

GUAR GAM İLAVELİ KİTOSAN KOMPOZİT FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU

Sevim GÜRDAŞ MAZLUM^{1,2*}, Asli Eda ERDOĞAN²

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

Geliş / Received 27.03.2025; Kabul / Accepted: 18.06.2025; Online baskı / Published online: 26.06.2025

Gürdaş Mazlum, S., Erdoğan, A. E. (2025). Guar gam ilaveli kitosan kompozit filmlerin karakterizasyonu. GIDA (2025) 50 (4) 506-518 doi: 10.15237/ gida.GD25048

Gürdaş Mazlum, S., Erdoğan, A. E. (2025). Characterization of guar gum-added chitosan composite films. GIDA (2025) 50 (4) 506-518 doi: 10.15237/ gida.GD25048

ÖZ

Bu çalışmada kitosana (CH) farklı oranlarda (%5-20) guar gam (GG) ilave edilerek kitosan biyokompozit yenilebilir film üretilmesi amaçlanmıştır. Kompozit filmlerin fiziksel, bariyer, mekanik, optik, termal ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Kompozit film bileşenleri arasındaki etkileşim FT-IR analizi ile termal kararlılığı ise DSC analizi ile araştırılmıştır. Kompozit filmlerin artan GG oranıyla daha pürüzsüz ve homojen yüzey morfolojisi sergilediği SEM analizi ile teyit edilmiştir. En düşük, nem içeriği (%21.27) ve su buharı geçirgenliği %15 GG ilaveli CH filmde, en düşük suda çözünürlük (%16.21) ise %20 GG ilaveli kitosan filmde tespit edilmiştir. En yüksek gerilme direnci (19.64 MPa) %10 GG ilaveli kitosan filmde, en yüksek kopma uzaması (%15.68) ve opaklık değeri %5 GG ilaveli kitosan filmde belirlenmiştir. Kitosan kontrol filmine kıyasla, GG ilavesi ile CH kompozit filmlerin suda çözünürlüğü, su buharı geçirgenliği ve esnekliği azalırken, opaklığın ve gerilme direncinin arttığı gözlenmiştir. Bulgularımız, GG ilaveli CH kompozit filmlerin biyobozunur, çevre dostu ve yenilebilir özellikleriyle geleneksel ambalajlara umut verici bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kitosan, guar gam, yenilebilir film, biyopolimer, biyokompozit

CHARACTERIZATION OF GUAR GUM-ADDED CHITOSAN COMPOSITE FILMS

ABSTRACT

In this study, it was aimed to produce chitosan (CH) biocomposite edible films by adding guar gum (GG) to chitosan at different ratios (5-20%). The physical, barrier, mechanical, optical, thermal, and microstructural properties of the composite films were investigated. The interaction between composite film components was investigated using FT-IR analysis, while thermal stability was investigated using DSC analysis. SEM analysis confirmed that the surface morphology of the composite films became smoother and more homogeneous with increasing GG content. The lowest moisture content (21.27%) and water vapour permeability were found in the CH film with 15% GG addition, and the lowest water solubility (16.21%) was found in the chitosan film with 20% GG addition. The highest tensile strength (19.64 MPa) was determined in the chitosan film with 10% GG addition, and the highest elongation at break (15.68%) and opacity value were determined in the chitosan film with 5% GG addition. Compared to the CH control film, it was observed that the

* Sorumlu yazar / Corresponding author

✉: sgurdas@cumhuriyet.edu.tr

☎: (+90) 346 219 1010

Sevim Gürdaş Mazlum; ORCID no:0000-0002-1166-422X

Asli Eda Erdoğan ORCID no: 0000-0002-6281-2747

addition of GG decreased the moisture content, water solubility, water vapour permeability, and flexibility of the chitosan composite films, while opacity and tensile strength increased. Our findings showed that CH composite films with GG addition could be a promising alternative to traditional packaging with their biodegradable, environmentally friendly, and edible properties.

Keywords: Chitosan, guar gum, edible film, biopolymer, biocomposite

GİRİŞ

Taze veya işlenmiş gıdaların güvenli bir şekilde tüketicilere ulaştırılabilmesi için gıdaların ambalajlanması büyük önem taşır. Gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan plastik ambalajlar, petrol türevi sentetik polimerlerdir. Plastik ambalajlar, modern toplumların günlük yaşamında vazgeçilmez bir unsur haline gelmiş olsa da çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlara neden olmaktadır (Priyadarshi ve Rhim, 2020). Petrol türevi bu malzemelerin doğada uzun süre parçalanmaması, toprak ve su kaynaklarında birikerek ekosisteme zarar vermesi, mikro plastiklerin gıda zincirine karışması gibi sorunlar, alternatif ambalaj çözümlerine olan ihtiyacı artırmaktadır (Frangopoulos vd., 2025). Bu nedenle, plastik ambalajlara alternatif oluşturabilecek, çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilen malzemelere olan ilgi giderek artmaktadır (Tang vd., 2018). Bu bağlamda, biyopolimerler, biyolojik uyumlulukları ve yenilebilirlik özellikleriyle geleneksel plastiklere karşı önemli bir alternatiftir. Biyopolimerler, plastik ambalajların çevre ve halk sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltma potansiyeline sahip olup, gıdaların raf ömrünü uzatarak israfı önleme ve çevre kirliliğini azaltma gibi ek avantajlar sunmaktadır (Wang vd., 2023). Son yıllarda bilim insanları, polisakkaritler, proteinler, lipidler ve bunların türevleri gibi doğal polimerleri, gıda ambalajları üretmek için sentetik plastiklerin yerine kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Polisakkaritler arasında selüloz türevleri, kitosan, nişasta, aljinat, karragenan ve pektin, film oluşturma yetenekleri nedeniyle en çok tercih edilenler arasındadır (Rao vd., 2010).

Kitosan selülozdan sonra dünyada en bol bulunan ikinci biyopolimerdir. Kitosanın içindeki amino ve hidroksil fonksiyonel gruplarının varlığı, onu farklı araştırma alanlarında kullanılabilen çok yönlü bir polimer haline getirir (Priyadarshi ve Rhim, 2020; Sharma ve Bhende, 2024). Çeşitli polimerler arasında, kitosan, iyi film oluşturma

yeteneği, düşük maliyeti, biyolojik olarak parçalanabilirliği, biyoyumluğu, toksik olmaması, antimikrobiyal aktivitesi ve kolay bulunabilirliği avantajları nedeniyle gıda ambalaj filmlerinin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Jiang vd., 2022; Wang vd., 2023; Sharma ve Bhende, 2024). Ancak, kitosanın düşük mekanik ve termal kararlılığı ve suya karşı yüksek hassasiyeti gibi dezavantajları, daha kısa bir gıda raf ömrüne yol açmış ve dolayısıyla gıda ambalajındaki uygulamalarını sınırlamıştır (Haghighi vd., 2020). Dezavantajlarını en aza indirmek için kitosanın diğer polimerlerle harmanlanması gerekir. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için kompozit oluşturma, karıştırma gibi uygulamalar umut verici tekniklerdir (Wang vd., 2023). Polisakkaritler arasında GG ve CH, fizikokimyasal özellikleriyle yenilebilir film üretiminde tercih edilen polimerlerdir (Rahman vd., 2021). Bu nedenle yenilebilir kompozit filmler üretmek için CH ve GG biyopolimerleri seçilmiştir.

