



Müsilaj ve PDMS ile Geliştirilen Çift Katmanlı Alternatif Gıda Kaplamaları

Double-Layered Alternative Food Coatings Developed with Mucilage and PDMS

Behlül Koç-Bilican^{*1} , İsmail Bilican² 

¹ Aksaray Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, 68100 Aksaray,, TÜRKİYE

² Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 68100 Aksaray, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 12/12/2023

Kabul/Accepted: 23/12/2023

Çevrimiçi Basım/Published Online: 31/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2024

Öz

Son yıllarda, malzeme bilimindeki ilerlemelerle birlikte çevre, sağlık ve gıda sektörlerinde karşılaşılan sorunlara doğal çözümler arayışı artmıştır. Atık plastiklerin çevresel kirlilik yaratması ve toksik olmaları büyük endişe kaynağıdır. Bu nedenle, doğal polimer filmlerin geliştirilmesi, özellikle gıda endüstrisinde plastiklerin yerini alabilecek bir alternatif sunar. Bu çalışmada, omega-3, protein, yağ ve lif açısından zengin chia tohumundan elde edilen müsilaj ve polidimetilsiloksan (PDMS) filmlerinin kombinasyonu ile çift katmanlı filmler üretilmiştir. Filmlerin fizikokimyasal özellikleri Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi, termogravimetrik analiz, taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi gibi yöntemlerle karakterize edilmiştir. Son olarak, filmlerin su temas açısı ölçülmüş olup, çift katmanlı filmlerin iç tarafının hidrofilik dış tarafının ise hidrofobik özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Bu çalışma, çift katmanlı müsilaj-PDMS filmlerinin potansiyel olarak gıda paketleme uygulamalarında kullanılabilir bir alternatif ürün olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Gıda paketleme, Müsilaj, PDMS”

Abstract

In recent years, in parallel with advancements in materials science, there has been a growing pursuit of natural solutions to address environmental, health, and food industry challenges. The environmental pollution and toxicity associated with waste plastics have raised significant concerns. Therefore, the development of natural polymer films, particularly those derived from chia seeds rich in omega-3, protein, oil, and fiber, presents an alternative that could replace plastics in the food industry. In this study, double-layer films were produced by combining mucilage extracted from chia seeds and polydimethylsiloxane (PDMS). The physicochemical properties of the films were characterized using methods such as Fourier-transform infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, scanning electron microscopy, and energy-dispersive X-ray spectroscopy. Finally, the water contact angle of the films was measured, demonstrating that the inner side of the double-layer films is hydrophilic, while the outer side exhibits hydrophobic properties. This study suggests that dual-layer mucilage-PDMS films could be a potentially viable alternative in food packaging applications.

Key Words

“Food packaging, Mucilage, PDMS”

1. Giriş

Malzeme bilimindeki gelişmelerle birlikte, farklı yapı ve özelliklere sahip alternatif biyomalzemelerin geliştirilmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmalar, çevre, sağlık ve gıda alanlarında karşılaşılan evrensel sorunlara doğal çözümler sunma çabasının bir sonucudur. Bu sorunlardan biri de atık plastik problemidir. Plastik ürünlerin yaygın kullanılabilirliği ve düşük maliyeti, her yıl artan plastik atıklarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Atık plastiklerin doğada uzun süre bozulmaması ve toksik olmaları, çevresel kirliliğe yol açmaktadır.

Doğal ürünlerin plastiklerin yerini tamamen alması zor olabilir, ancak yüksek toksisiteyi azaltmak için alternatif doğal polimer filmlerin geliştirilmesi, özellikle gıda sektöründe büyük önem taşımaktadır (Ghaderi et al., 2014; Roy et al., 2012). Bu alanda daha önce kitosan, aljinat, jelatin gibi doğal polimerlerle yapılan çalışmalar başarılı olmuştur (Fakhouri et al., 2015; Siripatrawan & Kaewklin, 2018; Zhan et al., 2016). Bu tür yenilebilir filmler, düşük maliyetleriyle dikkat çekerken, düşük mukavemetleri nedeniyle uygulama alanları sınırlıdır. Bu zayıf yönü aşmak için filmlere bazı plastikleştiriciler eklenmektedir. Örneğin, gliserol, yaygın olarak kullanılan bir plastikleştiricidir (Cervera et al., 2004).

Bazı tohumların uygun nemli ortamlarda, şeffaf reçine benzeri tohuma sıkıca yapışan bir jel salgıladığı gözlemlenmiştir. Bu sıvıya "müsilaj" denir. Müsilajlar, nem ve kül ile birlikte yüksek miktarda karbonhidrat, protein ve az miktarda yağ içerebilir (Ayerza et al., 2002; Lin et al., 1994). Müsilajın işlevselliği tam olarak anlaşılammış olsa da soğuğa dayanıklılık, su taşıma, yara iyileşmesi, hücrelerin iyon dengesi ve bitkiler için bir karbonhidrat rezervi gibi önemli roller oynayabileceği öngörülmüştür (Jani et al., 2009). Son yıllarda keten tohumu, ayva çekirdeği ve chia tohumundan elde edilen müsilaj polimeriyle yapılan çalışmalar da dikkat çekmiştir (Bilican, 2023; Jouki et al., 2013; Mujtaba, Akyuz, et al., 2019; Mujtaba, Koc, et al., 2019). Chia tohumu, dünya genelinde omega-3 yağ asitleri, yüksek protein içeriği, sağlıklı yağlar ve lif bakımından zengin besin değeri ile tanınır (Reyes-Caudillo et al., 2008).

