

Farklı Biyo Polimerlerden Üretilen Köpük Malzemelerin Termal, Yoğunluk ve Biyolojik Bozunma Özelliklerinin İncelenmesi

Mehmet Emin ERGÜN^{1,2*}, İsmail ÖZLÜSOYLU²

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Akseki Meslek Yüksekokulu, Ormancılık Bölümü, Orman Ürünleri Programı, Antalya, Türkiye

²Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 31.03.2023

Kabul: 07.07.2023

Yayın: 15.08.2023

Araştırma Makalesi



Öz – Yalıtım amaçlı kullanılan köpük malzemelerin büyük bir çoğunluğu polistren, poliüretan ve polifenol gibi petrokimya kaynaklı hammaddelerden üretilmektedir. Bu malzemelerin doğal alternatiflerine kıyasla insan ve çevre sağlığı açısından zararlı ve geri dönüştürülebilirliğinin düşük olması gibi sorunlara sahip olduğu bilinmektedir. Bu olumsuz durumu azaltmak amacıyla son yıllarda biyobazlı köpük malzemelerin üretimi ve kullanımı çevre ve insan sağlığı açısından sahip olduğu olumlu özellikler nedeniyle ilgi görmektedir. Bu çalışmada, selüloz ve sitrik asit karışımına farklı biyo polimerlerin (guar sakızı, buğday gluteni ve ksantan sakızı) eklenmesi ile üretilen köpük malzemelerin yoğunluk, termal iletkenlik ve biyolojik bozunma özellikleri incelenmiştir. Köpükler, biyo polimer, selüloz ve sitrik asit karışımını içeren basit ve hızlı bir prosedür ile üretilerek etüvde kurutulmuştur. Çalışmada kullanılan biyo polimere bağlı olarak elde edilen köpük malzeme yoğunluğunun 0,053 g/cm³ ile 0,245 g/cm³ arasında değiştiği belirlenmiştir. Köpük malzemelerin termal iletkenlik katsayısı, 0,0354 W/mK ile 0,0939 W/mK arasında değişmiş, elde edilen bu değerlerin cam yünü, taş yünü, poliüretan gibi diğer yalıtım malzemeleri ile karşılaştırılabilir olduğu tespit edilmiştir. Üretilen köpük malzemelerde 30 günlük süre sonunda %40,15 ile %48,45 arasında ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Sonuçlar selüloz ve sitrik asit karışımına farklı biyo polimerler eklenmesi ile üretilen köpük malzemelerin yoğunluk ve termal iletkenlik değerleri üzerinde biyo polimer türünün önemli olduğunu göstermiştir. Ayrıca üretilen bu köpük malzemenin geleneksel köpük malzemelere göre daha çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler – Biyo polimer, köpük, termal iletkenlik katsayısı, biyolojik bozunma

Investigation of Thermal, Density and Biological Degradation Properties of Foam Materials Produced from Different Biopolymers

¹Alanya Alaaddin Keykubat University, Akseki Vocational School, Department of Forestry, Forestry and Forest Products Program, Antalya, Turkey

²Bartın University, Faculty of Forestry, Department of Forest Industry Engineering, Bartın, Turkey

Article History

Received: 31.03.2023


Accepted: 05.07.2023


Published: 15.08.2023

Research Article

Abstract – The majority of foam materials used for insulation purposes are produced from petrochemical-derived raw materials such as polystyrene, polyurethane, and polyphenol. It is known that these materials have problems such as being harmful to human and environmental health compared to their natural alternatives and having low recyclability. In order to reduce this negative situation, the production and use of bio-based foam materials have attracted attention in recent years due to their positive properties in terms of environmental and human health. In this study, the density, thermal conductivity, and degradation properties of foam materials produced by adding different bio polymers (guar gum, wheat gluten, and xanthan gum) to a mixture of cellulose and citric acid were investigated. The foams were produced by a simple and fast procedure that contained a mixture of bio polymer, cellulose, and citric acid and dried in the oven. Depending on the bio polymer used in the study, the density of the foam material was found to vary between 0,053 g/cm³ and 0,245 g/cm³. The thermal conductivity coefficient of the foam materials ranged from 0,0354 W/mK to 0,0939 W/mK, and it was determined that these values were comparable to other insulation materials such as glass wool, stone wool, and polyurethane. A weight loss of between 40,15% and 48,5% occurred in the produced foam materials after a period of 30 days. The results showed that the type of bio polymer added to the mixture of cellulose and citric acid was important in determining the density and thermal conductivity values of the produced foam materials. Additionally, it is thought that the produced foam material could be a more environmentally friendly and sustainable alternative to traditional foam materials.

