



## KURKUMİN TABANLI BİYOPOLİMER FİLMLEİN GÖRÜNÜR IŞIK ALTINDA GELİŞTİRİLMESİ

İdil Kit, Leyla Nesrin Kahyaoglu\*

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş / Received: 11.08.2022; Kabul / Accepted: 22.11.2022; Online baskı / Published online: 05.12.2022

Kit, İ., Kahyaoglu, L, N. (2022). Kurkumin tabanlı biyopolimer filmlerin görünür ışık altında geliştirilmesi. *GIDA* (2022) 47 (6) 1104-1117 doi: 10.15237/gida.GD22079

Kit, İ., Kahyaoglu, L, N. (2022). Development of curcumin based biopolymer films under visible light irradiation. *GIDA* (2022) 47 (6) 1104-1117 doi: 10.15237/gida.GD22079

### ÖZ

Çalışmanın amacı, kurkumin ve furan modifiye jelatin kullanarak görünür ışık altında gerçekleşen fotooksidasyon reaksiyonu ile bir kolorimetrik film geliştirmektir. Bu amaçla, sığır jelatini furfuryl izosiyanat ile modifiye edilerek görünür ışığa duyarlı furan modifiye jelatin (f-jelatin) sentezlenmiştir. Çalışmada kurkuminin hem görünür ışığa duyarlılaştırıcı olarak hem de toplam uçucu bazik azot algılayıcısı olarak kullanılması hedeflenmiştir. F-jelatin, jelatin ve kurkumin oranları değiştirilerek hazırlanan beş farklı filmle mekanik, bariyer, ısı ve mikro yapı karakterizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. %20 (h/h) kurkumin eklenmiş f-jelatin ile hazırlanan filmlerin (K20-FG), karakterizasyon deneyleri sonucu en iyi sonucu verdiği ortaya konmuştur. Daha sonra K20-FG filmlerinin farklı amonyak gazı konsantrasyonlarındaki renk değişim miktarına karar verilmiştir. Gaz algı testleri sonucunda proteince yüksek gıdaların bozulma takibinin geliştirilen K20-FG filmleri ile mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Kolorimetrik film, furan modifiye jelatin, kurkumin, görünür ışık, fotooksidasyon

## DEVELOPMENT OF CURCUMIN BASED BIOPOLYMER FILMS UNDER VISIBLE LIGHT IRRADIATION

### ABSTRACT

The aim of the study was to develop a colorimetric film with photooxidation reaction under visible light using curcumin and furan modified gelatin. For this purpose, bovine gelatin was modified with furfuryl isocyanate to synthesize photosensitive furan modified gelatin (f-gelatin). In the study, curcumin was expected to serve both as the visible light absorbing photosensitizer and the recognition agent for total volatile basic amines. Mechanical, barrier, thermal and micro structure characterization experiments were carried out with five different films prepared by changing f-gelatin, gelatin and curcumin ratios. Films (K20-FG) prepared with f-gelatin and 20% (v/v) curcumin was shown to give the best results as a result of characterization tests. Later, color difference values of K20-FG films against different concentrations of volatile ammonia were monitored. Gas sensing tests were shown that monitoring of protein rich food spoilage, could be possible with the developed K20-FG films.

**Keywords:** colorimetric film, furan modified gelatin, curcumin, visible light, photooxidation

\* Yazışmalardan sorumlu yazar / Corresponding author

✉: kaleyla@metu.edu.tr,

☎: (+90) 312 210 56 41

☎: (+90) 312 210 2767

İdil Kit; ORCID no: 0000-0003-3725-3039

Leyla Nesrin Kahyaoglu; ORCID no: 0000-0003-3548-4378

### GİRİŞ

Gıda kaynaklı hastalıklar, bazı zararlı bakteri, parazit veya virüslerle kirletilmiş gıdaların tüketilmesi sonucu ortaya çıkan gastrointestinal sistem enfeksiyonları veya tahrişleridir. Akut semptomlar kusma, ishal, karın ağrısı ve kısa süreli ateşi içerir. Ancak gıda zehirlenmesi belirtileri şiddetli olabilir ve bu nedenle hastaneye yatışlara ve ölümlere sebebiyet verebilir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), yaklaşık 600 milyon insanın kontamine gıda tüketmekten hastalandığını ve gıda kaynaklı hastalıkların her yıl 420.000 ölüme yol açtığını tahmin etmektedir (Havelaar vd., 2015). Türkiye İstatistik Kurumu'na (TÜİK) göre; 1993-2005 yılları arasında gıda kaynaklı hastalıklardan etkilenen 108.246 kişi hastaneye kaldırılmış ve 1993-2002 yılları arasında 1702 kişi ölümü rapor edilmiştir (Öz vd., 2014).

Gıda israfı temel olarak gıda ürünlerinin üretim sırasında veya sonrasında bozulması veya zarar görmesi olarak açıklanabilir (Giroto vd., 2015). Son kullanma tarihine bağlı geleneksel gıda paketlemesi, gıda israfının başlıca sebeplerinden biridir. Gıda ürünlerinde atık oranı %31'e ulaşmakta ve bunun yaklaşık %21'i direkt tüketicilere aittir (Buzby vd., 2014). Son kullanma tarihi yaklaştıkça çoğu tüketici gıda ürünlerini satın almamakta ve bu da gıda israfını artırmaktadır (Wilson vd., 2017). Akıllı paketleme, gıda ürünlerinin tazeliği hakkında gerçek zamanlı bilgi vererek gıda israfını en aza indirebilecek niteliktedir.

Kolorimetrik filmler, renk değişimlerine göre gıdanın bozulma derecesini gösteren akıllı paketleme örneklerindedir. Bu filmler, gıda ürünü bozulduğunda açığa çıkan uçucu amin gazları nedeniyle oluşan ortamdaki pH değişimini algılayarak renk değiştirirler (Biji vd., 2015). Genel olarak polimer yapıya asit-baz göstergelerinin eklenmesi ile üretilirler. Bazı sentetik asit-baz göstergesi örnekleri olarak bromokresol yeşili, fenol kırmızısı ve bromtimol mavisi verilebilir. Ancak son yıllarda ortam pH değişimlerine tepki gösterebilen doğal bileşikler ilgi görmeye başlanmıştır. Bunlara örnek olarak bazı çiçekler, ıspanak özleri, kurkumin ve antosiyaninler verilebilir (Musso vd., 2016).

Kurkumin antikanserojenik, antibakteriyel, antioksidan ve antiinflamatuvar pek çok ilgi çekici özelliğe sahip Curcuma longadan özütlenen bir doğal pigmenttir (Gökdemir vd., 2020). Görünür ışık tayfında ışık soğurum yeteneği ile toksik etki olmaksızın bir ışık duyarlaştırıcı görevi görebilir (Zhao vd., 2015). Bu özelliği görünür ışık altında yapılacak filmler için faydalı olabilecek niteliktedir. Ayrıca farklı pH değerlerine sahip ortamlarda kurkuminin bis-keto yapısının etkisiyle renk değiştirdiği gösterilmiştir. Bu nedenle, kurkuminin karragenan, selüloz, ve jelatin gibi biyoyumlu ve biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerle kullanımına yönelik pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Kuswandi vd., 2014; Liu vd., 2018; Musso vd., 2019).

Kolorimetrik filmlerin renk değişiminin kolayca algılanması için kullanılan destek malzemelerinin şeffaf veya renksiz olması gerekmektedir (Musso vd., 2019). Bu kriterler düşünüldüğünde sığır jelatini tüm beklenen özellikleri sağlamakta ve akıllı paketleme uygulamaları için mükemmel bir yapı oluşturmaktadır. Aynı zamanda jelatin et endüstrisi atıklarından düşük maliyetle elde edilen bir biyopolimer olarak film yapımı için yüksek potansiyele sahiptir. Genellikle suda çözünürlüğü ve su buharı geçirgenliğinin yüksek olmasından dolayı tek başına kullanılmayıp destekleyici maddeler ile kullanılır. Bu nedenle, kurkumin suda çözünmeyen yapısı ile jelatinin yapısını güçlendirmek adına kullanılabilir (Roy ve Rhim, 2020).