Polisakkaritler arasında GG fizikokimyasal özellikleri ve yenilenebilir doğası nedeniyle endüstride geniş uygulama alanlarına sahiptir. Guar gam, guar bitkisinin tohumlarından elde edilir ve kolayca temin edilebilen bir polimerdir (Rahman vd., 2021). Doğal düz zincirli bir polisakkarit olan GG, suda çözünür, iyi biyoyumluluğa ve güçlü film oluşturma yeteneğine sahip üstün bir çapraz bağlama maddesidir (Wang vd., 2023). Guar gam konsantrasyonundaki artış, çözelti viskozitesini artıran moleküller arası zincir etkileşimlerini zenginleştirir. Çözelti formundaki guar gamın en ilginç özelliği, kararlı ve yüksüz yapısından kaynaklanan geniş bir pH aralığında toksik olmayan doğasıdır. Guar gamın son viskozitesi pH'dan etkilenmez. Guar gam zincirleri, sulu çözeltide hidrojen bağı oluşturan çok sayıda hidroksil grubu içerir (Sharma vd., 2018). Polisakkaritlerin karışımı ile üretilen filmler polimer zincirlerinin etkileşimleri nedeniyle

kırılgandır. Plastikleştiriciler, polimer zincirleri arasındaki moleküller arası kuvvetleri zayıflatır ve böylece özellikleri değiştirerek, esnekliği ve kırılma direncini artırır (Hiremani vd., 2022). Mevcut çalışmada kitosan ve guar gam kompozit filmleri hazırlanırken plastikleştirici olarak gliserol seçilmiştir.

Jiang vd. (2022) tarafından kitosan/guar gam film matrisine yeşil ceviz kabuğu özütü ilavesi ile aktif ambalaj filmi üretilmiş ve bu filmlerin mikro yapıları ve fizikokimyasal özellikleri karakterize edilmiştir. Bir başka çalışmada kitosan/guar zamkı/polivinil alkol (CGPM) matrisine moringa özütünün dahil edilmesiyle elde edilen aktif filmlerin mekanik, termal, yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiştir (Bhat vd., 2022). Wang vd. (2023) tarafından CH ve GG içeren film matrisine çapraz bağlayıcı ve aktif madde olarak karpuz kabuğu özütü eklenerek üretilen filmin (CG-WRE) özellikleri incelenmiştir. Bitki özütünün aktif bileşenlerinin CH ve GG film matrisine ilave edilmesi aktif ambalaj sistemleri tasarlamak için olası bir alternatiftir (Bhat vd., 2022). Bununla birlikte, bu biyoaktif bileşenleri biyolojik olarak parçalanabilir ambalajlara dahil edilmesi çalışmalarına rağmen, zayıf mekanik özellikler (çekme mukavemeti ve kopma uzaması) ve artan hidrofilite gibi sorunlar nedeniyle endüstri tarafından kabul görmemiştir (Frangopoulos vd., 2025). Literatürde sadece kitosan ve guar gamın birlikte kullanımına ilişkin sınırlı sayıda çalışmalar mevcut olmakla birlikte, bu iki polimerin sinerjistik etkileri ümit vaat etmektedir. Rahman vd. (2021) tarafından herhangi bir plastikleştirici kullanmadan çapraz bağlı guar gam-kitosan (GG-GH-C) kompozit filmi üretilmiş ve çapraz bağlı kompozit filmin, yüksek su stabilitesine, yüksek mekanik mukavemete ve zorlu çevre koşullarına karşı dirençli olduğu bildirilmiştir. Bir başka çalışmada, kitosan ve GG bazlı kompozit filmler üretilmiş ve bu filmlerin optik, mekanik, bariyer ve antimikrobiyal özellikleri incelenmiştir. CS/GG kompozit filmindeki GG konsantrasyonu %15 (v/v) olduğunda, kompozit filmin mekanik ve bariyer özellikleri önemli ölçüde iyileştiği ve antimikrobiyal aktivitesinde, kitosan filmlerine benzer olduğu bildirilmiştir (Rao vd., 2010).

Literatürde GG ilaveli kitosan kompozit filmlerin, film bileşenleri arasındaki etkileşimleri (FTIR), mikro yapıları (SEM) ve termal kararlılıkları (DSC) detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Bu çalışmanın amacı, gliserol kullanarak GG ve CH biyopolimerleri ile biyobozunur ve yenilebilir kompozit filmler üretme olasılığını araştırmak ve bu filmlerin fiziksel, mekanik, bariyer, termal ve mikroyapısal özelliklerini kapsamlı bir şekilde inceleyerek kullanılabilirliğini ortaya koymaktır.

MATERYAL METOT

Materyal

Kitosan (deasetilasyon derecesi >75) Sigma Aldrich'den (Sigma-Aldrich, Almanya) temin edilmiştir. Guar gam ve gliserol (Fluka) Sigma Aldrich'ten satın alınmıştır. Bu araştırmada kullanılan diğer tüm kimyasallar analitik saflıktadır.

Film Çözeltilerinin Hazırlanması ve Yenilebilir Film Üretimi

1 g kitosan, 100 mL %1 (v/v) asetik asit çözeltisi içinde 25°C'de 4 saat boyunca manyetik karıştırıcı yardımıyla çözündürülmüş, çözeltiye %0.5 (v/v) oranında gliserol eklenerek 6 saat boyunca karıştırılmıştır. Kitosan çözeltisinden hava kabarcıklarının ve çözünmeyen partiküllerin uzaklaştırılması için 4000 rpm'de 10 dk. santrifüj edilmiştir (Rao vd., 2010).

1 g guar gam damıtılmış suda karıştırılarak çözündürülmüş üzerine %35 (w/w) oranında gliserol eklenmiş ve çözelti 100 mL'ye tamamlanmıştır. Elde edilen %1'lik (w/v) GG çözeltisi manyetik karıştırıcıda 750 rpm, oda sıcaklığında homojenleştirildikten sonra 4000 rpm 12 dk santrifüj edilerek hava kabarcıkları ve çözünmeyen partiküller uzaklaştırılmıştır (Rao vd., 2010).

%1'lik (w/v) kitosan ve %1'lik (w/v) guar gam çözeltileri, GG (v/v) konsantrasyonu %0 (A), %5 (B), %10 (C), %15 (D) ve %20 (E) olacak şekilde karıştırılmıştır. Hazırlanan film çözeltileri 8 cm çapında teflon plakalara 10'ar mL olacak şekilde dökülüp 30°C'de 24 saat kurutularak analizlerde kullanılmak üzere depolanmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Guar gam ilaveli kitosan filmlerin bileşimi
Table 1. Composition of guar gum-added chitosan films

Film		Kitosan (g/100mL)	Guar Gam (g/100mL)
Film		Chitosan (g/100mL)	Guar Gum (g/100mL)
CH	A	1	0
CHGG5	B	0.95	0.05
CHGG10	C	0.90	0.1
CHGG15	D	0.85	0.15
CHGG20	E	0.80	0.20

Filmlerin Fizikokimyasal, Bariyer, Optik ve Mekanik Özellikleri

Filmler fiziksel ve mekanik özelliklerin karakterizasyonundan önce, filmlerdeki suyun dengesini sağlamak için 10 gün oda sıcaklığında %52 (doymuş magnezyum nitrat hegzahidrat çözelti) bağıl nem (RH) içeren bir şartlandırma desikatöründe tutulduktan sonra analizlerde kullanılmıştır.

Kalınlık ve Nem Miktarı

Filmlerin kalınlıkları 0.001 mm hassasiyet ile dijital bir mikrometre (Dasqua, İtalya) ile 10 farklı bölgeden ölçüldükten sonra bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Ortalama kalınlık değeri su buharı geçirgenliği ve mekanik analiz hesaplamalarında kullanılmıştır (Kurt ve Kahyaoglu, 2014).