Keywords – Bio polymer, foam, thermal conductivity coefficient, biological degradation

¹  mehmet.ergun@alanya.edu.tr

²  iozlusoylu@bartin.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

Günümüzde polietilen, polivinil klorür, polistiren, poliüretan, fenol-formaldehit gibi sentetik polimerlerden elde edilen köpük malzemeler, hafif ve düşük maliyetli olmasının yanında geniş hammadde yelpazesi nedeniyle izolasyon, inşaat ve gıda paketlenme gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir malzemenin üretim maliyeti, köpüğe dönüştürülerek kolaylıkla düşürülebilir. Köpük üretimi, köpüksüz ürünlere göre daha az malzeme kullanımı gerektirmekte ve bu da malzemelerin üretim maliyetini etkilemektedir. Köpük teknolojisi, hafif ürünler üretmek amacıyla polimerik malzemelerde gaz boşlukları oluşturmak için kullanılır ve kullanım alanına göre yoğunluğu belirlenebilmektedir (Borkotoky vd., 2018). Dünya çapında polimer köpük pazar büyüklüğü 2021'de 123,1 milyar ABD doları değerinde olup, 2022'den 2030'a kadar yıllık %3,6 oranında artması beklenilmektedir (Ergün, 2023). Bu polimerler petro-kimyasal tabanlı olup fosil enerji kaynaklarında elde edilmektedir. Hem fosil yakıtların gelecekte tükenmesi ihtimali hem de üretilen köpük malzemelerin doğada uzun yıllar boyunca bozunmayarak çevresel kirliliğe yol açmasından dolayı doğada kısa sürede bozulan, geri dönüştürmeye ve sürdürülebilirliğe olanak sağlayan doğal ve yenilenebilir kaynaklardan köpük üretimi önem kazanmıştır (Ergün vd., 2020). Bu kapsamda farklı amaçlar için biyo polimerlerden köpük malzeme üretimi gerçekleştirilmektedir. Poli (ϵ -kaprolakton) (Karimi vd., 2012), polihidroksibutirat (Abdo vd., 2023), nişasta (Yıldırım, 2018), kitosan (Özen vd., 2021; Yıldırım vd., 2022), selüloz (Liao vd., 2022) ve sakızlar (Santacruz-Vázquez vd., 2015) gibi doğal hammaddelerden üretilen ve biyolojik olarak parçalanabilen özellikteki polimerler pazarda kendine yer bulmaya başlamıştır.