Pigmentler ve bazı biyomoleküllerin ısıya duyarlı olması nedeniyle görünür ışık veya yakın kızılötesi ışık dalga boyları ile yapılan film çalışmaları hız kazanmıştır (Son vd., 2010). Görünür ışık dalga boyu altında fotooksidasyon reaksiyonu ile çapraz bağ oluşumunu tetikleyerek ısıya ihtiyaç duymadan kolay ve hızlı bir şekilde film elde edilebileceği geçmiş çalışmalarda gösterilmiştir (Kim vd., 2018). Jelatine, furan fonksiyonel grubunun dahil edilmesiyle ışığa karşı duyarlı hale gelip görünür ışık altında fotooksidasyon kaynaklı çapraz bağlama mekanizması yoluyla film yapısı oluşturabilmektedir (Park vd., 2012). Bu çalışmadaki temel amaç görünür ışık altında

çapraz bağ yapabilen jelatin elde edip, kurkumin ile yapıyı güçlendirmektedir. Görünür ışık dalga boyu altında kolorimetrik film üretmek için sığır jelatini, furfuril jelatin ve kurkumin kombinasyonu incelenmiştir. Kurkuminin aynı anda ışık duyarlaştırıcı ve renk tespit maddesi olarak kullanımı literatürde ilk kez araştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Materyal

Sığır jelatini (200 bloom) Weishardt International (Liptovsky Mikulas, Slovakia) firmasından, gliserol, kurkumin, furfuril izosiyanat, dimetilsülfoksit (DMSO), etanol (EtOH) Sigma-Aldrich (Almanya) firmasından ve alınmıştır.

### Yöntem

#### *Furfuril jelatinin (f-jelatin) sentezi*

Sentez için Son ve arkadaşlarının (2010) f-jelatin sentezlemek için kullandığı yöntem takip edilmiştir. Kısaca 2 g sığır jelatini 80 ml su içinde 50°C sıcaklıkta çözdürülmüş ve 1 M NaOH kullanılarak çözeltinin pH değeri 11'e ayarlanmıştır. 250 ul furfuril izosiyanat, 20 ml DMSO içerisinde çözdürülmüş ve daha sonra karışım, damla damla jelatin çözeltisine ilave edilmiştir. Elde edilen nihai karışım 24 saat 45°C sıcaklıkta 500 dakika devir sayısında (dds) karıştırılmıştır. 24 saat sonunda çözeltinin pH değeri 1 M HCl ile 7'ye ayarlanmıştır. Çözelti, 48 saat süreyle distile su ile 1000 Dalton moleküler ağırlık kesimli diyaliz membranı kullanılarak her 12 saatte bir distile su yenilenerek diyaliz edilmiştir. Diyalizin ardından karışım dondurarak kurutucuda (Christ Alpha 2-4 LD Plus, Martin Christ, Almanya) 48 saat süre ile kurutulmuştur. Sonuçta katı formda furan ile değiştirilmiş jelatin (f-jelatin) elde edilmiştir.

#### *F-jelatin karakterizasyonu*

Bruker Avance 300 MHz Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi (NMR) kullanılarak, jelatin ve f-jelatinin <sup>1</sup>H NMR spektrumları, 10 ila 20 mg numunenin 1 ml döteryumoksit (D<sub>2</sub>O, Aldrich, ABD) içinde çözülmesinden sonra analiz edilmiştir. Buna ek olarak Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FDKS) ile furfuril grubunu eklemenin jelatinin muhtemel kimyasal bağ etkileşim ve değişimlerine etkisine bakılmıştır.

Ölçümler transmisyon modunda 2000 ile 600 cm<sup>-1</sup> aralığında gerçekleştirilmiştir.

#### *Kurkumin çözeltisinin spektral analizi*

Gerekli miktarda kurkumin tartılmış ve oda sıcaklığında etanol ile karıştırılmıştır. Santrifüj kullanılarak maksimum verimli çözünürlük değeri belirlenmiştir. Etanol kurkumin karışımı 1/500 hacim/hacim oranında etanol ile seyreltilmiştir. Spektrometre kullanılarak 428 nm dalga boyunda solüsyonun ışık soğurma miktarı ile Beer-Lambert kanunu uygulanarak Eşitlik (1) ile konsantrasyon hesaplanmıştır. Spektrometrede referans olarak saf etanol kullanılmıştır (Calloway, 1997).

$$A = \epsilon * C * L \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de A ışık soğurma, C molar konsantrasyonu ve L optik yol uzunluğunu (küvet ışık yolu 1 cm) göstermektedir.  $\epsilon$  kurkuminin etanol içerisindeki molar soğurma katsayısını ifade etmekte ve literatürden bu değer 54954 M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup> olarak alınmıştır (Jasim ve Ali, 1989).

UV-Vis spektrofotometre (Optizen Pop, Mecasys, Seoul, Kore) kullanılarak kurkumin (0.015 mg/ml) çözeltisinin 100 mM fosfat süspansiyonu içerisinde pH 1 ve 12 değer aralığındaki ışık tayfı ölçülmüştür.

#### *Film hazırlama*

Öncelikle distile su içerisinde iki farklı %5 ağırlık/hacim (a/h) sığır jelatini ve f-jelatin stok çözeltileri hazırlanmıştır. Film yapım öncül çözeltisinin içerisinde %4 a/h jelatin ve %1 a/h gliserol son konsantrasyonu sabit tutulmuştur. Etanol içerisinde 1.5 mg/ml kurkumin stok çözeltisi hazırlanmıştır. Bu stok çözeltiden öncül çözeltiye yapılacak filmin özelliğine bağlı olarak %10 h/h veya %20 h/h kurkumin eklenmiş ve gerekli olması durumunda öncül çözelti toplam hacim etanol ile tamamlanmıştır. Deneylerde ayrıca görünür ışık etkisini net olarak gözlemleyebilmek için 3 tip kontrol film örneği ile çalışılmıştır. Bu örnekler öncül film çözeltisinin gliserol ve jelatin konsantrasyonları yukarıda ifade edildiği şekilde sabit tutularak kurkumin eklenmemiş sığır jelatini ve f-jelatin ile %20 h/h kurkumin içeren sığır jelatini filmleridir. Film öncül çözeltileri hazırlandıktan sonra polipropilen petri kaplarına (90 mm çaplı) dökülmüştür. Petri

kapları ışık almayan bir kutunun içerisine yerleştirilmiş ve petri kapları içerisindeki çözeltiler 15 cm yükseklikten 30 dakika boyunca halojen (HalogenA Par38, 100 W, Philips) ışığın görünür dalga boyuna (400-800 nm) maruz bırakılmıştır. Ardından 48 saat desikatörde silika jellerle ortam bağıl nemi %10 civarında kontrol altında tutularak 23°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Son olarak ölçümler filmler bağıl nemi %50 olan 23°C'deki iklimlendirme kabini (TK120, Nuve, Ankara, Türkiye) içerisinde en az 48 saat koşullandırıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Kontrol filmler olan kurkuminsiz furfurilsiz sıgır jelatini filmi, kurkuminsiz f-jelatini filmi ve %20 h/h kurkumin ile furfurilsiz sıgır jelatini filmi sırasıyla K0-F0G, K0-FG ve K20-F0G olarak adlandırılmışlardır. Diğer taraftan %10 h/h kurkumin ve %20 h/h kurkumin ile f-jelatininden hazırlanan filmler sırasıyla K10-FG ve K20-FG olarak isimlendirilmiştir.

### Üretilen Filmlerin Karakterizasyon Analizleri

#### Kalınlık

Filmlerin kalınlığı 7 ayrı noktadan dijital mikrometre (LOYKA 5202–25, Loyka, Ankara, Türkiye) ile ölçülmüştür. Mekanik özelliklerin ve su buharı geçirgenliğinin belirlenmesi için ortalama film kalınlığı verileri kullanılmıştır.

