

LAURİK ASİT OLEOJELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZE EDİLMESİ

Eda Keskin Uslu¹, Emin Yılmaz^{2*}

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ezine Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Ezine, Çanakkale, Türkiye

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

Geliş / Received: 06.06.2022; Kabul / Accepted: 17.10.2022; Online baskı / Published online: 04.11.2022

Keskin-Uslu, E., Yılmaz, E. (2022). Laurik asit oleojellerinin geliştirilmesi ve karakterize edilmesi. GIDA (2022) 47 (6) 992-1004 doi: 10.15237/ gida.GD22066

Keskin-Uslu, E., Yılmaz, E. (2022). Development and characterization of lauric acid oleogels GIDA (2022) 47 (6) 992-1004 doi: 10.15237/ gida.GD22066

ÖZ

Bu çalışmada laurik asit (LA) oleojelatörü Span 60 ve Pluronic F68 (%10 poloksamer 188) emülgatörleriyle birlikte kullanılarak ayçiçek yağı oleojelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen oleojellerin fizikokimyasal, termal, yapısal ve reolojik özellikleri belirlenmiştir. Sadece LA içeren (%20) oleojellerin jel oluşum zamanının %15 LA ve %5 emülgatör içeren oleojellerden daha kısa olduğu, LA konsantrasyonundaki artışın jel yapı oluşum zamanını kısalttığı gözlenmiştir. LA konsantrasyonu ve emülgatör çeşidine bağlı olarak oleojellerin renk değerlerinde farklılıklar görülürken tüm oleojel örneklerinin yağ bağlama kapasitelerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Polarize ışık mikroskobu görüntülerinde oleojellerin ince kristal yapılar oluşturduğu gözlenirken, X-ışını kırınım deseni β ve β' polimorf kristallerinin varlığını kanıtlamıştır. Reolojik analizlerle geliştirilen oleojellerinin yapısal geri dönüşüm yeteneğinin olduğu belirlenmiştir. Emülgatör ilavesinin daha düşük konsantrasyonlarda LA ile oleojel oluşumuna olanak sunduğu, aynı zamanda daha dayanıklı jel yapı oluşturabildiği reolojik testlerle tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: laurik asit, emülgatör, oleojel, reoloji, mikroyapı, stabilite

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF LAURIC ACID OLEOGELS

ABSTRACT

In this study, sunflower oil oleogels were developed with lauric acid, Span 60, and Pluronic F68 (10% poloxamer 188). Physicochemical, thermal, structural, and rheological properties of the oleogels were determined. The gel formation time of oleogels containing only LA (20%) was shorter than oleogels containing 15% LA and 5% emulsifiers, and an increase in LA concentration shortened the gel formation time. While there were differences in the color values of the oleogels depending on the LA concentration and emulsifier type, the oil binding capacity of all oleogel samples were quite high. The crystalline structures were observed under polarized light microscope, and the X-ray diffraction patterns proved the existence of β and β' polymorph crystals. Rheological analyses indicated that oleogels had good structural recovery ability. Further, addition of emulsifier allowed oleogel formation with lower concentrations of LA, and at the same time the gel stability was enhanced with emulsifier.

Keywords: lauric acid, emulsifier, oleogel, rheology, microstructure, stability

* Yazışmalardan sorumlu yazar/ Corresponding Author

✉: eyilmaz@comu.edu.tr

☎: (+90) 286 218 0018

☎: (+90) 286 218 0541

Eda Keskin Uslu; ORCID no: 0000-0002-8266-7137

Emin Yılmaz; ORCID no: 0000-0003-1527-5042

GİRİŞ

Yemeklik yağlar geleneksel yağ modifikasyon teknikleriyle yapılandırılmaktadır. Bilinen en eski yağ modifikasyon teknikleri arasında yağ hidrojenasyonu, interesterifikasyon, fraksinasyon ve karıştırma-soğutma işlemleri bulunmaktadır (O'Brien, 2004). Likit yağlar geleneksel metotlarla yapılandırılırken yağ asitlerinin *cis* formundan *trans* formuna izomerasyonu yağda *trans* ve/veya doymuş yağ asitlerinin artışına sebep olmaktadır. Doymuş ve *trans* yağların aşırı tüketimi kardiyovasküler sağlık sorunlarını beraberinde getirmektedir. Likit yağların yapılandırılmasına alternatif olan 'oleojelasyon/organojelasyon teknolojisi'nde' yağ asitleri bileşiminde ve izomerisinde herhangi bir değişim oluşturmaksızın yağlar modifiye edilebilmektedir. Bu işlem likit yağ içerisine eklenen organojelatör/oleojelatör ajanlarıyla sağlanmakta, yağa katı/yarı-katı görünümünde jel formu kazandırılmaktadır (Keskin Uslu ve Yılmaz, 2019).