Guar sakızı Afrika'da yetişen *Vachellia seyal* ve *Senegalia senegal* türü akasya ağaçlarından ekstrakte edilen çoğunlukla gıda ve yem sanayiinde kıvam artırıcı olarak kullanılan nötr bir polisakkarittir. Ana zinciri, 1, 4-glukozit bağları kullanılarak β -D-mannopiranoz yoluyla oluşturulur. α -D-galaktoz yan zincirleri ana zincire 1,6 glikozit bağı ile bağlıdır ve dallı zincir yapısı çok sayıda polar hidroksil grubuna sahiptir (Mudgil vd., 2014). Ticari olarak fermantasyon işlemi ile üretilen ksantan sakızı, *Xanthomonas campestris* mikroorganizması tarafından salgılanan hücre dışı bir polisakkarittir. (Palaniraj ve Jayaraman, 2011). Ksantan sakızı soğuk suda çözünür ve sıklıkla gıda kozmetik ve eczacılık alanlarında kullanılmaktadır (Katzbauer, 1998). Buğday gluteni, buğday nişastasının üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Apolar karakteri, yüksek molekül ağırlığı ve fraksiyonlarının çeşitliliği gibi özelliklere sahiptir. Buğday gluteni kauçuk benzeri mekanik özelliklere sahip olup, mekanik dayanımı yüksek ve kısmen suya karşı dirençlidir (Temiz ve Yeşilsu, 2006). Literatür incelendiğinde buğday gluteni, guar sakızı ve ksantan sakızından köpük malzeme üretimi ile bu biyo polimerlerin termal iletkenlik ve doğada bozunma süreleri hakkında sınırlı sayıda çalışma olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada sitrik asit ortamında buğday gluteni, guar sakızı ve ksantan sakızından üretilen köpük malzemelerin yoğunluk ve termal iletkenlik özellikleri ile biyolojik bozunma süreleri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Selüloz EUROPAP (İzmir, Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Doğu ladininden üretilen selülozun yoğunluğu 0,55 g/cm³'tür. Yoğunluğu 1,65 g/cm³ olan sitrik asit ise Kimetsan Kimya'dan (Ankara, Türkiye) satın alınmıştır. Ksantan sakızı (KS) ve guar sakızının (GS) yoğunlukları sırasıyla 1,48 ve 0,85 g/cm³ olup, sodyum dodesil sülfat (SDS) ile Aromel Kimya'dan (Konya, Türkiye) temin edilmiştir. Ayrıca 0,75 g/cm³ yoğunluğa sahip buğday gluteni (BG) Makeks Gıda'dan (İstanbul, Türkiye) satın alınmıştır.

2.1. Köpük Malzeme Üretimi

Üretilen köpüğün bileşenleri Tablo 1'de verilmiş olup, ilk olarak selüloz 15 dakika boyunca sitrik asit ile 500 rpm'de karıştırılmıştır. Elde edilen karışma biyo polimer ilave edilerek 1250 rpm'de 45 dakika daha karıştırıldıktan sonra karışma kabarcık oluşturması için %0,1 oranında SDS ilave edilmiş ve 2500 rpm'de 20

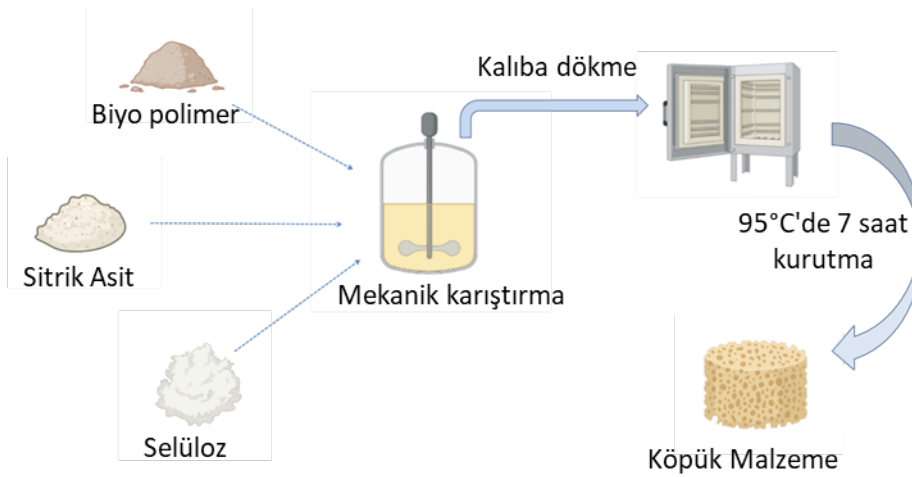
dakika son karıştırma yapılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak sitrik asit ve selüloz kullanım oranı %5 olarak belirlenmiştir (Hassan vd., 2020).