Polidimetilsiloksan (PDMS), şeffaf ve elastik olması, yanıcı ve toksik olmaması gibi özelliklere sahip olan silikon bazlı bir organik polimerdir (Wolf et al., 2018). Bu nedenle, PDMS sadece tıp ve kozmetik sektörlerinde değil, aynı zamanda gıda endüstrisinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Hunt & Tytgat, 2012). PDMS, belirli kısıtlamalara tabi olarak gıda katkı maddesi olarak onaylanmıştır. Bu bağlamda, Lu et al. (2016), PDMS yüzeyinin mikro desenlerle kaplanması bakteriyel yapışma etkisini azalttığını ortaya koymuştur. Diğer bir taraftan, Li ve Rabnawaz (2018), PDMS kullanılarak gıda güvenliği taşıyan ve suya dayanıklı kâğıt kaplamaların üretilebileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada, chia tohumundan elde edilen müsilaj matrisi ve PDMS filmi kullanılarak farklı kalınlıklarda çift katmanlı müsilaj-PDMS filmleri üretilmiştir. Bu filmler, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), termogravimetrik analiz (TGA), taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (SEM-EDX) gibi yöntemlerle fizikokimyasal olarak karakterize edilmiştir. Son olarak, filmlerin su teması açısı ölçülmüş olup, çift katmanlı filmlerin iç tarafının hidrofilik dış tarafının ise hidrofobik özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Doğal filmlerin uygulama alanlarını kısıtlayan suda çözünürlükleri, PDMS katmanı sayesinde geliştirilerek müsilaj kompozit filmlerin mukavemeti artırılmıştır. Bu çalışma, literatürde sıkça vurgulanan müsilaj bazlı filmlerin mukavemet zayıflıklarını giderme potansiyeline sahiptir, böylece gelecekte gıda paketlemesinde alternatif bir ürün olarak kullanılabilirliği öngörülmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Chia tohumu yerel bir marketten alınmıştır. Plastikleştirici olarak kullanılan gliserol (99.5%), Sigma-Aldrich, ABD'den satın alınmıştır. Filmlerin güçlendirilmesi için kullanılan PDMS (Sylgard 184), Dow Corning, ABD'den satın alınmıştır. Deney süresince distile su kullanılmıştır.

2.2. Müsilajın elde edilmesi

Chia tohumlarından müsilaj elde etmek için, tohumlara hidrasyon işlemi uygulanmıştır. İlk olarak, 100 g chia tohumu yıkanarak temizlenmiş ve ardından 500 ml su içeren bir beher içinde 1 gün boyunca 80°C'de karıştırılarak bekletilmiştir. Bekleme süresi sonunda, müsilajı salan tohumlar süzme torbası kullanılarak süzülüş ve tohum parçalarından ayrıştırılmıştır. Elde edilen müsilaj, deneyde kullanılmak üzere +4°C'de saklanmıştır.

2.3. PDMS'in hazırlanması

PDMS, 10:1 (ağırlıkça, baz: sertleştirme maddesi) oranında çapraz bağlayıcı (Sylgard 184, Silicon Elastomer) ile bir plastik bardak içerisinde karıştırma çubuğu kullanılarak 10 dk boyunca sürekli karıştırılarak hazırlanmıştır. Reaksiyon karışımındaki hava kabarcıklarını gidermek için vakum altında (10 mbar) 30 dk boyunca hava kabarcıkları giderilerek PDMS film solüsyonu elde edilmiştir.

2.4. Filmlerin hazırlanması

İlk olarak müsilaj kontrol film için 60 mL müsilaja 500 µl gliserol plastikleştirici olarak eklenmiş ve oluşturulan solüsyonun homojen olması için bir homojenizatör (Heidolph, SilentCrusher M) kullanılarak 10.000 rpm'de 5 dk karıştırılmıştır. Reaksiyon karışımındaki hava kabarcıklarını gidermek için sonikasyon (Wisd, WUC-D10H) uygulandıktan sonra müsilaj karışımı plastik petri kabına (8 cm

çapında) dökülmüştür ve 48 saat süre ile 30 °C’de kurumaya bırakılmıştır. PDMS kontrol filmi, hazırlanan film solüsyonundan plastik petri kabına (8 cm çapında) 5 g dökülmüştür ve 24 saat süre ile 30 °C’de kurumaya bırakılmıştır. Çift katmanlı filmlerde ise PDMS miktarı sabit tutularak 20 ve 60 mL müsilaajlarla iki tane çift katmanlı film üretilmiştir. PDMS yine aynı şekilde hazırlanmıştır. Müsilaajlar ise aynı oranlarda gliserol ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Petri kaplarına önce 5 g PDMS döküldükten sonra hemen üzerine 20 mL ve 60 mL müsilaaj çözeltisi dökülerek 48 saat süre ile 30 °C’de kurumaya bırakılmıştır. Filmler, sırasıyla müsilaaj-kontrol, PDMS-kontrol, M20-PDMS ve M60-PDMS şeklinde etiketlenmiştir. Üretilen müsilaaj-kontrol, PDMS-kontrol, M20-PDMS ve M60-PDMS filmlerin kalınlıkları dijital mikrometre (Mitutoyo,Çin) kullanılarak 10 farklı noktadan ölçülmüştür.