#### Mekanik özelliklerin tayini

ASTM standart (ASTM D882-09,2009) yöntemi ile filmlerin gerilme direncini ve kopma anındaki uzama miktarı (%) belirlemek için tekstür analizörü (Brookfield CT3 Texture Analyzer, Middleboro, ABD) kullanılmıştır. Cihazda kullanılan filmlerin boyutları 2 cm x 8 cm olarak belirlenmiştir. Ölçümler, 25°C sıcaklıkta kontrollü bir odada tetik yükü 0.1 Newtona ve test hızı 0.4 mm/s'ye ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Gerilme direnci, maksimum yükün filmin kesit alanı ile bölünmesi ile bulunmuştur. Kopma anındaki uzama miktarı (%), numunenin başlangıçtaki uzunluğu ile kopma anındaki uzunluğu arasındaki değişim yüzdesi kullanılarak karar verilmiştir.

#### Su buharı geçirgenliğinin tayini

Su buharı geçirgenliği için ASTM metodu (ASTM E96-05, 2005) kullanılmıştır. İç çapı 4 cm olan PTFE silindirik test kapları %100 bağıl nemi

sağlamak için 35 ml su ile doldurulmuştur. Film örnekleri kap ve kapağı arasına sıkıştırılmıştır. Kapların ilk ağırlıkları kaydedilmiş ve sonra kaplar 23°C sıcaklıkta %0 bağıl neme sahip silika jel dolu bir desikatör içerisine yerleştirilmiştir. Sıcaklık, bağıl nem ve kapların ağırlıklarındaki değişim 12 saat boyunca her saat ölçülmüş ve filmlerin su buharı geçirgenliğinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Filmlerin ölçülen su buharı geçirgenliği değerleri Eşitlik (2) kullanılarak karar verilmiştir (Mchugh vd., 1993).

$$SBG = \frac{m*d}{A*P*(1-R_{avg})} \quad (2)$$

Bu denklemde, m her eğrinin eğimi (Dm/Dt, g H<sub>2</sub>O/s), d film kalınlığı (m), A nüfuz alanı (m<sup>2</sup>), P 23°C derece sıcaklıkta doymuş su buharı basıncı (P) ve R<sub>avg</sub> ortalama bağıl nemi ifade etmektedir.

#### Suda çözünme tayini

Filmlerin suda çözünmesi değerlerine Gontard ve arkadaşlarının (1994) çalışmasındaki yöntem kullanılarak karar verilmiştir. Suda çözünme testi için filmler 1 cm x 2 cm ebadında kesilmiş ve tartılmıştır. Daha sonra distile su içerisine konulmuş ve 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Aynı anda filtre kağıtları ve nem ölçümü için 3 adet film 105°C sıcaklıkta etüv fırında sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Daha sonra filtre kağıtları ve filmler fırından çıkarılıp tartılmıştır. Nem oranı ağırlık değişimi ile hesaplanmıştır. Sonra filmler filtre kağıtları ile süzölmüştür. Toplanan çözünmemiş kısım sabit ağırlığa gelene kadar 105°C etüv fırında kurutulup filmlerin kuru ağırlıklarına karar verilmiştir. Filmlerin başlangıç ağırlığı ile çözünme testinden sonra elde edilen kuru ağırlık kullanılarak suda çözünme yüzdesi hesaplanmıştır.

#### Isıl özelliklerin tayini

Isıl özellikler diferansiyel tarama kalorimetre (DTK) (Perkin Elmer, DSC 4000, CT, ABD) cihazı içerisinde -20°C ile 230°C sıcaklık aralığında gösterdikleri davranışlara göre karar verilmiştir. Ölçümler için hazırlanan film numuneleri dondurarak kurutucuda 48 saat süreyle kurutulmuşlardır. Alüminyum DTK numune kabına küçük parçalar haline getirilen filmler (5-10 mg) yerleştirilmiştir. Boş olarak kapatılan numune kabı, referans olarak kullanılmıştır.

### *Mikro yapı tayini*

Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) (Nova NanoSEM 430 elektron mikroskobu (FEI, Oregon, ABD), filmlerin kesit mikro yapılarını incelemek için kullanılmıştır. Film örnekleri sıvı nitrojen içerisine daldırılmış ve sonrasında dondurarak parçalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Parçalama işleminden sonra numuneler çift taraflı karbon bant ile alüminyum koçan üzerine sabitlenerek karbon ile kaplanmıştır. Filmlerin kesit alanları farklı büyütme oranında 20 kV değerinde yüksek voltajda görüntülenmiştir.

### *Filmlerin uçucu amonyak gazıyla renk değişimi*

Uçucu amonyak gazının farklı konsantrasyonlarına karşı filmlerin gösterecekleri renk değişimi akıllı paketleme uygulamaları için oldukça önemli niteliktedir. Bu amaçla 25 ml beher içerisinde uçucu amonyak gazını temsilen farklı konsantrasyonlarda amonyak çözeltisi hazırlanmıştır. Beher içerisindeki uçucu amonyak gazı konsantrasyonu (mg/100 g) Raoult yasasına göre 23°C sıcaklıkta amonyak buhar basıncı kullanılarak hesaplanmıştır (Ma vd., 2018). Hazırlanan filmler 2x2 cm ebadında kesilmiş ve çift taraflı bant ile şeffaf streç filme sabitlenmiştir. Daha sonra filmler farklı uçucu amonyak gazı konsantrasyonlarında çözeltiler içeren beherlerin 1 cm üzerine içeride kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Şeffaf filmlerin kalanı çözeltilerin hava ile temasını kesecek şekilde beherin ağız kısmında sıkıca kapatılmıştır. Klima ile sabitlenmiş oda sıcaklığında (23°C) 18 saat saklanan filmlerin tüm renk ölçümleri CIE L\*, a\*, b\* değerleri okuyan kolorimetre (Model, CR-410; Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japan) ile gerçekleştirilmiştir. Cihazda referans olarak beyaz kalibrasyon plakası alınmıştır.  $\Delta E^*$  değerleri Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

### **Veri analizi**

Tüm deneyler için üçerli örnekleme yapılmıştır. İstatiksel analizler tüm deney aşamalarında sonuçları değerlendirmek için istatistiksel analiz yazılımı (OriginPro) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerin istatistiksel

değerlendirmesi için Tukey posthoc testi ile tek yönlü varyans analizi (ANOVA) anlamlı farklılık değeri  $p < 0.05$  olacak şekilde yapılmıştır.