Tablo 1

Farklı biyo polimerlerden üretilen köpük malzemelerin içeriği

Kod	Guar Sakız (%)	Buğday Glütenu (%)	Ksantan Sakız (%)	Sitrik Asit (%)	Selüloz (%)	SDS (%)
GS	5	-	-	5	5	0,1
BG	-	5	-	5	5	0,1
KS	-	-	5	5	5	0,1

Hazırlanan sulu süspansiyon bir kalıba dökülmüş ve 95°C'de 7 saat etüvde kurutulmuştur. Köpük malzemenin üretim süreci Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Farklı biyo polimerlerden üretilen köpük malzemelerin üretim süreci

2.2. Üretilen Köpük Malzemenin Karakterizasyonu

Köpük numunelerinin yoğunluğu ASTM C303 (2010) standardına göre belirlenmiştir. Termal iletkenlik katsayıları ise, KEM QTM 500 (Kyoto Electronics, Kyoto, Japonya) cihazı ile ASTM C518'e (2021)'e göre ölçülmüştür. Biyolojik bozunma deneyinde üretilen köpük malzemeler toprağa gömülmüş ve toplamda 30 gün olmak üzere, 10 gün arayla, morfolojileri kontrol edilerek ağırlıkları kayıt altına alınmıştır. % ağırlık kayıpları formül 1'e göre hesaplanmıştır. Köpük malzemelerin görünümü ve ağırlıkları toprağa gömme işleminden önce ve sonra her bir köpük türü için kaydedilmiştir (Liao vd., (2022)).

$$\%m_k = \frac{m_0 - m_1}{m_0} * 100 \quad (1)$$

%m_k: Geçen süre sonrası köpük malzemedeki meydana gelen yüzde ağırlık kaybı

m₀: Köpük malzemenin toprağa gömülmeden önceki (kontrol grubu) ağırlığı

m₁: Köpük malzemenin toprağa gömüldükten belli bir süre geçtikten sonraki ağırlığı

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada sitrik asit ve selüloz karışımlarına, farklı biyo polimer (GS, BG ve KS) ilavesiyle üretilen köpük malzemelerin yoğunluk, termal iletkenlik değerleri ve bozunma miktarı üzerine biyo polimer türünün etkisi

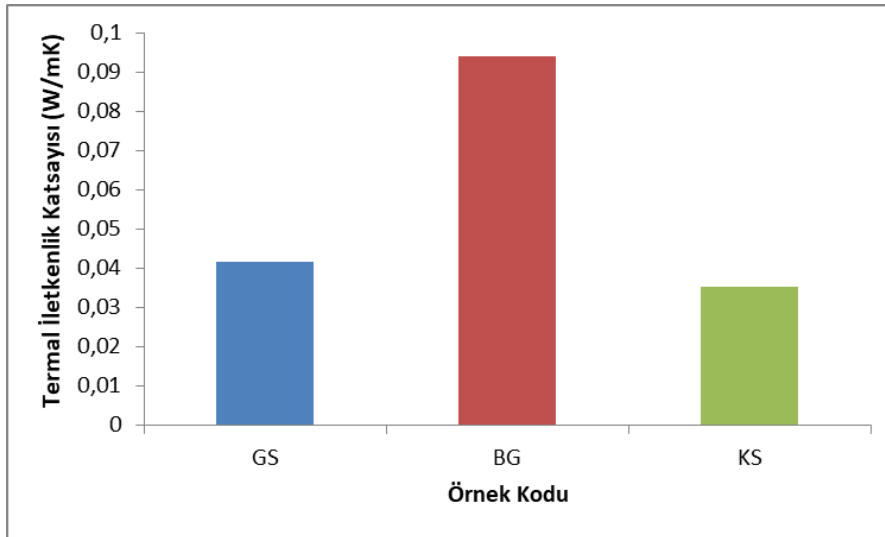
araştırılmıştır. Tablo 2, farklı biyo polimerlerden üretilen köpüklerin yoğunluk ve termal iletkenlik katsayısı değerlerini göstermektedir.