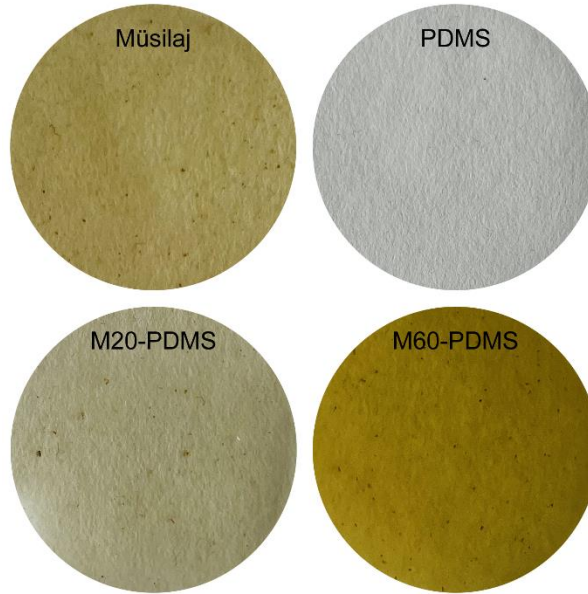
2.5. Fizikokimyasal karakterizasyon

Film örneklerinin kızılötesi spektrumları, Perkin Elmer Marka bir Spektrometre kullanılarak 400-4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında ve 8 cm^{-1} çözünürlük kullanılarak elde edilmiştir. Film örneklerinin termal stabilitesini değerlendirmek amacıyla termogravimetrik analiz, NETZSCH STA 449 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler, su ve kül içeriğinin incelendiği bir sıcaklık artışına tabi tutulmuş, bu artış 10 °C/dk ısıtma hızıyla 30 °C’den 700 °C’ye kadar artırılmıştır. Film örneklerinin yüzey morfolojileri, FEI marka FEG 250 model SEM cihazı kullanılarak incelenmiştir. Analizden önce, örnekler 10 nm kalınlığında altın tabakayla kaplanmıştır. Filmlerin temas açısı ölçümleri, Data Physics (OCA20) video tabanlı sistemde kaydedilmiştir. Her ölçüm için 5 μL ’lik bir su damlası kullanılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Filmlerin görünümü ve kalınlığı

Üretilen saf müsilaaj-kontrol film ve PDMS-kontrol film ile PDMS üzerine farklı oranlarda eklenmiş müsilaaj katmanlarla oluşturulan M20-PDMS ve M60-PDMS filmlerin görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir. Chia tohumundan elde edilen müsilaaj filmin ve çift katmanlı filmlerin homojen olduğu açıkça görülmektedir. Üretilen müsilaaj-kontrol film, PDMS-kontrol film, M20-PDMS ve M60-PDMS filmlerinin kalınlıkları sırasıyla 61 ± 0.23 , 693 ± 0.66 , 223 ± 0.29 ve 319 ± 0.32 μm olarak hesaplanmıştır.

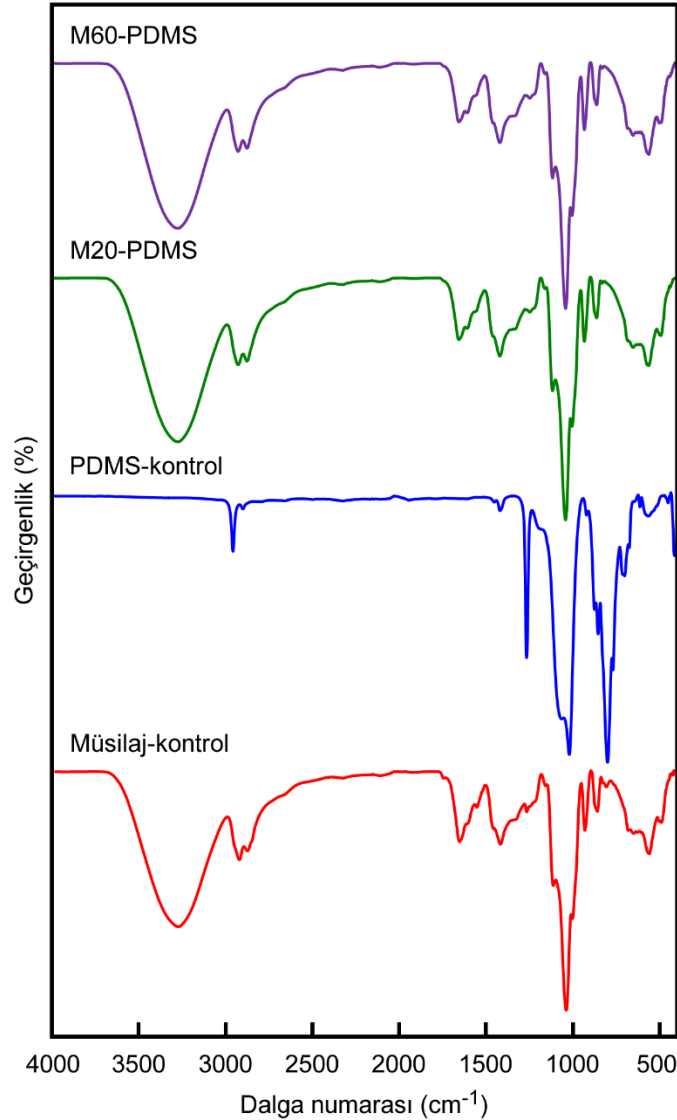


Şekil 1. Müsilaaj-Kontrol, PDMS-Kontrol ve Çift Katmanlı Kompozit Filmlerin Görüntüleri