### **BULGULAR VE TARTIŞMA**

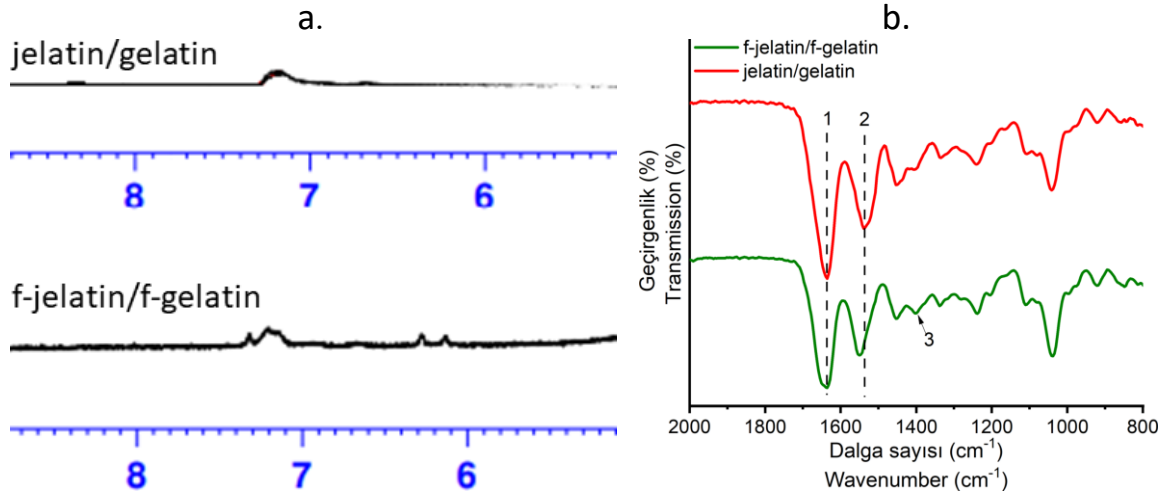
Jelatin sahip olduğu fonksiyonel hidroksil ve amin gruplarının etkisiyle izosiyanat ile aprotik ve inert dimetil sülfoksit gibi çözücülerin varlığında reaksiyona girmeye eğilimlidir. Genel olarak çapraz bağ yapımı izosiyanit ile jelatinin yapısında bulunan lisin, arginin gibi amino asitlerin bağımsız amin gruplarıyla serin, treonin ve tirozin gibi amino asitlerin hidroksil grupları arasında gerçekleşir (Bertoldo vd., 2007). Bunun yanı sıra izosiyanatların çok yönlü kimyası, furan gibi fonksiyonel gruplara sahip izosiyanat türevleri kullanıldığında çok işlevli sistemler sunar. Bu çalışmada f-jelatin furan grubunun furfural izosiyanatların yardımıyla sığır jelatinine katılmasıyla sentezlenmiş ve sentezlenen f-jelatinin ışık duyarlaştırıcı ajanlar vasıtasıyla fotooksidasyon reaksiyonuna katılarak film yapımında kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaçla ışığa duyarlaştırıcı olduğu bilinen doğal ve biyoyoumlu kurkumin kullanılmıştır (Seidi Damyeh vd., 2020). Mevcut çalışmada görünür ışığı soğuran kurkuminin düşük enerjili atmosferik oksijeni oldukça reaktif tekli oksijene dönüştüreceği ve sentezlenen f-jelatin yapısı içerisinde çapraz bağ yapıcı olarak çalışacağı öngörülmektedir.

### **F-jelatin Karakterizasyonu**

Jelatin ve f-jelatinin  $^1\text{H-NMR}$  spektrumları test edilmiştir (Şekil 1a). Jelatinde bulunan fenilalanin içindeki radikal grup bir benzen halkasıdır ve benzen protonu nedeniyle  $^1\text{H-NMR}$  spektrumunda 7.1604 ppm değerinde geniş bir tepe görülmüştür (Mazaki vd., 2014). F-jelatin örneklerinin  $^1\text{H-NMR}$  sonuçlarında, 7.2068 ppm değerinde bu pik daha küçük gözlenmiştir. Ayrıca bu pike ek olarak 7.3234, 6.2802 ve 6.1399 ppm değerlerinde üç pik daha görülmüştür. Benzer şekilde furan grubu için  $^1\text{H-NMR}$  zirvelerinin 7.435 ve 6.380 ppm değerlerinde olduğu literatürde gösterilmiştir (Son vd., 2010). Hepsi bir arada değerlendirildiğinde, f-jelatin için ekstra piklerin furan grubunun varlığını temsil ettiği sonucuna varılmıştır. Sığır jelatini furfural grubu

ile fonksiyonel hale getirilmeden önceki ve sonraki FDKS tayfı Şekil 1b’te gösterilmiştir. İşaretlenen dalga boylarından 1. ve 2.si jelatinin karakteristik noktalarını göstermektedir. İlki 1630  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısında amit 1 bandı C=O gerilme titreşimine, ikincisi 1540  $\text{cm}^{-1}$  dalga numarasında amit 2 bandı N-H bükülme titreşimine karşılık gelmektedir (Farris vd., 2010). Jelatin FDKS tayfı

literatür ile uyum göstermektedir (García-Astrain vd., 2014). Furan varlığı f-jelatin örneğinin furan halkalarının 1480  $\text{cm}^{-1}$  civarında gösterdiği gerilme titreşimleri ile gösterilmiştir (Guaresti vd., 2017; Nimmo vd., 2011). Özetle  $^1\text{H-NMR}$  ve FDKS sonuçları sığır jelatininin furan grubu ile başarı bir şekilde fonksiyonel hale getirildiğini kanıtlar niteliktedir.



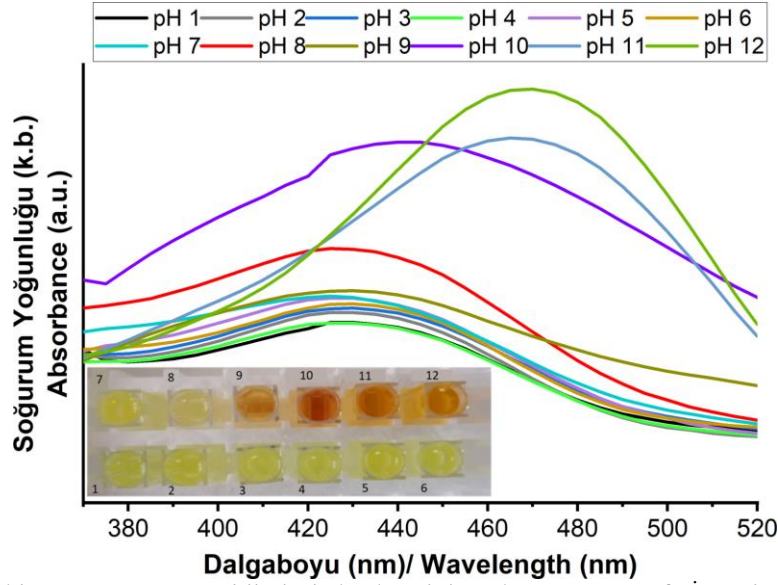
Şekil 1.a. Jelatin ve f- jelatinin  $^1\text{H-NMR}$  spektrumları b. Sığır jelatini furfuryl grubu ile fonksiyonel hale getirilmeden önce ve sonra FDKS tayfı

Figure 1.a.  $^1\text{H-NMR}$  spectra of gelatin and f-gelatin b. FTIR spectra of gelatin before and after furfuryl functionalization

### Kurkuminin optik karakterizasyonu

Kurkuminin ortam pH değerine göre beklendiği şekilde renk değiştirmesi, geliştirilmesi planlanan kolorimetrik filmlerin başarılı bir şekilde uygulanması için çok önemlidir. Çünkü özellikle proteince yüksek gıdalar bozulmaya başladıklarında salınan uçucu bazik azot gazları ortam pH değerini yükseltir (Ezati ve Rhim, 2020). Bu nedenle kurkumin çözeltisinin pH aralığı 1 ile 12 arasındaki ışık soğurması ölçülmüş ve soğurma tayfı Şekil 2’de gösterilmiştir. Maksimum ışık soğurma pH 8 değerine kadar 435 nm dalga boyunda gözlemlenirken daha yüksek pH değerlerinde maksimum ışık soğurma 470 nm dalga boyuna doğru kaymıştır. Bu kayma renkte kırmızıya eğilim olduğunu yani enerji seviyelerinin düştüğünün bir göstergesidir. Bu durum kurkuminin kimyasal yapısının pH ile değişimi ile açıklanabilir. Kurkumin bis-alpha-beta doymamış

beta kition yapısına sahip olup, bu yapı enol tautomerik haliyle denge halindedir (Sharma vd., 2005). Kurkumin bis-keto yapısı nedeniyle asidik pH değerlerinde proton bağışlayıcı olarak davranır. Bu nedenle, asidik ortamda görünen tepe dalga boyu kurkuminin  $\pi-\pi$  geçişimindeki dönüşüm nedeniyle elektron uyarımına bağlanır. Diğer taraftan bazik koşullar altında enolet yapısı baskın hale gelerek elektron bağışlayıcı olarak hareket eder. Alkali ortamda tepe dalga boyunda meydana gelen kayma ise daha önce belirtildiği gibi protondan arındırılmış kurkumin yapısına neden olur (Liu vd., 2018). Tampon çözelti içerisinde asidiktan bazik pH değerlerine geçişte sarıdan koyu turuncuya renk değişimi beklendiği gibi gerçekleşmiş ve Şekil 2 iç resimde gösterilmiştir.