Filmlerin nem içeriği, filmler 105±2°C'de 12 saat boyunca sabit ağırlığa ulaşana kadar kurutulmasıyla belirlenmiştir. Nem içeriği, filmlerdeki ağırlık kaybının yüzdesi olarak hesaplanmıştır (Roy ve Rhim, 2020).

Suda Çözünürlük Analizi

Filmler, 20x20 mm parçalara bölünüp kurutma fırınında 105°C'de 24 saat kurutulduktan sonra başlangıç kuru madde miktarı 0.0001g hassasiyette tartılarak belirlenmiştir. Film örnekleri 30 mL distile suya daldırılıp üzeri parafilm ile kapatılarak 25°C'de 24 saat bekletilmiştir. Filmler aynı sıcaklık ve süre ile tekrar kurutulup, son kuru madde miktarı belirlenmiştir. % film çözünürlüğü suda çözünen kuru madde miktarının başlangıçtaki kuru madde miktarına oranı olarak hesaplanmıştır (Roy ve Rhim, 2020).

Su buharı geçirgenliği (SBG)

Laboratuvar çalışmalarında su buharı geçirgenliği ASTM-E96 Standart Test Metoduna alternatif bir metotla gerçekleştirilmiştir (Kurt ve Kahyaoglu, 2014). 10 cm cam deney tüplerinin içine 1'er g silika eklenmiş (24 saat 104°C'de kurutulmuş) tartılmıştır (%RH=0%). Tüplerin ağzı şartlandırılmış film numuneleri ile kaplandıktan sonra sızdırmaz bir şekilde parafilm yardımıyla sabitlenmiştir. Tüpler, içerisinde doymuş magnezyum nitrat hegzahidrat bulunan (%RH:52) desikatöre konularak 25°C'de bir hafta boyunca günlük olarak ağırlık artışı izlenip grafik elde edilmiştir. Bağıl nem higrometre (Trotec, Almanya) yardımıyla ölçülmüştür. Ağırlık-zaman eğrilerinin doğrusal olduğu bölgenin eğiminden yararlanılarak filmin su buharı geçirgenliği eşitlik [1]'e göre hesaplanmıştır.

$$SBG = \frac{w \cdot x}{\Delta P \cdot A \cdot t} \quad (1)$$

Bu eşitlikte; w/t = lineer regresyon ($R^2 \geq 0.99$) ile hesaplanan zamana bağlı ağırlık değişimini (g/h), x film kalınlığı (mm), A film geçirgenlik alanı (m²) ve ΔP 25°C'de film boyunca oluşan kısmi basınç farkını (kPa) göstermektedir (Kurt ve Kahyaoglu 2014). SBG sonuçları g.mm/h.m².kPa olarak ifade edilmiştir.

Renk ve Opaklık Analizleri

Filmlerin rengi, üç farklı renk skalasına (L*, a* ve b*) ait sayısal değerleri veren Minolta (CR-400, Minolta Camera Co., Osaka, Japan) renk ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. L*, a* ve b* değerleri örneğe ait renk parametreleridir. Film örneklerinin renk ölçümleri, L= 93.49, a = 0.25 ve b=0.09 değerlerine sahip standart beyaz plaka üzerinde gerçekleştirilmiştir (Jouki vd., 2013). Farklı bölgelerden üç okuma yapıp kaydedilmiş

ve örneklerin toplam renk kaybı (ΔE) eşitlik [2] yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad (2)$$

Filmlerin opaklığı, dikdörtgen kesilen numunelerin spektrofotometrede (Optima SP 3000 Plus, Japan) 600 nm'de absorbens değerleri belirlenmiştir. Absorbans değerlerinden filmlerin opaklık değeri eşitlik [3] yardımıyla hesaplanmıştır (Souza vd., 2017).

$$\text{Opaklık} = \frac{A_{600 \text{ nm}}}{x} \quad (3)$$

Opaklık (1/mm), $A_{600 \text{ nm}}$:absorbans değeri ve x: film kalınlığı (mm)

Mekanik özellikler

Filmlerin mekanik özellikleri olan gerilme direnci (veya çekme dayanımı) (TS) ve kopma anında % uzama değerleri (EB) TA.XTPlus model (Stable Micro Systems, İngiltere) tekstür analiz cihazı ile belirlenmiştir. Ölçüm işlemi oda sıcaklığında ($24 \pm 1^\circ\text{C}$) 5 kg'lık yük hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Film örnekleri dikdörtgen biçiminde (6x1 cm) kesilmiş ve çekme probunun uç kısımlarından tutturulmuştur. Problar arası mesafe 50 mm olarak ayarlanmış ve filmler 10 mm/s hızda gerilmiştir. Gerilme ve kopma eğrilerini içeren grafiklerden TS (MPa) ve EB (%) parametreleri hesaplanmıştır. Kopma anında uygulanan maksimum kuvvet (TS) ile kopma uzaması (EB) miktarı cihaza bağlı bilgisayar programı ile kaydedilmiştir (Jouki vd., 2013).

Filmlerin yapısal karakterizasyonu

Filmler 10 gün oda sıcaklığında %52 bağıl nem (RH) içeren bir şartlandırma desikatöründe tutulduktan sonra, filmler bir hafta boyunca oda sıcaklığında %0 RH (silika jeller) altında desikatöründe şartlandırılmıştır. Şartlandırılan filmlerin DSC ve FT-IR analizleri yapılmıştır.

Üretilen filmlerin termal özellikleri Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) (Shimadzu-DSC 60) ile belirlenmiştir. Alüminyum kaplı DSC kapları içerisine film örnekleri (5-10 mg) konulmuş ve $10^\circ\text{C}/\text{dk}$. ısıtma oranı ile azot atmosferinde 0°C 'den 400°C 'ye kadar ısıtılmıştır (Yang et al. 2019).

Filmlerin moleküler karakterizasyonu, Fourier Dönüşümleri Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopisi (Bruker, Almanya) cihazıyla ölçülmüştür. Ölçüm $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ arasındaki frekanslarda ve 4 cm^{-1} çözünürlükte gerçekleştirilmiştir (Jiang et al., 2022).

Üretilen filmlerin yüzey morfolojisi ve mikro yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. Filmler ilk önce çift taraflı karbon bant ile monte edilmiş, daha sonra numunelerin yüzey iletkenliklerinin sağlanabilmesi için Quorum Q150R ES Sputter Coater marka kaplama cihazı ile numune yüzeyleri altın kaplanmıştır. Numunelerin SEM ile mikroyapı incelenmesi Mira 3XMU FE-SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

İstatistiksel Analiz

Deneyler üç kez tekrarlanmış ve elde edilen veriler standart hata ile birlikte ortalama değer olarak verilmiştir (ortalama $\pm$ SE). Grup ortalamaları arasındaki istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları değerlendirmek için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve Tukey çoklu karşılaştırma testleri uygulanarak $P < 0.05$ istatistiksel fark anlamlı kabul edilmiştir. Deneysel verilerin analizinde Minitab 13 (Minitab Inc., State College, PA, ABD) kullanılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Yenilebilir Film Hazırlanması

Yapılan ön deneylerde plastikleştirici ilave edilmeden yenilebilir kitosan ve guar gam filmlerinin hazırlanmasının çok zor olduğu görülmüştür. Deneme çalışmalarında filmlerin kırılma olmaları ve teflon yüzeylerden ayırırken film bütünlüklerinin bozulması nedeniyle gliserol kullanılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak farklı oranlarda gliserol ilavesi ile filmler üretilmiştir. 1 g kitosan için %0.5 (v/v) ve 1 g GG için %35 (w/w) oranında gliserol ilavesi ile hazırlanan filmlerin daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmüş ve bu oranlarda film hazırlanmasına karar verilmiştir.