Tablo 2

Üretimi yapılan köpüklerin yoğunluk ve termal iletkenlik değerleri

Kod	Yoğunluk (g/cm ³)	Termal İletkenlik Katsayısı (W/mK)
GS	0,060	0,0416
BG	0,245	0,0939
KS	0,053	0,0354

Üretimde kullanılan biyo polimer yoğunluklarına bağlı olarak köpük malzemelerin yoğunluğu 0,053 g/cm³ ile 0,245 g/cm³ arasında değişen değerler almıştır. Selüloz lifleri arasında çekici kuvvetlerin etkisiyle kümelenme meydana geldiği ve çözücünün uzaklaştırılması sırasında selüloz liflerinin biyo polimerleri birbiri içerisine geçerek daha yoğun köpükler elde edilebildiği belirtilmiştir (Sehaqui vd., 2011). Üretimde kullanılan polimerler arasında yoğunluk üzerine en fazla etkiyi buğday gluteni göstermiştir. Çünkü köpük yapıcı olarak kullanılan SDS sulu süspansiyonu yeterince köpürtememiştir. Bunun bir nedeninin hazırlanan çözeltinin diğer iki çözeltiliye göre viskozitesinin gözle görülür biçimde daha yüksek olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Sentetik ve biyobozunur köpüklerin yoğunluğu, yalıtım amaçlı uygulamalarda 0,0016 g/cm³ ile 0,96 g/cm³ arasında değiştiği bildirilmiştir (Gautam vd., 2007; Shen vd., 2022). Mevcut çalışmada üretilen köpük malzemelerin yoğunluk değerleri kabul edilebilir aralıktadır. Yapılan farklı bir çalışmada ise kitosan ve selüloz takviyeli köpüklerin yoğunluk değerlerinin 0,088–0,123 g/cm³ arasında değiştiği ifade edilmiştir (Lujan vd., 2022). Selüloz bazlı veya takviyeli köpük üretiminde sıklıkla SDS gibi yüzey aktif maddeler ilave edildiğinde yoğunluk değerlerinde azalma meydana geldiği de vurgulanmıştır (Dehdari vd., 2020). GS, BG ve KS köpük malzemelerin termal iletkenlik katsayısı değerleri Şekil 2’de gösterilmiştir.















Şekil 2. Farklı biyo polimerlerden üretilen köpük malzemelerin termal iletkenlik değerleri

Üretilen köpüklerin termal iletkenlik katsayıları 0,0354 W/mK ve 0,0939 W/mK arasında bulunmuştur. Ticari olarak sıklıkla kullanılan cam yünü (Al-Homoud, 2005), taş yünü (Kymäläinen ve Sjöberg, 2008), ve poliüretandan (Papadopoulos, 2005) üretilen izolasyon malzemelerinin termal iletkenlikleri 0,020 W/mK ile 0,071 W/mK arasında değişmektedir. Diğer taraftan farklı biyo polimerlerden üretilen köpük malzemelerden odun lifi 0,11-0,285 W/mK, (Wang vd., 2022) nişasta 0,0220-0,0488 W/mK, (Han vd.,2023) selüloz 1,03

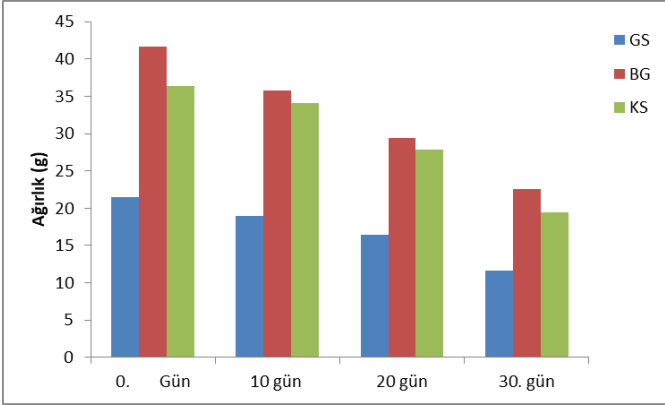
W/mK (Zhao vd., 2022) ve kitosanın 0,035-0,051 W/mK (Ergün, 2023) arasında değişen termal iletkenlik değerleri aldığı ifade edilmektedir. Mevcut çalışmada elde edilen termal iletkenlik katsayıları literatür ile karşılaştırıldığında arzu edilen aralıkta olduğu görülmektedir. Gözenekli bir yapıya sahip olan köpük malzemelerin iyi bir ısı yalıtım özelliği sağladığı belirtilmektedir (Wei vd., 2013). Bu durum köpüklerin gözeneklerini dolduran düşük termal iletkenliğe sahip atmosferik havanın ısı etkisi ile gözenekler ve gözenek duvarlarını dolduran hava katmanlı bir yapı oluşturması ile açıklanmaktadır (Neugebauer vd., 2014). Köpük yoğunluğunun artması ile katı formun termal iletkenliğinin hızlı bir şekilde arttığı bilinmektedir (Simpson vd., 2020). Yapılan bu çalışmada köpüklerinin termal iletkenlikleri, ticari veya önceki çalışmalarda üretilen köpüklerle karşılaştırıldığında ısı yalıtım özelliği açısından orta sınıf olarak kabul edilmiştir (Gupta ve Pinisetty, 2013; Aditya vd., 2017).