3.2. FT-IR

Üretilmiş olan saf müsilaaj-kontrol film ve PDMS-kontrol film ile PDMS üzerine farklı oranlarda eklenmiş müsilaaj katmanlarla oluşturulan M20-PDMS ve M60-PDMS filmlerin matrislerindeki kimyasal değişimleri, fonksiyonel gruplar üzerinden değerlendirmek için FTIR spektrumları kaydedilmiştir. Spektrumlar Şekil 2’de gösterilmiştir. PDMS film için kaydedilen 2962 ve 2900 cm^{-1} pikleri PDMS yüzeyinde oluşan hidroksil gruplarına atfedilmektedir (Kim & Jeong, 2011). Müsilaaj kontrol filmde ise hemiselülozik polisakaritlerin OH gruplarına atfedilen geniş absorpsiyon piki 3292 cm^{-1} ’de ve 2928 ile 2878 cm^{-1} ’de kaydedilmiştir (Malekfar et al., 2010). Bu pikler M20-PDMS için 3282, 2932 ve 2880 cm^{-1} ’de, M60-PDMS için ise 3283, 2932 ve 2880 cm^{-1} ’de kaydedilmiştir. Buradaki piklerde kaydedilen kaymalar PDMS kaynaklı hidroksil pikinin benzer bölgede kendini göstermesi kaynaklı olabilmektedir. PDMS filmde karakteristik olan Si–O–Si asimetrik deformasyon piki 1010 cm^{-1} olarak kaydedilmiştir (Bodas & Khan-Malek, 2006). Bu pik M20-PDMS ve M60-PDMS için 1031 cm^{-1} ’de kendini göstermiştir. PDMS için karakteristik olan Si–C piki 863 cm^{-1} olarak ve bir diğer karakteristik pik olan Si–(CH₃)₂ piki 788 cm^{-1} olarak kaydedilmiştir (Bodas & Khan-Malek, 2006). Bu piklerin de içerisinde bulunduğu 1092–830 cm^{-1} aralığında kaydedilen pikler PDMS’in karakteristik sinyalleri olan güçlü Si-O

bantlarını ifade etmektedir (Rodkate et al., 2010). PDMS filme kompozit olarak eklenen müsilaj katmanı nedeniyle bu pikler belirgin olarak M20-PDMS ve M60-PDMS için 922 ve 851 cm^{-1} 'de kendini göstermiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda müsilajın protein ve karbohidrat içerdiği rapor edilmiştir (Marianela I Capitani et al., 2016; Guiotto et al., 2016). Burada müsilaj için 1650, 1551 ve 1412 cm^{-1} olarak kaydedilen pikler protein yapısının karakteristik piklerine karşılık gelmektedir (Marianela Ivana Capitani et al., 2016). Bu pikler M20-PDMS için 1650, 1551 ve 1413 cm^{-1} , M60-PDMS için ise 1651, 1551 ve 1412 cm^{-1} 'de kendini göstermiştir. Müsilaj filmde kaydedilen 1031 cm^{-1} piki hemiselülozik polisakaritlerin glikozidik bağına atfedilmektedir (Nazir & Wani, 2022). Bu pik M20-PDMS ve M60-PDMS için kaydedilen spektrumda, PDMS kaynaklı Si-O-Si asimetrik deformasyon ve Si-O bandı kaynaklı pikler ile birleşerek için 1031 cm^{-1} 'de çok daha keskin bir şekilde kendini göstermiştir. Kaydedilen bu sonuçlar çift katmanlı müsilaj-PDMS filmlerin başarıyla kompozit oluşturduğunu destekler niteliktedir.