Filmlerin Fizikokimyasal, Bariyer, Renk, Optik ve Mekanik Özellikleri

Kalınlık filmlerin mekanik, optik ve bariyer özellikleri gibi çeşitli fiziksel özellikleri etkilediğinden dolayı önemli bir parametredir. Hazırlanan farklı oranlarda GG ilaveli kitosan filmlerin kalınlık, nem içeriği, suda çözünürlük ve su buharı geçirgenlik değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Kitosan kontrol filmin kalınlığı 0.097 mm olarak ölçülmüştür (Çizelge 2). GG ilaveli kitosan kompozit filmlerin kalınlık değerleri incelendiğinde; film kalınlığı en düşük %20 GG içeren film ile en yüksek %5 ve %15 GG içeren filmler arasında değişmiş olup, bu değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($P>0.05$). Guar gam ilavesinin biyokompozit filmlerin kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür ($P>0.05$). Rao vd., (2010) tarafında kitosan ve GG karışımından 35 µm ortalama kalınlıkta filmler üretilmiştir. Mevcut çalışmadan daha düşük film kalınlığı elde etmişlerdir. Film kalınlıklarının farklı olmasında, kitosanın astilasyon derecesinin düşük olması, kullanılan gliserol miktarı, film üretiminde kullanılan çözelti miktarı ve kuruma koşulları etkili olabilir (Emir Çoban vd., 2024).

Gıdalardaki nem içeriği, gıdanın tazeliğinin korunması ve bozulmasında rol oynar. Bir ambalajın, kullanıldığı ürünün nemini dış etkenlerden koruyabilme yeteneği, o ürünün

kalitesinin korunması açısından gereklidir ve yenilebilir filmlerin nem içeriğinin bilinmesi ambalajlama uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Guar gam ilaveli kitosan kompozit filmlerinin nem içeriği en düşük %15 GG filmi %21.27 ile en yüksek %20 GG içeren film %31.90 arasında önemli ölçüde farklılık göstermiştir ($P<0.05$; Çizelge 2). Bu eğilim, muhtemelen su molekülleriyle hidrojen bağları oluşturabilen çok sayıda hidroksil grubu içeren guar gamın polisakkarit yapısı nedeniyle, daha yüksek GG ilavesi filmlerin higroskopik doğasını geliştirdiğini göstermektedir (Tang vd., 2018; Jiang vd., 2022). Kitosan kontrol filmi %29.78 nem içeriğine sahipti ve bu değer %5 GG ilavesiyle üretilen CHGG5 filminde %5.56 oranında azaldığı görülmüştür ($P<0.05$). CH ve GG arasında su bağlama bölgelerini geçici olarak azaltan bir etkileşimi yansıtır olabilir; benzer eğilim Emir Çoban vd., (2024) tarafından hazırlanan kompozit filmlerde de gözlemlenmiştir. Daha sonra %10 GG ilavesiyle kitosan kompozit filminin nem içeriği %28.15’e yükselmiştir ($P<0.05$). Kitosan kontrol filmine farklı oranlarda GG ilavesiyle nem içeriğinde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, guar gamın higroskopik yapısından ve yüksek su tutma kapasitesinden kaynaklanabilir (Jouki vd., 2013; Sharma vd., 2018). Guar gam ilavesi ile filmlerin nem içeriği başlangıçta azalmasına rağmen, GG miktarının artmasıyla filmlerin nem içeriğinde de artışa neden olmuştur.

Çizelge 2. Kitosan kompozit filmlerin kalınlık, nem içeriği, suda çözünürlük ve su buharı geçirgenlik değerleri

Table 2. Thickness, moisture content, water solubility and water vapor permeability values of chitosan composite films

Film <i>Film</i>	Kalınlık (mm) <i>Thickness (mm)</i>	Nem içeriği (%) <i>Moisture content (%)</i>	Suda çözünürlük (%) <i>Water solubility (%)</i>
A	0.097±0.005	29.787±0.004 ^{ab}	20.120±0.632 ^b
B	0.109±0.003	24.221±0.006 ^c	26.829±1.165 ^a
C	0.107±0.006	28.155±0.003 ^b	21.918±0.006 ^b
D	0.109±0.005	21.275±0.005 ^d	21.171±0.011 ^b
E	0.097±0.006	31.906±1.088 ^a	16.216±0.231 ^c

Ortalama ± standart hata, aynı sütundaki farklı harfler anlamlı farklılığı gösterir ($P < 0.05$)

Mean±standard error, Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)

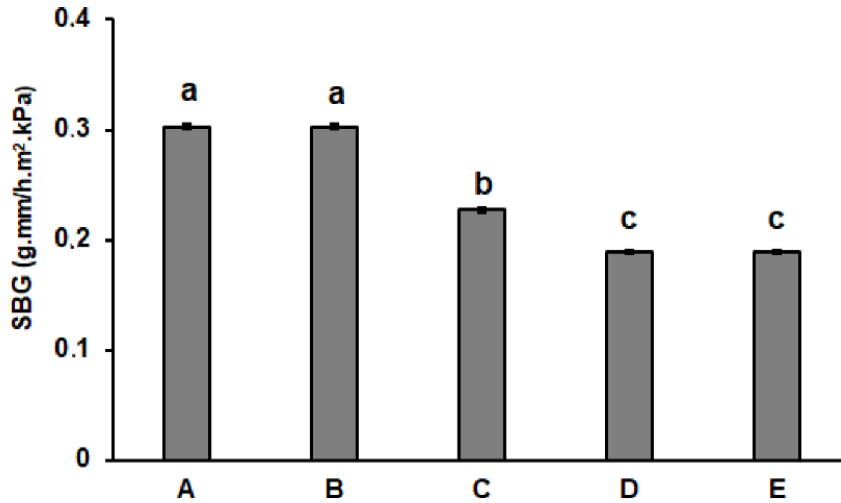
Filmin suda çözünürlüğü, filmin sulu ortamdaki suya direnme yeteneğini yansıtır. Biyopolimer filmlerin daha yüksek veya tam çözünürlüğü

parçalanma için yararlı olabilirken, filmlerin daha düşük çözünürlüğü ambalaj uygulamaları için tercih nedenidir (Jiang vd., 2022; Emir Çoban vd.,

2024). Kitosan kontrol filminin suda çözünürlüğü %20.12 olarak belirlenmiştir (Çizelge 2). Kitosana %5 GG ilavesiyle elde edilen kompozit filmin suda çözünürlüğünde önemli artış gözlenmiştir ($P<0.05$). Kitosan kontrol filmine göre; %10 GG ve %15 GG içeren kompozit filmlerin suda çözünürlüğünde meydana gelen artış istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır ($P>0.05$). Guar gam ilaveli kitosan filmler arasında, suda çözünürlük oranları %16.21 ile %26.82 arasında değişmiştir. Guar gam miktarı arttıkça suda çözünürlük değerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, guar gamın kitosan matrisi içerisinde daha yoğun bir ağ yapısı oluşturması ve suyun matrise nüfuz etmesini zorlaştırması ile açıklanabilir. Suda çözünürlük %5 GG ilavesiyle hafifçe artarken daha yüksek GG miktarıyla (%10 GG ve %20 GG) kademeli olarak azalmıştır. Moleküller arası hidrojen bağı, karışım filminin suda çözünürlüğünün azalmasının bir başka olası nedenidir. %20 GG ilaveli kitosan filmin daha düşük çözünürlüğü suya karşı direncinin arttığını göstermekte ve bu da onu nemli koşullarda stabilite gerektiren uygulamalar için umut verici

bir aday haline getirmektedir. Hiremani vd., (2022), benzer şekilde CH matrisindeki OMS (oksitlenmiş mısır nişastası) miktarının artırılmasıyla karışım filmlerinin suda çözünürlüğünü önemli ölçüde azalttığını rapor etmiştir.