Köpüklerin biyolojik olarak bozunabilirliği toprağa gömülerek makroskobik olarak incelenmiş ve ağırlık kayıpları kaydedilmiştir. Farklı biyo polimerlerden üretilen köpük malzemelerin toprağa gömülmeden önceki ve toprağa gömüldükten sonraki 10'ar günlük dönemlerdeki makroskobik görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir.

Kod	0. Gün	10 gün	20 gün	30. gün
GS				
BG				
KS				

Şekil 3. Guar sakızı (GS), buğday gluteni (BG) ve ksantan sakızından üretilen köpüklerin 0. günden 30. güne kadarki aşamalarına ait resimleri

Üretilen köpük malzemeler toprağa gömülmeden önce ve toprağa gömüldükten sonra 10'ar gün aralıklara çıkarılarak makroskobik yapıdaki değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde köpük malzemelerin yüzeylerinde bozunma sonucunda gözenekler oluştuğu ve yapısında çatlakların yer aldığı görülmektedir. 30. gün sonunda ise GS ve BG kodlu köpükler parçalanmaya başlamış, diğer taraftan KS kodlu köpüğün yüzeyinde bozunma kaynaklı büyük bir çöküntü meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4'te üretilen köpük malzemelerin bozunma sonucunda meydana gelen ağırlık değişimleri zamana bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 4. Süreye bağlı olarak üretilen köpüklerin bozunma sonucunda ağırlık değişimleri