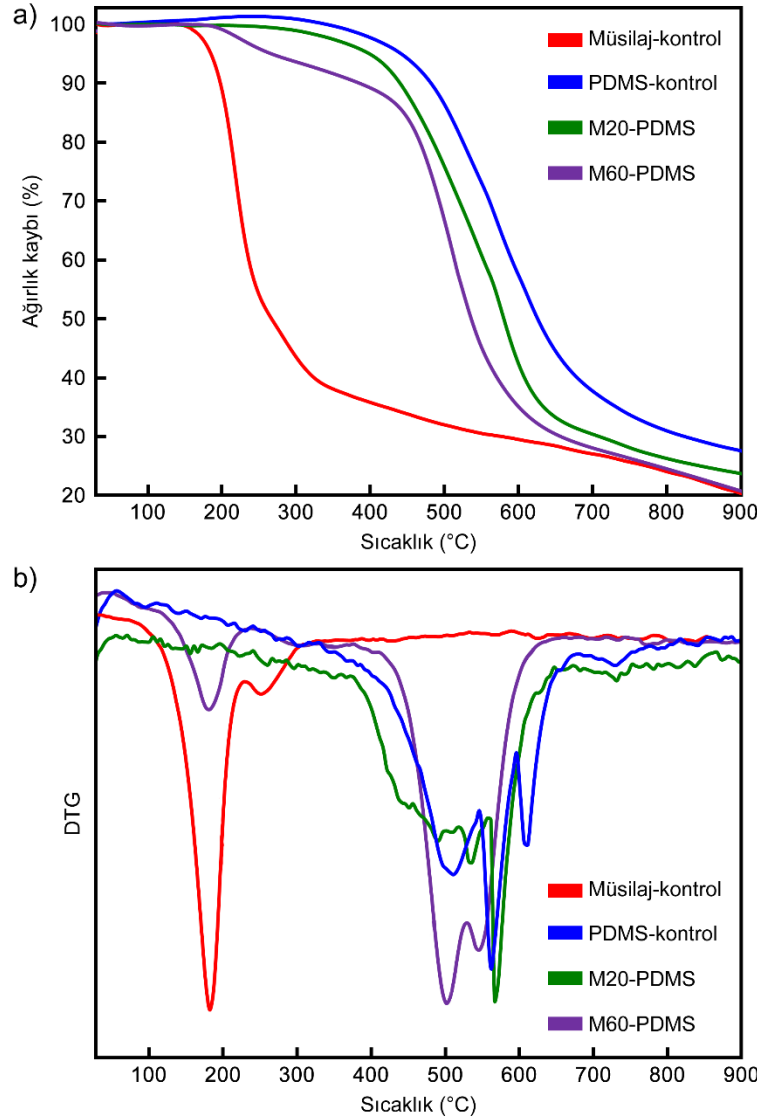


Şekil 2. Müsilaj-Kontrol Film, PDMS-Kontrol Film, M20-PDMS ve M60-PDMS Çift Katmanlı Filmlerine Ait FT-IR Spektrumları

3.3. TGA

Saf Müsilaj-kontrol film ve PDMS-kontrol film ile PDMS üzerine farklı oranlarda eklenmiş müsilaj katmanlarla oluşturulan M20-PDMS ve M60-PDMS filmlerin termal stabiliteleri TGA analizi ile belirlenmiştir ve elde edilen termogramlar Şekil 3'te gösterilmiştir. Burada saf PDMS film için 3 degradasyon piki kaydedilmiştir. Bunlardan ilki ana bozunma pikidir ve 527.9 $^{\circ}\text{C}$ 'de kaydedilmiştir. PDMS için 450-550 $^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleşen bozunma depolimerizasyon yoluyla gerçekleşen yeniden düzenleme bozulmasıdır (Camino et al., 2001; Camino et al., 2002; Sun et al., 2004). Burada farklı boyutlarda sıklık siloksanlar oluşmaktadır. PDMS film için ikinci bozunma piki 578.2 $^{\circ}\text{C}$ 'de kaydedilmiştir. Bu kaydedilen bozunma piki heterolitik bölünme ve ana zincirdeki Si-O-Si bağının yeniden düzenlenmesini temsil etmektedir (González-Rivera et al., 2018). PDMS film için son bozunma piki ise 696.9 $^{\circ}\text{C}$ 'de kaydedilmiştir. Burada gerçekleşen bozunma homolitik Si-CH₃ bağının ayrılması ve ardından hidrojen soyutlaması yoluyla gerçekleşen termal bozunma olarak ifade edilebilmektedir (Camino et al., 2002; Fang et al., 2015). Saf müsilaj filmde hazırlanmış kontrol filmde 2 degradasyon piki kaydedilmiştir. Piklerden ilki 189.9 $^{\circ}\text{C}$ 'de (DTG_{max}) kaydedilmiştir ve film matrisinde

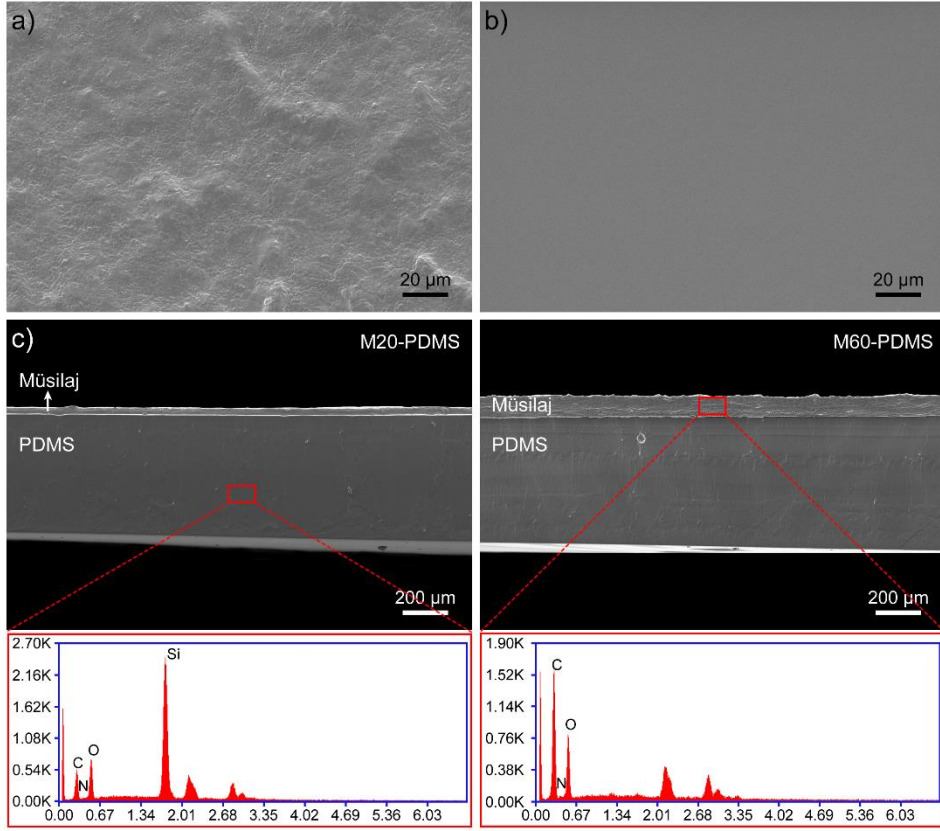
plastikleştirici olarak kullanılmış olan gliserolün bozunmasına atfedilmektedir (Cardenas & Miranda, 2004; Cerqueira et al., 2012). Gliserole ait bozunma piki M60-PDMS için 187.5°C'de kaydedilirken M20-PDMS termogramında gliserol için bozunma piki net olarak gözlemlenememiştir. Müsilaj kontrol filmde kaydedilen diğer pik 286 °C'de (DTG_{max}) kaydedilmiştir. Bu pik polisakkaritlerin (hemiselülozik glucomannan, ksilan vb.) bozunmasına atfedilmektedir (Azwa et al., 2013; Khazaei et al., 2014; Tantiwatcharothai & Prachayawarakorn, 2019). Müsilajın ana bozunma piki olan bu pik üretilen kompozit filmlerde PDMS'in keskin pikleri nedeniyle net olarak gözlemlenememiştir. Burada M20-PDMS için 507, 548 ve 582 °C'de kaydedilen pikler ile M60-PDMS için 501 ve 556 °C'de kaydedilen pikler PDMS'in depolimerizasyon yoluyla gerçekleşen yeniden düzenlenmesini temsil eden bozunma piki olarak yorumlanabilmektedir (Camino et al., 2001; Camino et al., 2002; Sun et al., 2004). Yapılan TGA analizleri ile müsilaj kontrol filmin düşük termal stabilitesinin, üretilen çift katmanlı müsilaj-PDMS filmler sayesinde artırıldığını açıkça gözlenmektedir. İyileştirilmiş termal özelliklerin, üretilen kompozit filmlerin uygulama alanlarına olumlu etkileri olacağı öngörülmektedir.



