanı | 70 (%25) | - | - | - | İnşaat ve yapı malzemesi | [31] |
| Ganoderma lucidum | Kenevir, buğday samanı ayrı (preslenmemiş) | 16-25 (%10) | - | - | - | Yeşil malzeme | [32] |
| Trametes versicolor | Buğday tanesi, pirinç kabuğu | - | Tutuşma Buğday tanesi: 7 sn Pirinç kabuğu: 12 sn | - | - | İnşaat ve yapı malzemesi | [33] |

Tablo 2. TGA analizi sonuçları.

Table 2. TGA analysis results.

| | Bozunmaya başladığı sıcaklık (°C) | Bozunmanın bittiği sıcaklık (°C) |
|-------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| İnce buğday BK | 227,15 | 582,92 |
| Kalın buğday BK | 214,64 | 663,45 |
| Kenevir BK | 230,21 | 558,45 |
| Buğday-kenevir BK | 234,44 | 552,15 |
| EPS | 312,55 | 407,92 |

Bu sonuçlara göre strafor en geç bozunmaya başlamışsa da bozunması erken tamamlanmıştır. Üretilen biyokompozitlerde en erken bozunan mekanik özelliklerde de en zayıf özelliği gösteren KBBK'dir. Onu 12 °C fark ile İBBK takip etmektedir. KBK, İBBK'den birkaç derece daha dayanıklıdır. İnce buğday ile kenevir birlikte kullanıldığında (İB-K) ise en yüksek sıcaklık dayanımı elde edilmiştir (234,44 °C). Yanmazlık, su emme testlerinde olduğu gibi bu sonuçlarda da bu iki besiyerinin kullanımı ürünün sıcaklık dayanımında yukarıda tartışılmış olan sinerjistik etkiyi oluşturduğunu göstermektedir. Strafor daha geç bozunmaya başlamış olsa da 407,92 C'de oldukça hızlı bir şekilde bozunmaya uğramıştır. En yüksek sıcaklık dayanımına sahip olan besiyerin strafordan 255 °C daha yüksek olacak şekilde kalın buğday samanı BK'ye ait olduğu görülmektedir (663,45 °C).

| | | | | | | | |
|---------------------|---|-------------|--|---------------------------------|------------|---------------|------------|
| Pleurotus ostreatus | Buğday samanı | - | Tutuşma 67 sn | 2s 256,64 24s 257,46 | - | Yeşil malzeme | [6] |
| Pleurotus ostreatus | Kenevir lifi, buğday samanı ve birlikte | 21-30 (%10) | Tutuşma Buğday samanı: 75 sn Tutuşma yok Kenevir: 90 sn Kenevir-buğday samanı: 90 sn | 2s 147-314 24s 167-348 | 215-234 °C | Ambalaj | Bu çalışma |

4. Sonuçlar

Bu çalışmada tarım atıkları olan buğday samanı ve kenevirin farklı boyutları, ayrı veya karışım halinde hazırlandıklarında yapısal, mekanik, morfolojik, yanma, su emme, ısı özelliklerinde nasıl değişiklikler gerçekleştiği incelenmiş olup biyobozunur olmayan strafor malzemesinin yerine geçiş potansiyeli değerlendirilmiştir.

Yapısal değerlendirmede kenevir lifinin buğday samanına göre selüloz içeriğinin daha yüksek ve lignin oranının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Morfolojik analiz buğday samanı içeren BK'lerin daha fazla boşluk içerdiğini ve kenevirin daha sık olarak bağlandığını göstermiştir. Miselyum biyokompozitler arasında ise en yüksek elastik modül ve basma dayanımının İBBK'ya ait olduğu en düşük değerlerin ise KBBK'ya ait olduğu görülmektedir. Kenevirin içine ince buğday samanının katılması kenevir BK'nın basma dayanımını artırmışsa da yine de değer ince buğday samanı BK'ya ulaşmamıştır. Zira İBBK, miselyumun daha sık büyümesini sağlayan kenevirden daha iyi bir doğal lif takviyesini sağladığı düşünülmektedir. Etüvde kurutulan BK'nın duyuşal (görünüm, koku) ve mekanik özelliklerinde ciddi düşmeye sebep olmasından dolayı devridaimi olmayan 70 °C'deki bir etüvde kurutulması tavsiye edilmemektedir.

Yanma testinde üretilen tüm biyokompozitlerin 75. saniyeye kadar tutuşmadığı, kenevir içerenlerin 90. saniyede dahi tutuşma göstermediği tespit edilmiştir. Bunun muhtemel sebebi kenevirde buğday samanından daha fazla miktarda bulunan selülozun hidrofobik olan kitin içeriği yüksek yoğun miselyum oluşumunu sağlamasıdır. Yanmazlık özelliği miselyum biyokompozitlerin özellikle inşaat gibi kullanım alanlarında EPS'ye üstünlüklerinden biridir.