Şekil 2. Farklı pH tampon çözeltilerinde kurkuminin ışık soğurma tayfı. İç resim : Farklı pH değerindeki tampon çözeltiler içerisindeki kurkuminin renk değişimi

Figure 2. Light absorption spectrum of curcumin in different pH buffer solutions. Inside image: Color change of curcumin in buffer solutions at different pH values

### Film Karakterizasyonu

#### Filmlerin Mekanik, Bariyer ve Suda Çözünme Özellikleri

Filmlerin gıda uygulamalarında kullanılabilmesi için mekanik yapısını koruyabilmesi önem taşımaktadır. Gerilme direnci ve kopma anındaki uzama miktarı (%) değerlerini test etmek bu açıdan gereklidir. Farklı miktarlarda kurkumin ihtiva eden f-jelatin filmleri ile kontrol filmlerinin mekanik testlerinin sonuçları Çizelge 1’de gösterilmiştir. F-jelatin ile üretilmiş filmlerin gerilme direnci istatistiksel olarak önemli farklılık göstermiş ve film mekanik özelliklerinin güçlendiği gözlemlenmiştir. İstatistiksel olarak önemli bir fark göstermemiş olsa da filmlere kurkumin eklenmesi ile gerilme direncinde artış eğilimi görülmüştür. Diğer taraftan düşük kurkumin konsantrasyonunda f-jelatin filmlerin kopma anındaki uzama miktarı (%) değerlerinde istatistiksel olarak önemli farklılık görülmemiştir. Ancak f-jelatin filmlerin en yüksek kurkumin konsantrasyonunda, K20-FG kopma uzaması değerleri diğer film örneklerine göre istatistiksel olarak önemli derecede azalmıştır. Benzer şekilde kurkumin eklenerek elde edilen sığır jelatini filmlerin mekanik özelliklerinin iyileştiği literatürde gösterilmiştir (Roy ve Rhim, 2020). Bu

iyileşme polimer ve kurkumin arasında hidrojen bağ etkileşimine bağlanmıştır. Başka bir çalışmada f-jelatin ile görünür ışık altında eosin Y ve riboflavin çapraz bağ yapıcı ajanlar olarak kullanılarak hazırlanan hidrojellerin mekanik özelliklerinin iyileştiği ortaya konmuştur (Hussain vd., 2021). Mevcut çalışmada gözlemlenen gerilme direncindeki artış kurkuminin görünür ışık altında ışık duyarlaştırıcı olarak fotooksidasyon reaksiyonunu başlatarak f-jelatin filmlerin yapısını kuvvetlendirmesiyle açıklanabilir.

Filmlerin gıda uygulamalarında kullanılabilmeleri için suda çözünürlük ve su buharı geçirgenliğinin düşük olması gerekmektedir. Kurkumin eklenmiş ve eklenmemiş kontrol jelatin filmler karşılaştırıldığında kurkuminin suda çözünme ve su buharı geçirgenliğini azaltıcı bir etki yarattığı gözlemlenmiştir (Çizelge 2). Kurkumin eklenmiş filmlerin suda çözünürlük değerlerindeki azalma kurkuminin hidrofobik yapısına bağlanabilir. Su buharı geçirgenliğinde gözlemlenen azalış ise serbest -OH/-NH gruplarını azalması veya biyopolimerin kristallik derecesinin artarak film boyunca buhar difüzyonu için dolambaçlı bir yolun oluşmasına sebebiyet vermesine

bağlanabilir (Roy ve Rhim, 2020). Diğer taraftan jelatin tek başına hidrofilik olduğundan su buharı geçirgenliği ve suda çözünürlüğü yüksektir. Bu sebeple paketleme uygulamalarında kullanılabilmesi için furan gibi destekleyici fonksiyonel gruplarla kimyasal olarak değiştirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde f-jelatin filmlerin kurkumin etkisi altında suda çözünürlüklerinde istatistiksel olarak önemli bir düşüş olurken su buharı geçirgenliklerinde önemli bir değişiklik

olmamıştır. Benzer şekilde furan grubuyla modifiye edilen jelatinin UV ışınımına maruz bırakıldığında suda çözünmesinin azaldığı gözlemlenmiştir (García-Astrain vd., 2015). Söz konusu azalış çapraz bağ oluşumunun başarı ile gerçekleştiğini gösterir niteliktedir. Sonuç olarak kurkumin eklenmenin ve jelatini furan grubu ile modifiye etmenin literatürde gösterildiği gibi görünür ışıkta film yapımına olumlu yönde katkı sağladığı belirlenmiştir (Park vd., 2012).

Çizelge 1. Farklı özellikteki filmlerin gerilme direnci ve kopma anındaki uzama miktarı (%)

Table 1. Tensile strength and elongation at break (%) of films with different properties

Film	Kalınlık (mm) Thickness (mm)	Gerilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Uzaması (%) Elongation at Break (%)
K0-F0G	0.040±0.011 <sup>a</sup>	27.1 ± 2.24 <sup>a</sup>	38.9 ± 2.74 <sup>a</sup>
K20-F0G	0.036±0.005 <sup>a</sup>	38.5 ± 11.08 <sup>ab</sup>	33.7 ± 9.10 <sup>a</sup>
K0-FG	0.038±0.005 <sup>a</sup>	41.3 ± 7.89 <sup>b</sup>	32.6 ± 0.18 <sup>a</sup>
K10-FG	0.044±0.010 <sup>a</sup>	69.6 ± 6.07 <sup>c</sup>	33.4 ± 6.89 <sup>a</sup>
K20-FG	0.038±0.006 <sup>a</sup>	68.9 ± 0.29 <sup>c</sup>	20.7 ± 0.07 <sup>b</sup>

\*Aynı sütundaki farklı harfler, Tukey testine göre örnekler arasında farklılıklar olduğunu gösterir (P < 0.05). K0-F0G: Jelatin film, K20-F0G: %20 h/h kurkumin eklenmiş jelatin film, K0-FG: f-jelatin film, K10-FG: %10 h/h kurkumin eklenmiş f-jelatin film, K20-FG: %20 h/h kurkumin eklenmiş f-jelatin film

\*Different letters in the same column indicate differences between samples according to the Tukey test (P < 0.05).

K0-F0G: Gelatin film, K20-F0G: Gelatin film with 20% v/v curcumin added, K0-FG: f-gelatin film, K10-FG: f-gelatin film with 10% v/v curcumin added, K20-FG: f-gelatin film with 20% v/v added curcumin

Çizelge 2. Farklı özellikteki filmlerin suda çözünme ve su buharı geçirgenliği

Table 2. Water solubility and water vapor permeability of films with different properties

Film	Suda çözünürlük (%) Water solubility (%)	Su Buharı Geçirgenliği/ Water vapor permeability (*10 <sup>-10</sup> g*mm/h*m <sup>2</sup> *kPa)
K0-F0G	85.82 ± 2.679 <sup>a</sup>	2.86 ± 0.006 <sup>a</sup>
K20-F0G	78.34 ± 2.351 <sup>b</sup>	2.37 ± 0.001 <sup>ab</sup>
K0-FG	75.75 ± 4.933 <sup>b</sup>	1.63 ± 0.003 <sup>b</sup>
K10-FG	49.72 ± 3.534 <sup>c</sup>	1.41 ± 0.001 <sup>b</sup>
K20-FG	40.37 ± 4.563 <sup>d</sup>	1.27 ± 0.007 <sup>b</sup>

\*Aynı sütundaki farklı harfler, Tukey testine göre örnekler arasında farklılıklar olduğunu gösterir (P < 0.05). K0-F0G: Jelatin film, K20-F0G: %20 h/h kurkumin eklenmiş jelatin film, K0-FG: f-jelatin film, K10-FG: %10 h/h kurkumin eklenmiş f-jelatin film, K20-FG: %20 h/h kurkumin eklenmiş f-jelatin film

\*Different letters in the same column indicate differences between samples according to the Tukey test (P < 0.05).