Su buharı geçirgenliği, filmlerin ambalaj malzemesi olarak kullanılabilirliğini değerlendiren önemli bir parametredir. Yenilebilir filmler kaplandığı gıdanın nem alışverişini engelleyebilmelidir (Emir Çoban vd., 2024). Kitosan kontrol filmi ve %5 GG ilaveli kitosan filmi $0.303 \text{ g.mm/h.m}^2.\text{kPa}$ ile en yüksek su buharı geçirgenliği gösterirken, %15 ve %20 GG ilaveli kitosan filmleri $0.189 \text{ g.mm/h.m}^2.\text{kPa}$ ile en düşük su buharı geçirgenliği sergilemiştir ($P<0.05$). Bu azalma, guar gamın kitosan ile oluşturduğu yoğun matris yapısının su buharı geçişini engellediğini göstermektedir. Guar gam oranının artışı, filmlerin su buharına karşı bariyer özelliğini artırmış ve geçirgenlik değerlerini düşürmüştür (Rahman vd., 2021).



Şekil 1. Guar gam ilaveli kitosan kompozit filmlerin su buharı geçirgenlik değerleri

Figure 1. Water vapour permeability values of guar gum added chitosan composite films

Yenilebilir filmlerin rengi ve optik özellikleri ürünün genel görünüşü ve tüketici kabulünü etkileyen önemli parametrelerdir (Kurt ve Kahyaoglu, 2014). Film örneklerinin renk değerleri (L^* , a^* ve b^*), toplam renk farklılıkları

(ΔE^*) ve opaklık değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Kitosan kompozit filmlerin renk (L^* , a^* ve b^*), toplam renk (ΔE^*) ve opaklık değerleri
 Table 3. Colour (L^* , a^* and b^*), total colour (ΔE^*) and opacity values of chitosan composite films

Film Film	L^*	a^*	b^*	ΔE	Opaklık Opacity
A	89.66±0.05 ^a	0.780±0.006 ^a	-3.610±0.035 ^e	5.355±0.014 ^{ab}	1.27±0.01 ^e
B	88.99±0.01 ^b	0.260±0.020 ^c	-0.153±0.015 ^b	4.507±0.016 ^c	2.43±0.01 ^a
C	88.24±0.02 ^c	0.303±0.020 ^c	-1.200±0.112 ^c	5.411±0.005 ^a	1.77±0.01 ^c
D	89.78±0.03 ^a	0.520±0.005 ^b	-2.660±0.011 ^d	4.626±0.020 ^c	1.56±0.01 ^d
E	88.28±0.05 ^c	-0.120±0.011 ^d	0.220±0.023 ^a	5.224±0.057 ^b	2.03±0.09 ^b

Ortalama ± standart hata, aynı sütundaki farklı harfler anlamlı farklılığı gösterir ($P < 0.05$)

Mean ± standard error, Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)

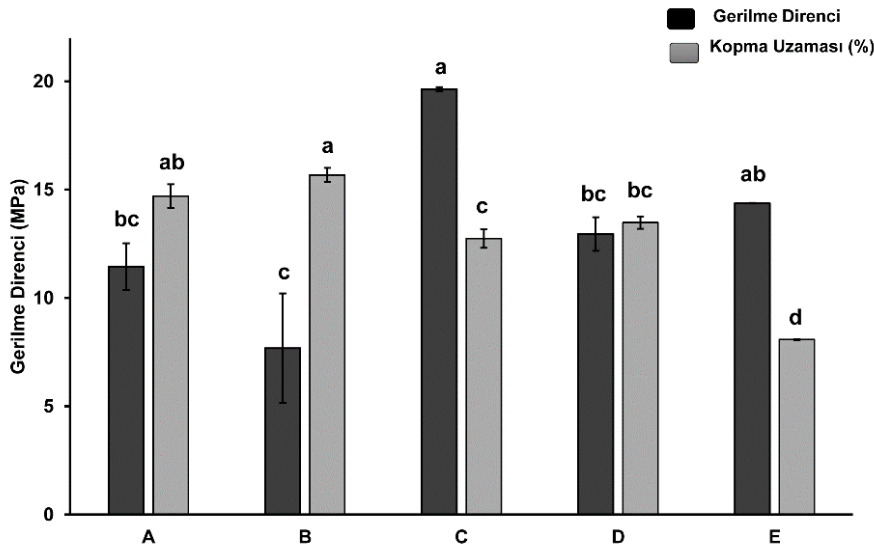
Renk farklılıkları L^* , a^* ve b^* gibi parametrelere göre belirlenir. L değeri açık-koyu yoğunluğunu, a değeri kırmızıdan yeşile geçişi ve b ise sarıdan maviye geçişi göstermektedir (Jiang vd., 2022). Filmlerin L^* değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişim gözlenmiştir ($P < 0.05$). L^* değeri en yüksek kitosan kontrol filmi ve %15 GG ilaveli kitosan filmlerinde en düşük ise %10 ve %20 GG ilaveli kitosan filmlerinde görülmüştür ($P < 0.05$). GG ilavesi, kitosan filmlerinin parlaklığını genel olarak azaltma eğiliminde bir davranış sergilemesine neden olmuştur. Benzer bir olgu Jiang vd., (2022) tarafından da gözlemlenmiştir. a^* değeri, en yüksek 0.78 kitosan kontrol filminde görülmüştür ($P < 0.05$; Çizelge 3). Artan GG ilavesi ile kitosan kompozit filmlerinin sergilediği pozitif a^* değerleri kırmızı olma eğilimini, %20 GG ilaveli kitosan filmin negatif a^* değeri ise yeşil olma eğilimini göstermiştir (Rao ve ark., 2010). Kitosan kontrol filminin b^* değeri -3.61 olarak belirlenmiştir. GG ilaveli kitosan filmler arasında, b^* değeri -2.66 ile -0.153 arasında değişmiştir ($P < 0.05$). Filmlerin negatif b^* değerleri maviye kayma eğilimlerini, %20 GG ilaveli kitosan filmin pozitif b^* değeri ise filmin sarıya kayma eğilimini göstermiştir (Rahman vd., 2021). Bununla birlikte, film örneklerinin a^* ve b^* değerlerinin sıfıra yakın olması, renk tonlarının güçlü olmadığını ifade etmektedir. Kitosan kontrol filminin toplam renk farkı (ΔE) değeri 5.355 olarak hesaplanmıştır. GG ilaveli kitosan filmlerin ΔE değerleri 4.507 ile 5.411 arasında değişmiş olup guar gamının renk üzerindeki etkisi sınırlı kalmıştır ($P < 0.05$).