Bozunmaya maruz bırakmadan önce GS, BG ve KS kodlu örneklerin ağırlıkları sırasıyla 23,53 g, 41,69 g ve 36,34 g olarak ölçülmüştür. Toprağa gömüldükten 10 sonra GS, BG ve KS kodlu örneklerin ağırlıklarında 0. güne göre sırasıyla %11,75, %14,12 ve 6,27 oranında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. 20 gün sonra ise bu azalma miktarı GS, BG ve KS kodlu örnekler için sırasıyla %23,54, %29,33 ve 23,39 oranında gerçekleşmiştir. 20. günün sonunda örnekler üzerinde görülen beyaz lifsel yapılar köpük malzemelerin mantar tahribatına uğradığının göstergesi olarak değerlendirilmektedir. 30. gün sonunda ise GS, BG ve KS kodlu örneklerin ağırlıkları 0. güne göre sırasıyla %45,98, %46,00 ve 46,42 oranında azalma göstermiştir. Bu sonuçlar çalışmada üretilen köpük malzemelerin polistiren ve polietilen köpükler gibi ticari köpüklerden çok daha kısa sürede bozunarak doğaya karışabileceğini göstermiştir (Ergün, 2023). Selüloz, nişasta, kitosan ve heparin gibi polisakkaritler kısa bir süre içinde (14 gün) doğada bozulabilmektedir. Poliamid epiklorohidrin ile selülozdan üretilen köpük malzemesinin %93'ünün 85 gün sonunda bozulduğu belirtilmiştir (Liao vd., 2022). Bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılan polilaktik asitin ise 6 ay ile 24 ay arasında bozulduğu ifade edilmektedir. (Tian ve Bilal 2020). Biyolojik olarak parçalanabilmesi, toksik olmaması ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle, biyobazlı polimerlerden yapılan köpüklerin, petrokimya ürünlerinden elde edilen alternatiflerinin yerini alabilecek potansiyele sahip olması önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, yalıtım amacıyla kullanılan ve çoğunlukla sentetik hammaddelerden üretilen köpük malzemelere alternatif biyo polimer bazlı köpük malzemeler üretilmiştir. Farklı biyo polimerlerin (GS, BG ve KS), ilavesiyle üretilen köpük malzemelerin yoğunluk, termal iletkenlik değerleri ve bozunma miktarı üzerine biyo polimer türünün etkileri araştırılmıştır. En düşük yoğunluk değeri 0,053 g/cm³ ile ksantan sakızı ilaveli köpük malzemelerden elde edilmiştir. Ayrıca termal iletkenlik katsayısı değerlerinin 0,0354 W/mK ile 0,0939 W/mK arasında değiştiği ve bu değerlerin literatürdeki diğer malzemelerle karşılaştırıldığında, kabul edilebilir aralıklarda olduğu tespit edilmiştir. Köpük malzemelerin gözenekli yapısının havayla dolması sayesinde düşük termal iletimin meydana geldiği ve bu sayede daha iyi bir ısı yalıtımı elde edildiği belirtilmektedir. Üretilen köpük malzemelerin yoğunluk değerleri arttıkça termal iletkenlik değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Biyolojik bozunma oranları belirlemek amacıyla toprağa gömülen örnekler 30 gün sonunda başlangıç ağırlıklarına göre (0. gün) %40,15 ile %48,45 oranında ağırlıklarında azalış görülmüştür. Çalışma kapsamında üretilen selüloz bazlı köpük malzemelerden özellikle GS ve KS'nin yapı sektöründe ısı yalıtımı sağlamak için çevre dostu bir alternatif olabileceği görülmektedir. Bu malzemeler, duvarlarda dolgu maddesi olarak kullanılarak, ısı kaybını azaltmakta ve enerji tasarrufu sağlayacaktır. Ayrıca, sandviç panellerde ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılarak, yapıların mekanik dayanımını artırıp ve ağırlığını azaltmaktadır. Bu şekilde, selüloz bazlı köpük malzemeler, hem ekonomik hem de ekolojik açıdan faydalı bir seçenek olacağı düşünülmektedir.

Yazar Katkıları

Yazar Mehmet Emin Ergün: Çalışmayı planlamıştır, çalışma planını oluşturmuştur, laboratuvar çalışmalarını yapmıştır, veri analizini yapmıştır ve makaleyi yazmıştır.

Yazar İsmail Özlüsoylu: Laboratuvar çalışmalarını yapmıştır, verileri toplamıştır ve makaleyi yazmıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Kaynaklar

- Abdo, S. M., Youssef, A. M., El-Liethy, M. A. and Ali, G. H. (2023). Preparation of simple biodegradable, nontoxic, and antimicrobial PHB/PU/CuO bionanocomposites for safely use as bioplastic material packaging. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-11.
- Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), 353-366.
- Borkotoky, S. S., Chakraborty, G. and Katiyar, V. (2018). Thermal degradation behaviour and crystallization kinetics of poly (lactic acid) and cellulose nanocrystals (CNC) based microcellular composite foams. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 118, 1518-1531.
- Ergün, M. E. (2023). Activated Carbon and Cellulose-reinforced Biodegradable Chitosan Foams. *BioResources*, 18(1), 1215-1231.
- Ergün, M. E., Özen E., Yıldırım, N. and Dalkılıç, B. (2020). Manufacture of wood fiber reinforced polyvinyl acetate rigid foams. *Ormançılık Araştırma Dergisi*, 7(2), 104-112.
- Gautam, R., Bassi, A. S. and Yanful, E. K. (2007). A review of biodegradation of synthetic plastic and foams. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 141, 85-108.
- Han, J. H., Lee, J., Kim, S. K., Kang, D., Park, H. B. and Shim, J. K. (2023). Impact of the Amylose/Amylopectin Ratio of Starch-Based Foams on Foaming Behavior, Mechanical Properties, and Thermal Insulation Performance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(7), 2968-2977.