K0-F0G: Gelatin film, K20-F0G: Gelatin film with 20% v/v curcumin added, K0-FG: f-gelatin film, K10-FG: f-gelatin film with 10% v/v curcumin added, K20-FG: f-gelatin film with 20% v/v added curcumin



### Filmlerin Isıl Özellikleri

DTK ile yapılan ölçümler sonucu filmlerin ısı ile etkileşimi DTK eğrilerinde endotermik tepe noktaları ( $T_m$ ) olarak gözlemlenir. Çizelge 3’de farklı kurkumin konsantrasyonları ile 30 dakika görünür ışık maruziyeti sonucu elde edilen sığır jelatini ve f-jelatin filmlerin geçiş sıcaklıkları ve entalpi değişimlerini ( $\Delta H$ ) listelenmiştir. Hazırlanan tüm filmlerde iki endotermik tepe noktası gözlemlenmiştir. Bunlardan 80 °C civarında olan ilk endotermik tepeler suyun buharlaşmasına atfedilirken 175 ila 200 °C arasında tespit edilen endotermik tepeler jelatinin sarmal bobin geçişine atfedilmiştir (Peña vd., 2010). Farklı film örneklerin için ilk tepe nokta sıcaklıkları ve karşılık gelen entalpi değişimlerinde istatistiksel olarak önemli bir farklılık gözlemlenmemiştir. İkinci endotermik geçiş sıcaklıkları jelatin furan grubu ile modifiye edildiğinde önemli bir azalış göstermiştir. Jelatin yapı içerisinde prolin ve hidrokspirolin amino asitleri üçlü sarmal oluşumu ile sonuçlanan hidrojen bağlarının oluşumundan sorumludur (Van Hoorick vd., 2018). Geçiş sıcaklığında

benzer bir azalış daha önce literatürde furan grubunun jelatin yan zincirlerine eklenmesiyle gözlemlenmiştir. Eklenen furan grubunun jelatin zincirleri arasında hidrojen bağlarının oluşumunu bozarak üçlü sarmal oluşumunu engelleyebileceği ve bu nedenle geçiş sıcaklığında azalışa sebebiyet verebileceği ortaya konmuştur (García-Astrain vd., 2014). Diğer taraftan kurkuminin f-jelatine eklenmesiyle geçiş sıcaklıkları ve ilgili entalpi değerleri yükseliş eğilimi göstermiştir. Çünkü kurkuminin varlığında oluşan tekli oksijen fotooksidasyon reaksiyonu sonucunda f-jelatinin furan grupları ile etkileşime girerek çapraz bağ oluşumunu arttırmaktadır. Benzer şekilde jelatin yapı içerisinde çapraz bağ oluşumu desteklendiğinde jelatin zincirlerinin hareketliliğinin engellenerek geçiş sıcaklığının arttığı gösterilmiştir (Son vd., 2010). Özetle furan grubu ile jelatini modifiye etmek ısıl kararlılığını olumsuz etkilese de kurkumin varlığında fotooksidasyon reaksiyonunun etkisiyle filmlerin termal olarak daha kararlı hale getirildikleri ortaya konmuştur.

Çizelge 3. Farklı özellikteki filmlerin endotermik entalpileri (DH) ve sıcaklıkları (T)  
Table 3. Endothermic enthalpies (DH) and temperatures (T) of films with different properties

Film	T1 (°C)	DH1 (J/g)	T2(°C)	DH2 (J/g)
K0-F0G	76.9 ± 4.75 <sup>a</sup>	11.8 ± 11.4 <sup>a</sup>	192.6 ± 5.17 <sup>a</sup>	29.4 ± 25.51 <sup>a</sup>
K20-F0G	79.3 ± 1.72 <sup>a</sup>	15.1 ± 10.06 <sup>a</sup>	184.6 ± 10.30 <sup>ab</sup>	33.3 ± 31.4 <sup>a</sup>
K0-FG	78.1 ± 2.31 <sup>a</sup>	15.4 ± 6.14 <sup>a</sup>	163.2 ± 7.11 <sup>b</sup>	72.8 ± 12.90 <sup>a</sup>
K10-FG	74.2 ± 11.33 <sup>a</sup>	15.2 ± 5.53 <sup>a</sup>	182.4 ± 7.87 <sup>ab</sup>	85.6 ± 7.53 <sup>a</sup>
K20-FG	77.2 ± 4.29 <sup>a</sup>	8.9 ± 7.09 <sup>a</sup>	190.8 ± 4.43 <sup>ab</sup>	84.9 ± 1.85 <sup>a</sup>

\*Aynı sütundaki farklı harfler, Tukey testine göre örnekler arasında farklılıklar olduğunu gösterir ( $P < 0.05$ ). K0-F0G: Jelatin film, K20-F0G: %20 h/h kurkumin eklenmiş jelatin film, K0-FG: f-jelatin film, K10-FG: %10 h/h kurkumin eklenmiş f-jelatin film, K20-FG: %20 h/h kurkumin eklenmiş f-jelatin film

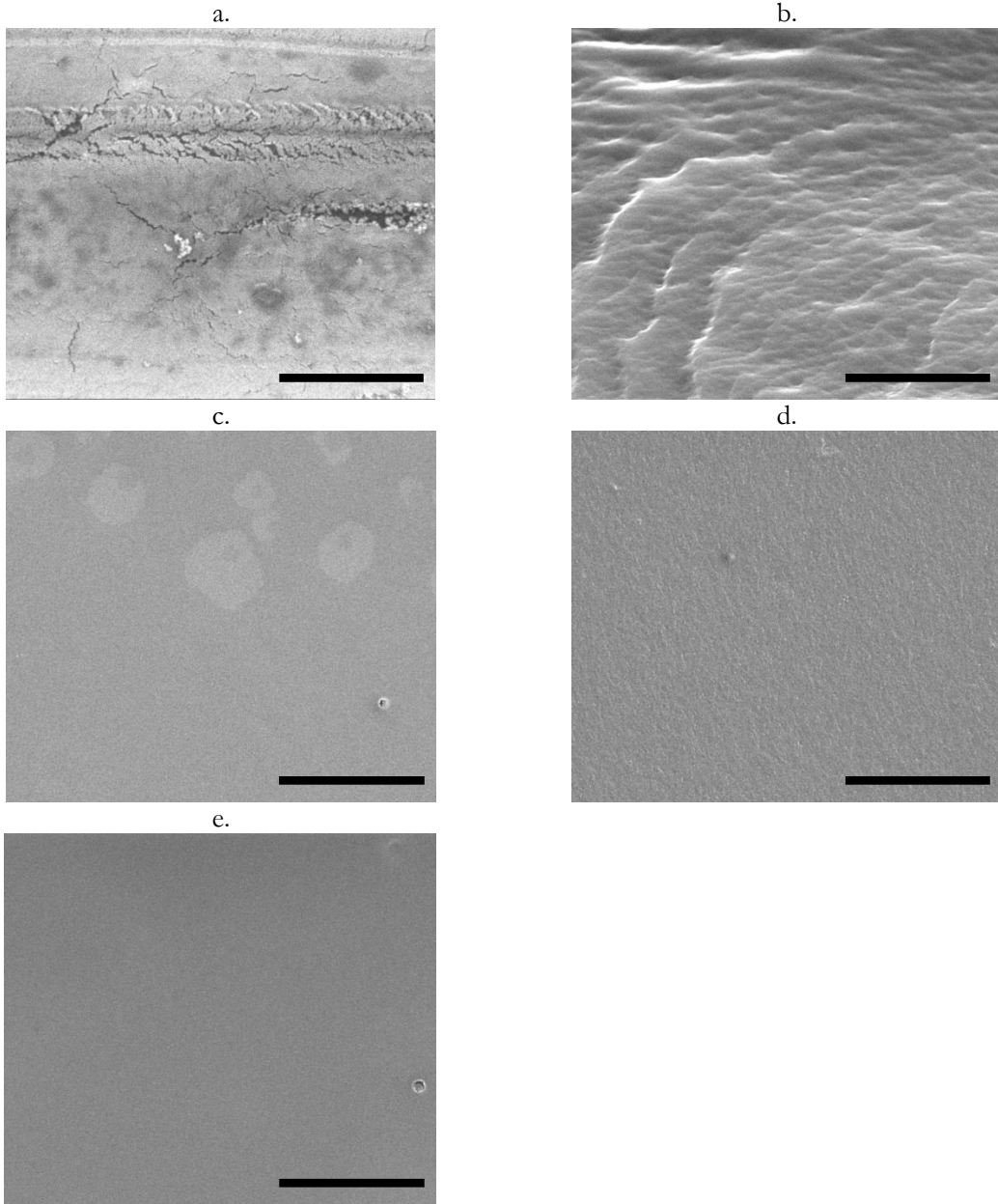
\*Different letters in the same column indicate differences between samples according to the Tukey test ( $P < 0.05$ ).