Şekil 3. Müsilaj-Kontrol Film, PDMS-Kontrol Film, M20-PDMS ve M60-PDMS Çift Katmanlı Filmlerine Ait Termogram Spektrumları (a) Yüzde Kütle Kaybı, (b) DTG

3.4. SEM-EDX

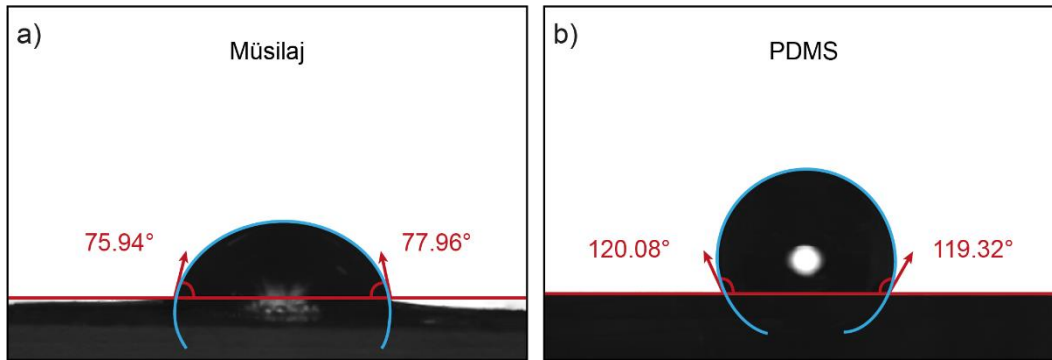
Saf Müsilaj-kontrol film ve PDMS-kontrol film ile PDMS üzerine farklı oranlarda eklenmiş müsilaj katmanlarla oluşturulan M20-PDMS ve M60-PDMS filmlerin yüzey morfoloji görüntüleri ve element içerikleri SEM cihazı ile alınmıştır ve elde edilen görüntüler Şekil 4'te gösterilmiştir. SEM görüntüleri, müsilaj ve PDMS kontrol filmlerinin yüzey morfolojilerinin homojen olduğunu göstermektedir. PDMS elastik özelliği sayesinde çift katmanlı filmleri daha esnek hale getirmektedir (Guler & Bilican, 2020). Çift katmanlı filmlerin kesit görüntüsü Şekil 4c'de verilmiştir. Her iki katmandan EDX analizi yapılarak müsilaj ve PDMS mikro fazlarının varlığı doğrulanmıştır. SEM görüntüleri çift katmanlı filmlerin başarılı bir şekilde üretildiğini göstermektedir.



Şekil 4. Filmlere Ait SEM Görüntüleri (a) Müsilaj-Kontrol Film, (b) PDMS-Kontrol Film, (c) M20-PDMS ve M60-PDMS Film Örneklerinin Kesit Görüntüsü, Müsilaj ve PDMS'e Ait EDX Spektrumu