- Hassan, M. M., Tucker, N. and Le Guen, M. J. (2020). Thermal, mechanical and viscoelastic properties of citric acid-crosslinked starch/cellulose composite foams. *Carbohydrate Polymers*, 230, 115675.
- Karimi, M., Heuchel, M., Weigel, T., Schossig, M., Hofmann, D. and Lendlein, A. (2012). Formation and size distribution of pores in poly (ϵ -caprolactone) foams prepared by pressure quenching using supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*, 61, 175-190.
- Katzbauer, B. (1998). Properties and applications of xanthan gum. *Polymer Degradation and Stability*, 59(1-3), 81-84.
- Kymäläinen, H. R. and Sjöberg, A. M. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(7), 1261-1269.
- Liao, J., Luan, P., Zhang, Y., Chen, L., Huang, L., Mo, L., ... and Xiong, Q. (2022). A lightweight, biodegradable, and recyclable cellulose-based bio-foam with good mechanical strength and water stability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107788.
- Liao, J., Luan, P., Zhang, Y., Chen, L., Huang, L., Mo, L., ... and Xiong, Q. (2022). A lightweight, biodegradable, and recyclable cellulose-based bio-foam with good mechanical strength and water stability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107788.
- Lujan, L., Goñi, M. L. and Martini, R. E. (2022). Cellulose–Chitosan Biodegradable Materials for Insulating Applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(36), 12000-12008.
- Mudgil, D., Barak, S. and Khatkar, B. S. (2014). Guar gum: processing, properties and food applications—a review. *Journal of Food Science And Technology*, 51, 409-418.
- Neugebauer, A., Chen, K., Tang, A., Allgeier, A., Glicksman, L. R. and Gibson, L. J. (2014). Thermal conductivity and characterization of compacted, granular silica aerogel. *Energy and Buildings*, 79, 47-57.
- Özen, E., Yıldırım, N., Dalkilic, B. and Ergun, M. E. (2021). Effects of microcrystalline cellulose on some performance properties of chitosan aerogels. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 23(26).1-10
- Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77-86.
- Santacruz-Vázquez, V., Santacruz-Vázquez, C. and Laguna Cortés, J. O. (2015). Physical characterization of freeze-dried foam prepared from aloe vera gel and guar gum. *Vitae*, 22(2), 75-86.
- Shen, Z., Kwon, S., Lee, H. L., Toivakka, M. and Oh, K. (2022). Preparation and application of composite phase change materials stabilized by cellulose nanofibril-based foams for thermal energy storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 222, 3001-3013.
- Simpson, A., Rattigan, I. G., Kalavsky, E. and Parr, G. (2020). Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams. *Cellular Polymers*, 39(6), 238-262.
- Palaniraj, A. and Jayaraman, V. (2011). Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. *Journal of Food Engineering*, 106(1), 1-12.
- Temiz, H. ve Yeşilsu, A. F. (2006). Bitkisel protein kaynaklı yenilebilir film ve kaplamalar. *Gıda Teknolojisi Dergisi*, 2, 41-50.
- Tian, K. and Bilal, M. (2020). Research progress of biodegradable materials in reducing environmental pollution. *Abatement of Environmental Pollutants*, 313-330.
- Wang, B., Qi, Z., Chen, X., Sun, C., Yao, W., Zheng, H., ... and Zhang, Y. (2022). Preparation and mechanism of lightweight wood fiber/poly (lactic acid) composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 217, 792-802.
- Wei, S., Yiqiang, C., Yunsheng, Z. and Jones, M. R. (2013). Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1278-1291.
- Yıldırım, N. (2018). Performance Comparison of Bio-based Thermal Insulation Foam Board with Petroleum-based Foam Boards on the Market. *BioResources*, 13(2), 3395-3403.

- Yıldırım, N., Özen, E., Ergün, M. E. and Dalkılıç, B. (2022). A Study on Physical, Morphological and Antibacterial Properties of Bio Polymers Reinforced Polyvinyl Acetate Foams. *Materials Research*, 25, e20210579.
- Zhao, L., Yang, G., Shen, C., Mao, Z., Wang, B., Sui, X. and Feng, X. (2022). Dual-functional phase change composite based on copper plated cellulose aerogel. *Composites Science and Technology*, 227, 109615.