K0-F0G: Gelatin film, K20-F0G: Gelatin film with 20% v/v curcumin added, K0-FG: f-gelatin film, K10-FG: f-gelatin film with 10% v/v curcumin added, K20-FG: f-gelatin film with 20% v/v added curcumin

### Filmlerin Mikro Yapı Analizleri

Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ile filmlerin kesit görüntüleri elde edilmiş ve morfolojik analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü üzere, kurkumin eklenmiş ve furan grubu ile modifiye edilmiş jelatinden elde edilen filmlerde daha düz ve gözeneksiz bir yapı gözlemlenmiştir.

Kurkumin eklenmesi ile pürüzsüz görünümde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Bu temiz ve pürüzsüz morfoloji kurkumin ve f-jelatin arasındaki mükemmel kimyasal uyuma bağlanabilir (Park vd., 2021). Elde edilen bu sonuçlar mekanik ve bariyer karakterizasyon test sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 3. Farklı özellikteki filmlerin Taramalı Elektron Mikroskopundan alınmış kesit alanı görüntüleri a. K0-F0G b. K20-F0G c. K0-FG d. K10-FG e. K20-FG (ölçek çubuğu: 5 µm)

*Figure 3. Cross-sectional images of films with different properties taken from Scanning Electron Microscope a. K0-F0G b. K20-F0G c. K0-FG d. K10-FG e. K20-FG (scale bar: 5 µm)*

### Filmlerin Renk Özellikleri

Mekanik ve bariyer karakterizasyon testleri sonucunda görünür ışık altında f-jelatinden geliştirilen filmler içinden en iyi sonucu yüksek kurkumin konsantrasyonuna sahip olan K20-FG filmlerden elde edildiği sonucuna varılmıştır.

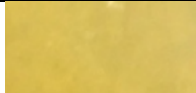
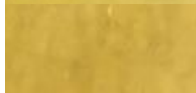
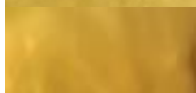


Özellikle proteince yüksek et ve türevleri bozulmaya başladıklarında enzimatik ve bakteriyel aktiviteler sonucunda başta amonyak, trimetilamin ve dimetilamin olmak üzere uçucu azot gazları sisteme salınırlar (Moradi vd., 2019). Başlıca uçucu azot gazları içerisinde en düşük

kaynama noktasına sahip amonyak gazı kurkuminin renk değişimini gözlemlemek için model uçucu azot gazı olarak seçilmiştir. Bu amaçla uçucu amonyak gazı ile farklı konsantrasyonlarda solüsyonlar hazırlanıp K20-FG filmlerinin renk değişimleri ( $\Delta E^*$ ) beyaz kalibrasyon plakası baz alınarak hesaplanmıştır ve Çizelge 4'te gösterilmiştir. Kurkuminin polifenolik yapısı amonyağın hidroksil grupları ile bir asit-baz reaksiyonuna girerek daha önce farklı pH değerlerinde de gözlenen renk değişimine sebebiyet verebilmektedir (Ezati ve Rhim, 2020). Beklendiği şekilde amonyak gazı konsantrasyonu arttıkça filmlerin rengi sarıdan turuncuya

dönüştür. Bozulabilir gıdalardaki toplam uçucu bazik nitrojen (TVB-N) miktarı gıdaların tazeliğini, bozulmasını yani raf ömrünü belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin tavuk bonfile/göğüs eti için TS 2409:2014/Tavuk-Gövde etleri (Karkas) standartlarına göre sınır toplam uçucu bazik azot değeri 30 mg/100 g olarak verilmiştir. Bu çalışmada tavuk eti için geçerli sınır değer ve üzerinde film renk değişiminin istatistiksel olarak önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak geliştirilen jelatin filmin gıda tazeliğini izleyebilecek akıllı bir etiket olarak kullanılabilir nitelikte olduğu ortaya konulmuştur.

Çizelge 4. K20-FG filmlerin farklı konsantrasyonlarda uçucu amonyak gazı ile beyaz referans değerine karşı renk değişimi değerleri ve görüntüleri

Table 4. Color difference values relative to white reference and the corresponding images of K20-FG films against different concentrations of volatile ammonia gas

Amonyak gaz konsantrasyonu/ Gaseous ammonia concentration (mg/100ml)	$\Delta E^*$	Kesit Görüntü/ <i>Cropped Image</i>
0	56.3±3.29 <sup>a</sup>	
15	61.6 ± 0.62 <sup>b</sup>	
30	66.4 ± 0.87 <sup>c</sup>	
60	70.1 ± 2.35 <sup>cd</sup>	
120	73.1± 1.27 <sup>d</sup>	

\*Aynı sütundaki farklı harfler, Tukey testine göre örnekler arasında farklılıklar olduğunu gösterir ( $P < 0.05$ ).

\*Different letters in the same column indicate differences between samples according to the Tukey test ( $P < 0.05$ ).

## SONUÇ

Bu çalışmada ilk olarak jelatin furan grubu ile başarılı bir şekilde görünür ışığa duyarlı hale getirilmiştir. Kurkumin ve f-jelatin ile görünür ışık altında hazırlanan filmlerin mekanik ve bariyer özelliklerinin geliştiği gösterilmiştir. Aynı zamanda kurkumin ve ışık varlığında f-jelatin filmlerin çapraz bağ miktarındaki artış ile kurkuminin hidrofobik yapısı filmlerin suda çözünürlük ve su buharı geçirgenliğinde azalma

şeklinde etki etmiştir. Filmlerin morfolojik ve yapı analizleri de çıkan bu sonuçları destekleyici yönde gözlemlenmiştir. Yapılan film karakterizasyon testlerinin sonucunda K20-FG filmleri renk analizleri için seçilmiştir. Gıda bozulmasının takibinde kullanılan toplam uçucu amin gazlarının çıkışı farklı konsantrasyonlarda amonyak gazı hazırlanarak simule edilmiştir. K20-FG filmlerinin farklı amonyak gazı konsantrasyonlarındaki renk değişimi sarının

tonları şeklinde gözlemlenmiş ve renk değişim değerleri hesaplanmıştır. Amonyak gaz algı testleri, proteince yüksek gıdaların gerçek zamanlı bozulma takibinin K20-FG filmleri ile yapılabileceğini ortaya koymuştur.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Bu makalede yazarların başka kişiler ya da kurumlarla çıkar çatışmaları bulunmamaktadır.

### YAZAR KATKILARI

Bu çalışma LNK tarafından tasarlanmış ve yürütülmüştür. Analizler İK tarafından gerçekleştirilmiştir. Makale LNK tarafından yazılmıştır.

### TEŞEKKÜR

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine bu çalışmayı AGEP-314-2019-10101 nolu proje ile maddi olarak desteklediği için teşekkür ederiz.

### KAYNAKLAR

ASTM. (2005). Standard test method for water vapor transmission of materials (E 96- 05). Philadelphia, PA, USA.

ASTM. (2009). Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting (D 882-09). Philadelphia, PA, USA.

Bertoldo, M., Bronco, S., Gragnoli, T., Ciardelli, F. 2007. "Modification of gelatin by reaction with 1,6-diisocyanatohexane". *Macromolecular Bioscience*, 7(3):328-38.

Biji, K. B., Ravishankar, C. N., Mohan, C. O., Srinivasa Gopal, T. K. 2015. "Smart packaging systems for food applications: a review". *Journal of Food Science and Technology*, 52: 6125-35.