Kitosan kontrol filminin opaklık değeri 1.27 mm^{-1} olarak hesaplanmıştır. Filmlerin opaklık değerleri arasında istatistiksel olarak önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir ($P < 0.05$). Guar gam ilaveli kitosan filmlerde opaklık değeri, en düşük %15 GG ilaveli (1.56 mm^{-1}) film ile en yüksek %5 GG ilaveli (2.43 ± 0.01) filmde görülmüştür. GG ilavesi ile kitosan kompozit filmlerinin opaklığında genel olarak artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar, CH-GG filmlerinin gıda sistemlerinde UV'nin neden olduğu oksidatif bozulmayı azaltmaya yardımcı olabileceğini göstermektedir (Rao vd., 2010; Hiremani vd., 2022). Bu bulgular, filmlerin gıda yüzeyi kaplaması olarak ürün görünümünün iyileştirilmesi amacıyla kullanıldığında oldukça önemlidir.

Gıda paketlemede yenilebilir filmler, mekanik yönden yeterli dayanıklılığa sahip olmaları ve gıdaların bütünlüğünü korumaları gerekir (Souza vd., 2017). Gıda ambalajının koruyuculuğu ve kullanıma karşı olan dayanımı yenilebilir filmin gerilme direnci ile ilgilidir (Erge, 2025). Yenilebilir filmlerin mekanik özellikleri arasında bulunan gerilme direnci (TS) ve kopma uzaması (%EB) önemli parametrelerdendir (Kurt ve Kahyaoğlu, 2014). Filmlere ait gerilme dirençleri ve % kopma uzama değerleri Şekil 2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Kitosan kontrol filminin gerilme direnci 11.45 MPa olarak ölçülmüştür. Kitosana %5 GG ilavesi ile gerilme direnci 7.68 MPa ile en düşük seviyeye inmiştir ($P < 0.05$). %10 GG ilavesiyle gerilme direnci 19.64 MPa ile en yüksek değere ulaşmıştır. CHGG5 ile CHGG10 filmleri karşılaştırıldığında, CHGG10 filminde GG miktarı 2 kat artarken gerilme direncinde yaklaşık 3 kat artış gözlenmiştir. Bu durum, kitosan

matrisine GG'in eklenmesi ile hidrojen bağları polimer ağ yapısını güçlendirerek daha dayanıklı ve esnek filmler oluşmasına katkıda bulunmuştur (Rahman vd., 2021). Guar gamın kitosan ile optimum oranlarda (%10 GG) sinerjik bir etki yaratarak mekanik dayanımı artırdığını göstermektedir. Literatürde, GG ilavesinin kitosan filmlerinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmektedir (Rao vd., 2010; Bhat vd., 2022; Jiang vd., 2022).

Kitosan kontrol filminin kopma uzaması %14.70 olarak ölçülmüştür. Kopma uzaması (elastikiyet) artan GG ilavesi ile azalma eğilimi göstermiştir. Guar gam ilaveli kitosan filmlerin EB değerleri %8.08 (%20 GG) ile %15.68 (%5 GG) arasında değişmiş ve bu değişim üzerine GG ilavesinin etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.05$). Bu sonuçlar, guar gamın filmin mekanik dayanıklılığını arttırdığını ve esnekliğini ise azalttığını göstermektedir.



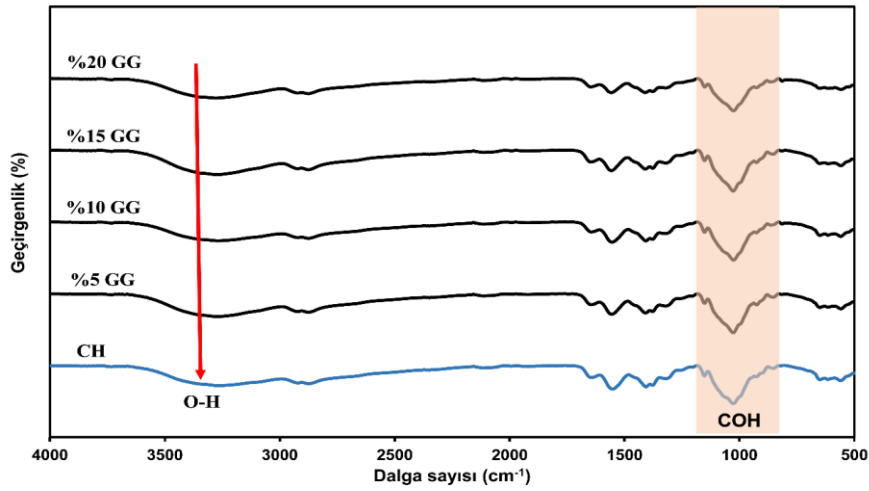
Şekil 2. Guar gam ilaveli kitosan kompozit filmlerin gerilme direnci ve kopma uzama
Figure 2. Tensile strength and elongation at break of guar gum-added chitosan composite films

Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu

Filmlerin FT-IR Analizi

FTIR spektroskopisi, kompozit filmin bileşenleri arasındaki moleküler etkileşimi incelemek ve filmlerin kimyasal yapısını tanımak için kullanılan bir yöntemdir. Moleküller arasındaki etkileşim, fonksiyonel grubun dalga boyu değişiminden analiz edilebilmektedir (Hiremani vd., (2022; Emir Çoban vd., 2024). Kitosan ve GG ilaveli kitosan kompozit filmlerdeki spesifik fonksiyonel grupları araştırmak ve filmlerin bileşenleri arasındaki etkileşimleri anlamak için Kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılmıştır. Kitosan ve GG ilaveli kitosan kompozit filmlerin FTIR spektrumları Şekil 3'de verilmiştir. Kitosan filmin spektrumunda, 3268 cm⁻¹'de bulunan geniş pik O-H ve N-H gerilme titreşimini temsil etmektedir (Hiremani vd., 2022). 2920 ve 2873 cm⁻¹'de

görülen pikler ise simetrik ve asimetrik C-H gerilme titreşiminin karakteristiği olup polisakkaritin tipik özelliğidir (Emir Çoban vd., 2024). 1644 cm⁻¹'deki küçük pik C=O gerilmesine (amid I), 1553 cm⁻¹'deki pik N-H bükülmesine (amid II), ve 1026 cm⁻¹'deki keskin pik COH germe bantlarına atfedilir (Hiremani vd., 2022; Emir Çoban vd., 2024). 1320 cm⁻¹'deki pik amid III'ün C=N gerilmesine karşılık gelir. CH₂ bükülmesi ve CH₃ simetrik deformasyonları, sırasıyla 1407 cm⁻¹ ve 1377 cm⁻¹ civarındaki bantların varlığıyla doğrulanır (Emir Çoban vd., 2024). Ayrıca β (1→4) glikozit bağlarından kaynaklanan CO gerilme titreşimi 1152 cm⁻¹'de görülmektedir (Menazea vd., 2020). 921 cm⁻¹'deki küçük pik kitosan sakkarit yapısının C-H salınım titreşimini göstermektedir (Menazea vd., 2020).