Su emme testlerinde İBBK'nın KBBK'ye göre daha fazla su emme göstermiş olup, en düşük su emmenin miselyum ile daha sık bağlanmış olan İB-K karışımı BK'lere ait olduğu görülmüştür. Miselyum biyokompozit üretiminde kullanılan besiyerinin ürünün ısı dayanımına önemli etkiler oluşturduğu ve en dayanıklı miselyum BK'nın İB-K olduğu görüldü. Ayrıca EPS bozunma ürünleri arasında stiren, pentan gibi çevreye ve sağlığa zararlı kimyasallar mevcutken miselyum biyokompozitlerde bu türde kimyasalların varlığı söz konusu değildir.

Sonuç olarak mekanik özellik olarak en iyi dayanımı ince buğday miselyum BK'leri gösterirken kenevirin yapısal olarak miselyumun daha fazla bağlanmasını sağlayarak ince buğday ile oluşan biyokompozitin birliktedir sinerjistik etki göstererek yanmazlık, düşük su emme, yüksek ısı dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bu sinerjistik etkinin kenevir içinde daha yüksek miktarda bulunan selülozdan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Farklı boyutlarda farklı besiyerler kullanarak istenen özelliklerde miselyum biyokompozitlerin üretilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Çevreci ve düşük yanıcılık/yanmazlık

özelliklerinden dolayı miselyum kompozitleri özellikleri daha da geliştirilerek EPS'ye alternatif olmaya en yakın malzemelerdendir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma 1919B012112643 nolu "Miselyum esaslı biyokompozitlerinden ambalaj malzemesi eldesi" başlıklı 2209A projesi kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. FTIR analizi için Dr. İpek ÖMEROĞLU, TGA ve basma testlerinin gerçekleştirilmesinde Adem ŞEN ve SEM analizleri için Ahmet NAZIM'a teşekkür ederiz.

Yazar katkılarının beyanı

MM: Fikir oluşturma, literatür taraması, deney tasarımı, danışmanlık, metodoloji, görselleştirme, yazım: orijinal taslak, düzenleme, eleştirel inceleme. RA, NA, İA: Literatür taraması, deney tasarımı, veri toplama, deneylerin ve analizlerin gerçekleştirilmesi, yazım: orijinal taslak

Kaynaklar

- [1] Chan, H.H.S., Not, C., 2023. Variations in the Spatial Distribution of Expanded Polystyrene Marine Debris: Are Asian's Coastlines More Affected? *Environmental Advances*, Cilt. 11, s. 100342.
- [2] Europe, P., 2021. *Plastics—The Facts 2021: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. Plastics Europe Association of Plastics Manufacturers.
- [3] Zimele, Z., et al., 2020. Novel Mycelium-Based Biocomposites (MBB) as Building Materials. *Journal of Renewable Materials*, Cilt. 8(9), s. 1067-1076.
- [4] Elsacker, E., et al., 2019. Mechanical, Physical and Chemical Characterisation of Mycelium-Based Composites with Different Types of Lignocellulosic Substrates. *PLoS One*, Cilt. 14, e0213954. DOI: 10.1371/journal.pone.0213954
- [5] Elsacker, E., et al., 2020. A Comprehensive Framework for the Production of Mycelium-Based Lignocellulosic Composites. *Science of the Total Environment*, Cilt. 725, s. 138431.
- [6] Kutbay, N. H., Yavuzcan, H. G., Aktaş, S., 2022. Mantarın Bağlayıcı Olarak Kullanıldığı Bir Kompozit Malzemenin Üretilmesi ve Tutuşma Süresi ile Su Alma Özelliklerinin Tespiti. *Politeknik Dergisi*, Cilt. 25(4), s. 1701-1711.
- [7] Li, Y., Pickering, K.L., Farrell, R.L., 2009. Determination of Interfacial Shear Strength of White Rot Fungi Treated Hemp Fibre Reinforced Polypropylene. *Composites Science and Technology*, Cilt. 69(7), s. 1165-1171.
- [8] Etinosa, O.P., 2019. Design and Testing of Mycelium Biocomposite. African University of Science and Technology, Materials Science and Engineering, Doktora Tezi, 150s, Nigeria.
- [9] Haksoy, H., et al., 2020. Deli Bal ve Grayanotoksin'in Karaciğer Dokusu Üzerindeki Etkilerinin Zamana Bağlı Araştırılması. *Konuralp Tıp Dergisi*, Cilt. 12(1), s. 97-111.
- [10] Chulikavit, N., et al., 2022. Influence of Growth Rates, Microstructural Properties and Biochemical Composition on the Thermal Stability of Mycelia Fungi. *Scientific Reports*, Cilt. 12(1), s. 15105.