Buzby, J. C., Wells, H. F., Hyman, J. 2014. "The Estimated Amount, Value, and Calories of Postharvest Food Losses at the Retail and Consumer Levels in the United States, EIB-121, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service". *SSRN Electronic Journal*, (121).

Calloway, D. 1997. "Beer-Lambert Law". *Journal of Chemical Education*, 74(7):744.

Ezati, P., Rhim, J. W. 2020. "pH-responsive pectin-based multifunctional films incorporated with curcumin and sulfur nanoparticles". *Carbohydrate Polymers*, 230:115638.

Farris, S., Song, J., Huang, Q. 2010. "Alternative reaction mechanism for the cross-linking of gelatin with glutaraldehyde". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(2):998-1003.

García-Astrain, C., Gandini, A., Peña, C., Algar, I., Eceiza, A., Corcuera, M., Gabilondo, N. 2014. "Diels-Alder "click" chemistry for the cross-linking of furfuryl-gelatin-polyetheramine hydrogels". *RSC Advances*, 4(67): 35578-87.

García-Astrain, C., Peña-Rodríguez, C., Retegi, A., Eceiza, A., Corcuera, M. A., Gabilondo, N. 2015. "Green chemistry for the cross-linking of photo-sensitive furan modified gelatin". *Materials Letters*, 160:142-45.

Giroto, F., Alibardi, L., Cossu, R. 2015. "Food waste generation and industrial uses: A review". *Waste Management*, 45:32-41.

Gökdemir, B., Baylan, N., Çehreli, S. 2020. "Application of a Novel Ionic Liquid as an Alternative Green Solvent for the Extraction of Curcumin from Turmeric with Response Surface Methodology: Determination and Optimization Study". *Analytical Letters*, 53(13):2111-21.

Guaresti, O., García-Astrain, C., Palomares, T., Alonso-Varona, A., Eceiza, A., Gabilondo, N. 2017. "Synthesis and characterization of a biocompatible chitosan-based hydrogel cross-linked via 'click' chemistry for controlled drug release". *International Journal of Biological Macromolecules*, 102:1-9.

Havelaar, A. H., Kirk, M. D., Torgerson, P. R., Gibb, H. J., Hald, T., Lake, R. J., ... Devleeschauwer, B. 2015. "World Health Organization Global Estimates and Regional Comparisons of the Burden of Foodborne Disease in 2010". *PLoS Med*, 12(12):e1001923.

Hussain, K., Aslam, Z., Ullah, S., Shah, M. R. 2021. "Synthesis of pH responsive, photocrosslinked gelatin-based hydrogel system

- for control release of ceftriaxone". *Chemistry and Physics of Lipids*, 238:105101.
- Jasim, F., Ali, F. 1989. "Measurements of some spectrophotometric parameters of curcumin in 12 polar and nonpolar organic solvents". *Microchemical Journal*, 39(2):156-9.
- Kim, S. W., Kim, J. W., Noh, S. H., Kim, E. H., Ito, Y., Nah, J. W., Son, T. Il. 2018. "Application of visible light curable furfuryl-low molecular chitosan derivative as an anti-adhesion agent". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 66:438-45.
- Kuswandi, B., Jayus, Oktaviana, R., Abdullah, A., Heng, L. Y. 2014. "A novel on-package sticker sensor based on methyl red for real-time monitoring of broiler chicken cut freshness". *Packaging Technology and Science*, 27(1):69-81.
- Liu, J., Wang, H., Wang, P., Guo, M., Jiang, S., Li, X., Jiang, S. 2018. "Films based on  $\kappa$ -carrageenan incorporated with curcumin for freshness monitoring". *Food Hydrocolloids*, 83:134-142.
- Ma, Z., Chen, P., Cheng, W., Yan, K., Pan, L., Shi, Y., Yu, G. 2018. "Highly Sensitive, Printable Nanostructured Conductive Polymer Wireless Sensor for Food Spoilage Detection". *Nano Letters*, 18(7):4570-75.
- Mazaki, T., Shiozaki, Y., Yamane, K., Yoshida, A., Nakamura, M., Yoshida, Y., ... Matsukawa, A. 2014. "A novel, visible light-induced, rapidly cross-linkable gelatin scaffold for osteochondral tissue engineering". *Scientific Reports*, 4(4457):1-10.
- Mchugh, T. H., Avena-Bustillos, R., Krochta, J. M. 1993. "Hydrophilic Edible Films: Modified Procedure for Water Vapor Permeability and Explanation of Thickness Effects". *Journal of Food Science*, 58(4):899-903.
- Moradi, M., Tajik, H., Almasi, H., Forough, M., Ezati, P. 2019. "A novel pH-sensing indicator based on bacterial cellulose nanofibers and black carrot anthocyanins for monitoring fish freshness". *Carbohydrate Polymers*, 222:115030.
- Musso, Y. S., Salgado, P. R., Mauri, A. N. 2016. "Gelatin based films capable of modifying its color against environmental pH changes". *Food Hydrocolloids*, 61:523-30.
- Musso, Y. S., Salgado, P. R., Mauri, A. N. 2019. "Smart gelatin films prepared using red cabbage (*Brassica oleracea* L.) extracts as solvent". *Food Hydrocolloids*, 89:674-81.
- Nimmo, C. M., Owen, S. C., Shoichet, M. S. 2011. "Diels-alder click cross-linked hyaluronic acid hydrogels for tissue engineering". *Biomacromolecules*, 12(3):824-30.
- Öz, V., Karadayi, Ş., Çakan, H., Karadayi, B., Kaya, A. 2014. "Food poisoning in emergency units". *Marmara Medical Journal*, 27(2):89-95.
- Park, J., Nam, J., Yun, H., Jin, H. J., Kwak, H. W. 2021. "Aquatic polymer-based edible films of fish gelatin crosslinked with alginate dialdehyde having enhanced physicochemical properties". *Carbohydrate Polymers*, 254:117317.
- Park, S. H., Seo, S. Y., Lee, H. J., Na, H. N., Lee, J. W., Woo, H. D., Son, T. Il. 2012. "Preparation of furfuryl-fish gelatin (F-f-gel) cured using visible-light and its application as an anti-adhesion agent". *Macromolecular Research*, 20(8):842-46.
- Peña, C., de la Caba, K., Eceiza, A., Ruseckaite, R., Mondragon, I. 2010. "Enhancing water repellence and mechanical properties of gelatin films by tannin addition". *Bioresource Technology*, 101(17):6836-42.
- Roy, S., Rhim, J. W. 2020. "Preparation of antimicrobial and antioxidant gelatin/curcumin composite films for active food packaging application". *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 188:110761.
- Seidi Damyeh, M., Mereddy, R., Netzel, M. E., Sultanbawa, Y. 2020. "An insight into curcumin-based photosensitization as a promising and green food preservation technology". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4):1727-59.
- Sharma, R. A., Gescher, A. J., Steward, W. P. 2005. "Curcumin: The story so far". *European Journal of Cancer*, 41(13):1955-68.
- Son, T. Il, Sakuragi, M., Takahashi, S., Obuse, S., Kang, J., Fujishiro, M., ... Ito, Y. 2010. "Visible light-induced crosslinkable gelatin". *Acta Biomaterialia*, 6(10):4005-10.

Van Hoorick, J., Ovsianikov, A., Dubruel, P., Van Vlierberghe, S. 2018. "Photo-Crosslinkable Gelatin Hydrogels, Versatile Materials for (High Resolution) Additive Manufacturing". *Material Matters*, 13(3):75-81.

Wilson, N. L. W., Rickard, B. J., Saputo, R., Ho, S. T. 2017. "Food waste: The role of date labels, package size, and product category". *Food Quality and Preference*, 55:35-44.

Zhao, J., Lalevée, J., Lu, H., MacQueen, R., Kable, S. H., Schmidt, T. W., ... Xiao, P. 2015. "A new role of curcumin: As a multicolor photoinitiator for polymer fabrication under household UV to red LED bulbs". *Polymer Chemistry*, 6(28):5053-61.