Şekil 3. Guar gam ilaveli kitosan kompozit filmlerin FTIR spektrumları
 Figure 3. FTIR spectra of guar gum added chitosan composite films

Kitosan spektrumunda bulunan bütün bantlar diğer araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (Hiremani vd., 2022; Emir Çoban vd., 2024). Kitosana GG ilavesi ile bazı piklerin tepe noktalarında hafif kaymalar gözlenmiştir. Kitosan kontrol film spektrumunda O-H ve N-H gerilme titreşimini temsil eden 3268 cm⁻¹'deki pik, %5, %10, %15 ve %20 GG ilaveli kitosan kompozit filmlerde sırasıyla 3273, 3271, 3275 ve 3278 cm⁻¹'e kaymıştır. Kontrol filmine göre dalga sayındaki artış O-H grubunun arttığını ve hidrojen bağı oluştuğunu gösterir (Maiti vd., 2021). Kitosan filmindeki, simetrik ve asimetrik C-H gerilme titreşimini gösteren 2920 ve 2873 cm⁻¹'deki pikler %5, %10, %15 ve %20 GG ilaveli kitosan kompozit filmlerde sırasıyla, 2922-2874, 2920-2874, 2922-2874 ve 2921-2875 cm⁻¹'e kaymıştır. Kontrol filmindeki N-H bükülmesini temsil eden 1553 cm⁻¹'deki pik %5, %10, %15 ve %20 GG ilaveli kitosan kompozit filmlerde sırasıyla, 1555, 1554, 1555 ve 1556 cm⁻¹'de görülmüştür. Kitosan kontrol filmi ile GG ilaveli filmler arasında görülen bantlardaki kaymaların, kitosanın hidroksil ve amino grupları ile guar gamın hidroksil grupları arasında moleküller arası etkileşimden kaynaklandığı düşünülmektedir (Hiremani vd., 2022). Kitosan matrisine farklı oranlarda GG eklenmesi, bantlarda hafif bir kaymaya neden olsa da pik yoğunluklarında önemli bir etkisinin olmadığı ve yapısal bir

değişim gözlenmediği bulunmuştur (Emir Çoban vd., 2024).

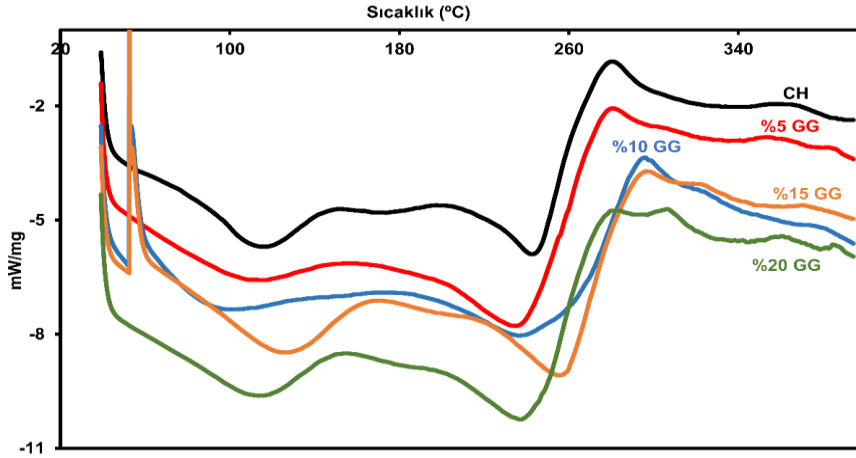
Termal Analiz

Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), yenilebilir filmlerin termal davranışını değerlendirmek için kullanılan termoanalitik yöntemlerden biridir. Biyopolimerik malzemelerin karakterizasyonuna, malzemelerin ısıtıldığında davranışlarının değerlendirilmesine katkıda bulunmaktadır (Santana ve Bonomo 2024). Yenilebilir film bileşenlerinin termal özellikleri DSC analizi ile araştırılmış ve örneklerin DSC termogramları Şekil 4'de verilmiştir. Kitosan ve GG ilaveli kitosan kompozit filmlerin DSC termogramları literatürle uyumlu iki endotermik ve bir ekzotermik piklerin varlığını göstermiştir (Hiremani vd., 2022; Emir Çoban vd., 2024).

Suyun buharlaşmasına bağlı olarak 116.53°C'de oluşan ilk endotermiktir pik kitosan zincirinin zayıfladığını göstermektedir (Şekil 4). Filmlerin hepsinde görülen ikinci endotermik tepe, filmlerin plastikleştirilmesinde kullanılan gliserolün parçalanmasına karşılık gelir. Bu değerler kitosan için 243°C ve %5, %10, %15 ve %20 GG ilaveli kitosan kompozit filmler için sırasıyla, 235, 220, 238 ve 23°C olarak belirlenmiştir. Kitosanda 280°C'de, polisakkarit omurgasının termal ayrışmasıyla ilişkili olan ekzotermik bir pik ortaya

çıkıştır (Yang vd., 2019). GG ilavesi kitosan kompozit filmlerde de yaklaşık aynı noktada (280-281°C) görülen ekzotermik pikin, glukozamin

birimlerinin termal ayrışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Hiremani vd., 2022)

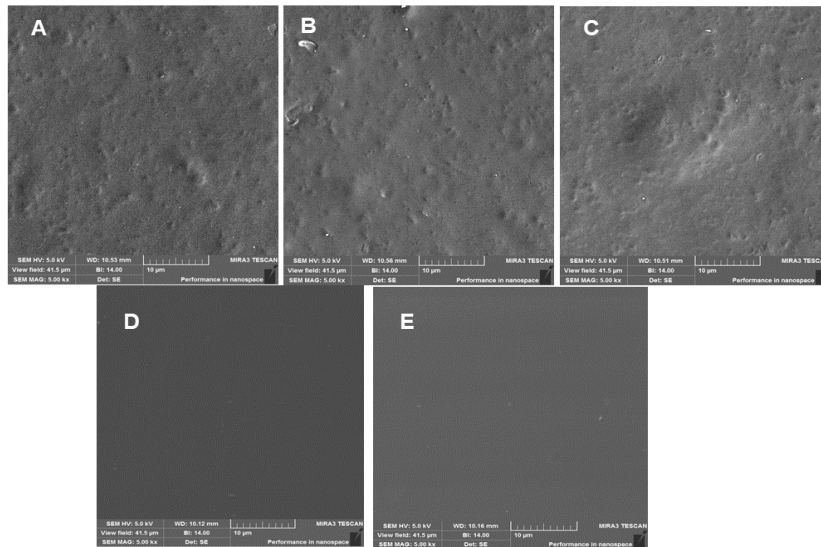


Şekil 4. Guar gam ilaveli kitosan kompozit filmlerin DSC termogramları
Figure 4. DSC thermograms of guar gum-added chitosan composite films

Yüzey Morfolojisi

Kitosan ve GG ilaveli kitosan kompozit filmlerin mikro yapılarını incelemek için SEM analizleri yapılmış ve SEM görüntüleri Şekil 5’de verilmiştir. Kitosan kontrol filmi hafif pürüzlü ve homojen bir yüzey sergilemiştir (Şekil A). %5 ve %10 GG ilaveli kitosan kompozit filmlerin yüzeyi düzgün ve kompakt yapısı kitosanın yüzey özellikleri ile benzerlik göstermiştir (Şekil B-C). %15 ve %20

GG ilaveli kitosan filmler daha pürüzsüz, homojen, gözeneksiz ve yoğun bir yüzey sergilemiştir (Şekil D-E). Artan GG ilavesinin kompozit filmlerin mikro yapılarını önemli ölçüde iyileştirdiği ve film bileşenleri arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Kitosan ve GG arasında hidrojen bağlarının oluşması, düzgün bir iç ağ yapısına katkı sağlamıştır (Wang vd., 2023).



Şekil 5. CH (A), % 5 GG (B), % 10 GG (C), % 15 GG (D) ve % 20 GG (E) filmlerinin yüzey morfolojisi.
Figure 5. Surface morphology of CH (A), 5% GG (B), 10% GG (C), 15% GG (D), and 20% GG (E) films.