- [11] Dorez, G., et al., 2014. Effect of Cellulose, Hemicellulose and Lignin Contents on Pyrolysis and Combustion of Natural Fibers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Cilt. 107, s. 323-331.
- [12] Zhang, L., et al., 2022. Comparison of Lignin Distribution, Structure, and Morphology in Wheat Straw and Wood. *Industrial Crops and Products*, Cilt. 187, s. 115432.
- [13] Jiang, L., et al., 2017. Manufacturing of Biocomposite Sandwich Structures Using Mycelium-Bound Cores and Preforms. *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt. 28, s. 50-59.
- [14] Moussout, H., et al., 2016. Kinetics and Mechanism of the Thermal Degradation of Biopolymers Chitin and Chitosan Using Thermogravimetric Analysis. *Polymer Degradation and Stability*, Cilt. 130, s. 1-9.
- [15] Pan, H., et al., 2015. Formation of Self-Extinguishing Flame Retardant Biobased Coating on Cotton Fabrics via Layer-by-Layer Assembly of Chitin Derivatives. *Carbohydrate Polymers*, Cilt. 115, s. 516-524.
- [16] Haneef, M., et al., 2017. Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Scientific Reports*, Cilt. 7(1), s. 41292.
- [17] Program, R.T.P.N.N.T., 2021. National Toxicology Program. 15th Report on Carcinogens.
- [18] Carpenter, E.J., et al., 1972. Polystyrene Spherules in Coastal Waters. *Science*, Cilt. 178(4062), s. 749-750.
- [19] Tsakona, M., Rucevska, L., 2020. Baseline Report on Plastic Waste: Basel Convention. United Nations, s. 1-68.
- [20] Yang, L., Park, D., Qin, Z., 2021. Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review. *Frontiers in Materials*, Cilt. 8.
- [21] Elsacker, E., et al., 2020. A Comprehensive Framework for the Production of Mycelium-Based Lignocellulosic Composites. *Science of the Total Environment*, Cilt. 725, s. 138431
- [22] TÜİK, 2022. Bitkisel Üretim İstatistikleri, 2022. TÜİK.
- [23] Mengeloğlu, F., Alma, M.H., 2002. Buğday Saplarının Kompozit Levha Üretiminde Kullanılması. *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt. 5(2), s. 37-48.
- [24] Yang, W., Guo, F., Wan, Z., 2013. Yield and Size of Oyster Mushroom Grown on Rice/Wheat Straw Basal Substrate Supplemented with Cotton Seed Hull. *Saudi Journal of Biological Sciences*, Cilt. 20(4), s. 333-338.
- [25] Jose, J., et al., 2021. Investigations into the Development of a Mycelium Biocomposite to Substitute Polystyrene in Packaging Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Cilt. 46(3), s. 2975-2984.
- [26] Vârban, R., et al., 2021. Comparative FT-IR Prospecting for Cellulose in Stems of Some Fiber Plants: Flax, Velvet Leaf, Hemp and Jute. *Applied Sciences*, Cilt. 11(18), s. 8570.
- [27] Precious, E.O., 2019. Design and Testing of Mycelium Biocomposite. African University of Science and Technology, Materials Science and Engineering, Doktora Tezi.
- [28] Iordache, O.G., et al., 2018. Novel Myco-Composite Material Obtained with *Fusarium Oxysporum*.
- [29] Ghazvinian, A., et al., 2019. Mycelium-Based Bio-Composites for Architecture: Assessing the Effects of Cultivation Factors on Compressive Strength. 37 Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe and XXIII Iberoamerican Society of Digital Graphics, Joint Conference. *Blucher Design Proceedings*, s. 505-514.
- [30] Gou, L., et al., 2021. Morphological and Physico-Mechanical Properties of Mycelium Biocomposites with Natural Reinforcement Particles. *Construction and Building Materials*, Cilt. 304, s. 124656.
- [31] Răut, I., et al., 2021. Fungal-Based Biopolymer Composites for Construction Materials. *Materials*, Cilt. 14(11), s. 2906.
- [32] Buntsma, J., 2019. An Exploration on Cellulose and Weed Residues from Biomass to Mycelium Composite. Stowa, Amersfoort, Netherlands.
- [33] Jones, M., et al., 2018. Waste-Derived Low-Cost Mycelium Composite Construction Materials with Improved Fire Safety. *Fire and Materials*, Cilt. 42(7), s. 816-825.