3.5. Su Temas Açısı

PDMS düşük yüzey gerilimine sahip hidrofobik bir polimerdir. Bu özelliği sayesinde başta mikroakışkan sistemler olmak üzere, (Bilican, 2021; Bilican et al., 2020) çeşitli uygulamalarda yüzey gerilimini değiştirmek için kullanılmıştır (Torun et al., 2019). Literatürdeki çalışmalar doğal polimerlerden elde edilen filmlerin hidrofilik yapıda olduğunu göstermektedir (Koc et al., 2020; Muhtaba et al., 2019; Muhtaba et al., 2019). Mevcut çalışma, müsilaj ile PDMS'in birleştirilmesi sonucunda elde edilen çift katmanlı film içermekte olup, bu filmlerde bir yüzeyin hidrofilik, diğer yüzeyin ise hidrofobik özelliklere sahip olması hedeflenmiştir. Saf Müsilaj-kontrol film ve PDMS-kontrol film ile PDMS üzerine farklı oranlarda eklenmiş müsilaj katmanlarla oluşturulan M20-PDMS ve M60-PDMS film örneklerine ait su temas açısı sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir. Müsilaj kontrol filmin su temas açısı $76.78 \pm 1.18^\circ$, PDMS kontrol su temas açısı ise $119.41 \pm 0.89^\circ$ olarak kaydedilmiştir. Böylece, suya ilgisi farklı olan iki yüzeye sahip çift katmanlı filmler üretilmiş olmuştur. Gıda ile temas edecek olan yüzey hidrofilik özellikteyken, dış yüzeyin hidrofobik özellikte olması, üretilen filmlerin başta kuru gıdalar olmak üzere pek çok alanda kullanılabilecek dayanıklı, plastiklere alternatif bir ürün olabilme potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Müsilaj ve PDMS Film Yüzeylerine Ait Su Temas Açısı Görüntüleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, çevre, sağlık ve gıda sektörlerindeki sorunlara çözüm arayışı kapsamında, chia tohumundan elde edilen müsilağ ve polidimetilsiloksan (PDMS) filmlerinin kombinasyonuyla çift katmanlı filmlerin üretimini incelemektedir. Üretilen filmlerin fizikokimyasal özellikleri detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi, termogravimetrik analiz, taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi gibi analiz yöntemleriyle elde edilen veriler, filmlerin yapısını ve özelliklerini açıklamak için kullanılmıştır. Filmlerin su temas açısı ölçümleri, çift katmanlı filmlerin iç tarafının hidrofilik, dış tarafının ise hidrofobik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu özellik, gıda ile temas eden yüzeyin hijyenik olmasını ve su itici özellikleri korumasını sağlamak adına önemlidir. Sonuç olarak, bu çalışma, müsilağ ve PDMS'in kombinasyonu ile üretilen çift katmanlı filmlerin, gıda paketlenme endüstrisinde plastiklerin yerini alabilecek potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Filmlerin biyolojik özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, bu materyalin uygulama alanlarının daha iyi belirlenmesine yardımcı olacaktır.

Referanslar

- Ayerza, R., Coates, W. & Lauria, M. (2002). Chia seed (*Salvia hispanica* L.) as an omega-3 fatty acid source for broilers: influence on fatty acid composition, cholesterol and fat content of white and dark meats, growth performance, and sensory characteristics. *Poultry Science*, 81(6), 826-837.
- Azwa, Z., Yousif, B., Manalo, A. & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*, 47, 424-442.
- Bilican, I. (2021). Cascaded contraction-expansion channels for bacteria separation from RBCs using viscoelastic microfluidics. *Journal of Chromatography A*, 1652, 462366.
- Bilican, I. (2023). Preparation and Properties of Novel Mucilage Composite Films Reinforced with Polydimethylsiloxane. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2300317 (Early Access).
- Bilican, I., Bahadır, T., Bilgin, K. & Guler, M. T. (2020). Alternative screening method for analyzing the water samples through an electrical microfluidics chip with classical microbiological assay comparison of *P. aeruginosa*. *Talanta*, 219, 121293.
- Bodas, D. & Khan-Malek, C. (2006). Formation of more stable hydrophilic surfaces of PDMS by plasma and chemical treatments. *Microelectronic engineering*, 83(4-9), 1277-1279.
- Camino, G., Lomakin, S. & Lazzari, M. (2001). Polydimethylsiloxane thermal degradation Part 1. Kinetic aspects. *Polymer*, 42(6), 2395-2402.
- Camino, G., Lomakin, S. & Laguard, M. (2002). Thermal polydimethylsiloxane degradation. Part 2. The degradation mechanisms. *Polymer*, 43(7), 2011-2015.
- Capitani, M. I., Matus-Basto, A., Ruiz-Ruiz, J., Santiago-García, J., Betancur-Ancona, D., Nolasco, S. M., Tomás, M. C. & Segura-Campos, M. (2016). Characterization of biodegradable films based on *Salvia hispanica* L. protein and mucilage. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 1276-1286.
- Capitani, M. I., Nolasco, S. M. & Tomás, M. C. (2016). Stability of oil-in-water (O/W) emulsions with chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage. *Food Hydrocolloids*, 61, 537-546.
- Cardenas, G. & Miranda, S. P. (2004). FTIR and TGA studies of chitosan composite films. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 49(4), 291-295.
- Cerqueira, M. A., Souza, B. W., Teixeira, J. A. & Vicente, A. A. (2012). Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films—A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 27(1), 175-184.
- Cervera, M. F., Karjalainen, M., Airaksinen, S., Rantanen, J., Krogars, K., Heinämäki, J., Colarte, A. I. & Yliruusi, J. (2004). Physical stability and moisture sorption of aqueous chitosan–amylose starch films plasticized with polyols. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 58(1), 69-76.
- Fakhouri, F. M., Martelli, S. M., Caon, T., Velasco, J. I. & Mei, L. H. I. (2015). Edible films and coatings based on starch/gelatin: Film properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crimson grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 109, 57-64.