SONUÇ

Bu çalışmada, farklı oranlarda guar gam ilaveli kitosan biyokompozit filmler hazırlanmış ve kompozit filmlerin fiziksel, bariyer, mekanik, optik, termal ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Guar gam ilavesi ile kitosan kompozit filmlerin termal kararlılıklarının arttığı, artan GG oranıyla daha pürüzsüz ve homojen yüzey morfolojisi sergilediği görülmüştür. Kitosan kontrol filmine kıyasla, artan guar gam ilavesi ile kitosan kompozit filmlerin su buharı geçirgenliği ve esnekliği azalırken, gerilme direncinin arttığı gözlenmiştir. Elde edilen kompozit filmlerin renk ve opaklık özellikleri incelendiğinde, guar gam ilavesi film parlaklığını azaltmış ve opaklığı ise arttırmıştır. Bu sonuç lipid oksidasyonuna karşı hassas olan gıdaların ambalajlanmasında guar gam ilaveli filmlerin kullanılmasının önemli bir avantaj sağlayacağını göstermektedir. Sonuç olarak bu çalışma, kitosan ve guar gam biyopolimer bileşenleri arasında pozitif bir etkileşim olduğu ve polimer bileşenlerinin her oranda karışabilirliği sayesinde biyobozunur ve yenilebilir film üretimi için %10 GG ilaveli kitosan kompozit filmin uygun olduğunu göstermiştir. Kitosan ve guar gam, kolay bulunabilirlikleri, ekonomik olmaları ve toksik olmayan yapıları nedeniyle vazgeçilmez biyopolimerlerdir ve plastik ambalajlara umut verici alternatiftir. Sürdürülebilir gıda ambalajlama çözümleri sağlayarak çevre kirliliğini azaltma ve gıda güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Asli Eda Erdoğan'ın yüksek lisans tezinin bir bölümünden hazırlanmıştır. Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimi tarafından (CUBAP) M-668 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

YAZAR KATKILARI

Sevim Gürdaş Mazlum: Çalışmanın tasarımı, planlanması, projenin yönetimi, verilerin analizi, makalenin yazımı, istatistiksel değerlendirilme ve görselleştirme, Asli Eda Erdoğan: araştırmanın yürütülmesi, denemelerin ve deneysel analizlerin gerçekleştirilmesi ve verilerin analizi aşamalarında görev almışlardır.

KAYNAKLAR

- Bhat, V.G., Narasagoudr, S.S., Masti, S.P., Chougale, R.B., Vantamuri, A.B., Kasai, D. (2022). Development and evaluation of Moringa extract incorporated Chitosan/Guar gum/Poly (vinyl alcohol) active films for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules* 200:50-60. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.116>
- Emir, Çoban, O., Akat, Z., Karatepe, P., İncili, G.K. (2024). In vitro bioactivity of biodegradable films based on chitosan/quince seed mucilage reinforced with ZnO-nanoparticle. *Food Measure* 18:5450–5461. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02579-7>
- Erge, A. (2025). Çörek otu yağı ile zenginleştirilmiş jelatin bazlı ambalaj filmi üretimi ve tavuk eti muhafazasında kullanımı. *GIDA 50* (1):15–27 doi: 10.15237/ gida.GD24104.
- Frangopoulos, T., Marinopoulou, A., Petridis, D., Rhoades, J., Likotrafı, E., Goulas, A., Fetska, D., Mati, E., Tosounidou, A., Triantafillou, V., Tsihlakis, K., Veskou, E., Ylli, S., Karageorgiou, V. (2025). Films from Starch Inclusion Complexes with Bioactive Compounds as Food Packaging Material. *Food Bioprocess Technology*. 18:5164–5179 <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03757-1>
- Haghighi, H., Licciardello, F., Fava, P., Siesler, H. W., Pulvirenti, A. (2020). Recent advances on chitosan-based films for sustainable food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*.26:100551. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100551>
- Hiremani, V.D., Gasti, T., Masti, S.P., Malabadi, R.B., Chougale, R.B. (2022). Polysaccharide-based blend films as a promising material for food packaging applications: physicochemical properties. *Iranian Polymer Journal* 31: 503–518 <https://doi.org/10.1007/s13726-021-01014-8>
- Jiang, L., Wang, F., Xie, X., Xie, C., Li, A., Xia, N., Gong, X., Zhang, H. (2022). Development and characterization of chitosan/guar gum active packaging containing walnut green husk extract and its application on fresh-cut apple preservation. *International Journal of Biological*

- Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.145>
- Jouki, M., Yazdi, F.T., Mortazavi, S.A., Koocheki, A. (2013). Physical, barrier and antioxidant properties of a novel plasticized edible film from quince seed mucilage. *International Journal of Biological Macromolecules*. 62:500-507. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.09.031>
- Kurt, A., Kahyaoglu, T. (2014). Characterization of a new biodegradable edible film made from salep glucomannan. *Carbohydrate Polymers*. 104:50-58. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.003>
- Maiti, S., Mishra, D., Nambiraj, N. A., Jaiswal, A. K. (2021). Physical and self-crosslinking mechanism and characterization of chitosan-gelatin-oxidized guar gum hydrogel. *Polymers Testing*, 97, 107155. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107155>
- Menazea, A.A., Ismail, A.M., Awwad, N.S., Ibrahim, H.A. (2020). Physical characterization and antibacterial activity of PVA/Chitosan matrix doped by selenium nanoparticles prepared via one-pot laser ablation route. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5):9598-9606. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.077>
- Rahman, S., Konwar'a, A., Majumdar, G., Chowdhury, D. (2021). Guar gum-chitosan composite film as excellent material for packaging application. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100158. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100158>
- Priyadarshi, R., Rhim, J. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 62, 102346. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102346>
- Rao, M.S., Kanatt, S.R., Chawla, S.P., Sharma, A. (2010). Chitosan and guar gum composite films: preparation, physical, mechanical and antimicrobial properties. *Carbohydrate Polymers*. 82 (4):1243-1247. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.06.058>
- Roy, S.J., Rhim, W. (2020). Preparation of carbohydrate-based functional composite films incorporated with curcumin. *Food Hydrocolloids*, 98:105302. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105302>
- Santana, R.F., Bonomo, R.C.F. (2024). Thermal analysis for evaluation of biodegradable films: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 149:7155–7168. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13339-6>
- Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Al-Muhtaseb, A.H., Naushad, M., Ghfar, A.A., Mola, G.T., Stadler, F.J. (2018). Guar gum and its composites as potential materials for diverse applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 199:534-545. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.053>
- Sharma, S., Bhende, M. (2024). An overview: non-toxic and eco-friendly polysaccharides—its classification, properties, and diverse applications. *Polymer Bulletin*. 81:12383–12429 <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05307-9>
- Souza, V.G.L., Fernando, A.L., Pires, J.R.A., Rodrigues, P.F., Lopes, A.A., Fernandes, F.M.B., (2017). Physical properties of chitosan films incorporated with natural antioxidants. *Industrial Crops and Products*. 107:565-572. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.056>
- Tang, Y., Zhang, X., Zhao, R., Guo, D., Zhang, J. (2018). Preparation and properties of chitosan/guar gum/nanocrystalline cellulose nanocomposite films. *Carbohydrate Polymers*, 197, 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.073>
- Wang, F., Xie, C., Ye, R., Tang, H., Jiang, L., Liu, Y. (2023). Development of active packaging with chitosan, guar gum and watermelon rind extract: Characterization, application and performance improvement mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*. 227:711-725. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.210>
- Yang, K., Dang, H., Liu, L., Hu, X., Li, X., Ma, Z., Wang, X., Ren, T. (2019). Effect of syringic acid incorporation on the physical, mechanical, structural and antibacterial properties of chitosan film for quail eggs preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141:876-884. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.045>