- Fang, W., Zeng, X., Lai, X., Li, H., Chen, W. & Zhang, Y. (2015). Thermal degradation mechanism of addition-cure liquid silicone rubber with urea-containing silane. *Thermochimica Acta*, 605, 28-36.
- Ghaderi, M., Mousavi, M., Yousefi, H. & Labbafi, M. (2014). All-cellulose nanocomposite film made from bagasse cellulose nanofibers for food packaging application. *Carbohydrate Polymers*, 104, 59-65.
- González-Rivera, J., Iglío, R., Barillaro, G., Duce, C. & Tinè, M. R. (2018). Structural and thermoanalytical characterization of 3D porous PDMS foam materials: the effect of impurities derived from a sugar templating process. *Polymers*, 10(6), 616.
- Guiotto, E. N., Capitani, M. I., Nolasco, S. M. & Tomás, M. C. (2016). Stability of oil-in-water emulsions with sunflower (*Helianthus annuus* L.) and chia (*Salvia hispanica* L.) by-products. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93(1), 133-143.
- Guler, M. T. & Bilican, İ. (2020). A new method for the measurement of soft material thickness. *Turkish Journal of Engineering*, 4(2), 97-103.
- Hunt, R. H. & Tytgat, G. (2012). *Helicobacter pylori: basic mechanisms to clinical cure*: Springer Science & Business Media.
- Jani, G. K., Shah, D. P., Prajapati, V. D. & Jain, V. C. (2009). Gums and mucilages: versatile excipients for pharmaceutical formulations. *Asian J Pharm Sci*, 4(5), 309-323.
- Jouki, M., Tabatabaei Yazdi, F., 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.
- Khazaei, N., Esmaili, M., Djomeh, Z. E., Ghasemlou, M. & Jouki, M. (2014). Characterization of new biodegradable edible film made from basil seed (*Ocimum basilicum* L.) gum. *Carbohydrate Polymers*, 102, 199-206.
- Kim, H. T. & Jeong, O. C. (2011). PDMS surface modification using atmospheric pressure plasma. *Microelectronic engineering*, 88(8), 2281-2285.
- Koc, B., Akyuz, L., Cakmak, Y. S., Sargin, I., Salaberria, A. M., Labidi, J., Ilk, S., Cekic, F. O., Akata, I. & Kaya, M. (2020). Production and characterization of chitosan-fungal extract films. *Food Bioscience*, 35, 100545.
- Li, Z. & Rabnawaz, M. (2018). Fabrication of Food-Safe Water-Resistant Paper Coatings Using a Melamine Primer and Polysiloxane Outer Layer. *ACS Omega*, 3(9), 11909-11916.
- Lin, K.-Y., Daniel, J. R. & Whistler, R. L. (1994). Structure of chia seed polysaccharide exudate. *Carbohydrate Polymers*, 23(1), 13-18.
- Lu, N., Zhang, W., Weng, Y., Chen, X., Cheng, Y. & Zhou, P. (2016). Fabrication of PDMS surfaces with micro patterns and the effect of pattern sizes on bacteria adhesion. *Food Control*, 68, 344-351.
- Malekfar, R., Nikbakht, A., Abbasian, S., Sadeghi, F. & Mozaffari, M. (2010). Evaluation of tomato juice quality using surface enhanced Raman spectroscopy. *Acta Physica Polonica A*, 117(6), 971-973.
- Mujtaba, M., Akyuz, L., Koc, B., Kaya, M., Ilk, S., Cansaran-Duman, D., Martinez, A. S., Cakmak, Y. S., Labidi, J. & Boufi, S. (2019). Novel, multifunctional mucilage composite films incorporated with cellulose nanofibers. *Food Hydrocolloids*, 89, 20-28.
- Mujtaba, M., Koc, B., Salaberria, A. M., Ilk, S., Cansaran-Duman, D., Akyuz, L., Cakmak, Y. S., Kaya, M., Khawar, K. M., Labidi, J. & Boufi, S. (2019). Production of novel chia-mucilage nanocomposite films with starch nanocrystals; An inclusive biological and physicochemical perspective. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 663-673.
- Nazir, S. & Wani, I. A. (2022). Fractionation and characterization of mucilage from Basil (*Ocimum basilicum* L.) seed. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 31, 100429.
- Reyes-Caudillo, E., Tecante, A. & Valdivia-López, M. A. (2008). Dietary fibre content and antioxidant activity of phenolic compounds present in Mexican chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Food Chemistry*, 107(2), 656-663.
- Rodkate, N., Wichai, U., Boontha, B. & Rutnakornpituk, M. (2010). Semi-interpenetrating polymer network hydrogels between polydimethylsiloxane/polyethylene glycol and chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), 617-625.

- Roy, N., Saha, N., Kitano, T. & Saha, P. (2012). Biodegradation of PVP–CMC hydrogel film: A useful food packaging material. *Carbohydrate Polymers*, 89(2), 346-353.
- Siripatrawan, U. & Kaewklin, P. (2018). Fabrication and characterization of chitosan-titanium dioxide nanocomposite film as ethylene scavenging and antimicrobial active food packaging. *Food Hydrocolloids*, 84, 125-134.
- Sun, J., Huang, Y., Cao, H. & Gong, G. (2004). Effects of ambient-temperature curing agents on the thermal stability of poly (methylphenylsiloxane). *Polymer degradation and stability*, 85(1), 725-731.
- Tantiwatcharothai, S. & Prachayawarakorn, J. (2019). Characterization of an antibacterial wound dressing from basil seed (*Ocimum basilicum* L.) mucilage-ZnO nanocomposite. *International journal of biological macromolecules*, 135, 133-140.
- Torun, I., Ruzi, M., Er, F. & Onses, M. S. (2019). Superhydrophobic coatings made from biocompatible polydimethylsiloxane and natural wax. *Progress in Organic Coatings*, 136, 105279.
- Wolf, M. P., Salieb-Beugelaar, G. B. & Hunziker, P. (2018). PDMS with designer functionalities—Properties, modifications strategies, and applications. *Progress in Polymer Science*, 83, 97-134.
- Zhan, X., Hu, G., Wagberg, T., Zhan, S., Xu, H. & Zhou, P. (2016). Electrochemical aptasensor for tetracycline using a screen-printed carbon electrode modified with an alginate film containing reduced graphene oxide and magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles. *Microchimica Acta*, 183(2), 723-729.