Oleojelatörler, apolar çözücü içinde fibriller veya çökelti kristalleri meydana getirerek veya açılmış polimer zincirlerinin birbirleriyle belli noktalarda temas etmesiyle üç boyutlu ağ oluşturarak likit yağı jelleştirmektedirler. Likit yağ ve oleojelatör arasında ve oleojelatör moleküllerinin kendi aralarında oluşan elektrostatik, van der Waals etkileri, hidrojen bağları ve π - π istiflemeleri jelleşmeden sorumlu etkileşimler arasında yer almaktadır (Singh vd., 2017). Oleojellerin yapılandırılmasında görev alan oleojelatörler, düşük ve yüksek molekül ağırlıklı (LMOG ve HMOG'lar) olarak ikiye ayrılmaktadır. LMOG'ler daha çok yağda yeniden kristalleşme ve çökelti oluşturma mekanizmasıyla, HMOG'lar ise polimerin yağda çözündürülmesi ve soğutulmasıyla oluşturulan supramoleküler ağlarla yağı yapılandırmaktadır (Davidovich-Pinhas, 2016). Etil selüloz, bazı proteinler ve bazı gıda polisakkaritleri HMOG'lara örnek olarak verilebilmektedir. LMOG'lere ise yağ asitleri, yağ alkoller, mumlar, mum esterleri, sorbitan esterleri, fitosteroller ve mono- ve di-gliseritler örnek olarak verilebilmektedir (Hwang vd., 2020).

Yağ asitleri dört karbondan başlayan ve otuzun üzerinde karbon atomu içerebilen, molekül yapısının bir ucunda metil grubu (CH_3) diğer ucunda karboksil grubu (COOH) bulunan hidrokarbon sınıfı maddelerdir. Laurik asit (LA, dodekanoik asit) 12 karbon zincir uzunluğuna sahip, doymuş yapılı, hafif parlak beyaz renkli toz formunda, hindistan cevizi yağında yaygın olarak bulunan bir orta zincirli yağ asididir (Harris vd., 2019). Literatürde stearik asit ve risinoleik asit ile yapılmış oleojel çalışmaları bulunmaktadır (Co ve Marangoni, 2012; Uvanesh vd., 2016). Ancak tek başına laurik asit ile olan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Doğada yaygın olarak bulunan, elde edilmesi nispeten kolay ve ucuz olan orta zincir uzunluklu laurik asitin oleojel oluşturma potansiyeli bu makalenin araştırma konusunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı ayçiçek yağının yapılandırılmasında LA'nın kullanılması ve ilave edilen bazı emülgatörler ile daha düşük konsantrasyonda LA içeren oleojellerin geliştirilmesidir. LA'nın Span 60 ve Pluronic F68 emülgatörleri ile ayçiçek yağı oleojelleri hazırlanmış ve elde edilen ürünlerin polarize ışık mikroskobu (PLM) ve X-ışını kırınım (X-RD) desenleri kullanılarak yapısal özellikleri, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile termal özellikleri, reometre ile reolojik karakterizasyonu ve yaygın bazı fizikokimyasal özellikleri ölçülmüş ve örnekler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların laurat oleojelleri için bazı yeni kullanım alanlarının önünü açacağı beklenmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyaller

Çalışmada kullanılan rafine ayçiçek yağı (100 g üründe; 100 g yağ, 10 g doymamış, 33 g tekli doymamış, 57g çoklu doymamış yağ, 0 mg kolesterol, 0 g karbonhidrat, 0 g protein) Bırayağ, Trakya Birlik Yağ fabrikasından (Edirne, Türkiye) temin edilmiştir. Laurik asit, Jinan Qinmu Fine Chemical Co. Ltd. (Jinan, Çin)'den, Pluronic F68 (%10 poloksamer 188 çözeltisi), Span 20, Span 60, Span 80, Tween 40 ve Tween 60 Sigma-Aldrich Chemie GmbH (Taufkirchen, Almanya)'den satın alınmıştır. Span 65, Tween 20, Tween 80 Merck

Schuchardt OHG (Hohenbrunn, Almanya) ve soya lesitini Kimbiotek Kimyevi Maddeler San. Tic. A.Ş. (İstanbul, Türkiye) şirketlerinden tedarik edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kimyasal madde ve solventler analitik saflıkta olup ve Sigma Chem. Co. (St. Louis, MO, ABD) ve Merck'den (Darmstadt, Almanya) satın alınmıştır.

Yöntemler

Olejelerin Hazırlanması

Bir seri ön denemeye LA'nın minimum jel oluşturma konsantrasyonu (C*) ağırlıkça %20 olarak belirlenmiştir. Katılan LA konsantrasyonunu %20'den %15'e düşürmek için LA-emülgatör kombinasyonları da ön denemeye çalışılmıştır. Bu amaçla ağırlıkça 80:15:5 oranlarında ayçiçek yağı: laurik asit: emülgatör karışımları hazırlanmış, su banyosunda 90 °C'de 20 dak ısıtılarak bileşenlerin tam ergimesi ve

homojen olarak karışması sağlanmış ve son olarak da ergimiş karışım oda sıcaklığında ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) 24 saat soğutularak oleojellerin oluşması sağlanmıştır. Denemeye alınan emülgatörler Pluronic F68, Span 20, Span 60, Span 65, Span 80, Tween 20, Tween 40, Tween 60, Tween 80 ve soya lesitindir. Bunlardan sadece Pluronic F68 ve Span 60 emülgatörleri başarılı oleojel oluşturmuşlardır. Son olarak Çizelge 1'de verilen formülasyonlar kullanılarak 3 farklı oleojel yukarıda açıklanan teknikte hazırlanmıştır. Bunlardan tek başına laurat oleojeli (LA-O) kendi C* değeri olan ağırlıkça %20 katım oranında ve ağırlıkça %5 emülgatör (Pluronic F68 ve Span 60) ve %15 laurat içeren diğer iki oleojel (LA/F68-O ve LA/SP60-O) hazırlanmıştır. Hazırlanan oleojel örnekleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Parantez içinde verilen kısaltma isimler makalenin bundan sonraki kısımlarında kullanılmıştır.

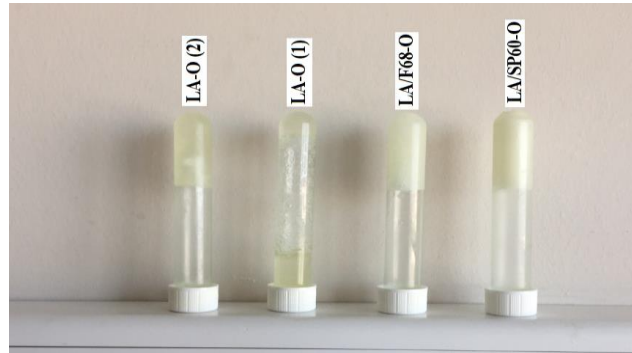
Çizelge 1. Hazırlanan oleojellerin ürün formülasyonları

Table 1. The product formulations of the prepared oleogels

	Ayçiçek Yağı (%) <i>Sunflower Oil (%)</i>	Laurik Asit (%) <i>Lauric Acid (%)</i>	Emülgatör (%5) <i>Emulsifier (5%)</i>
LA-O	80	20	-
LA/F68-O	80	15	Pluronic F68
LA/SP60-O	80	15	Span 60

LA-O: %20 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli

LA-O: 20% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel



Şekil 1. Hazırlanan oleojel örnekleri (LA-O(2): %20 laurik asit oleojeli, LA-O(1): %15 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli, örnek fotoğrafları $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta çekilmiştir)

Figure 1. The prepared oleogel samples (LA-O(2): 20% lauric acid oleogel, LA-O(1): 15% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel, sample pictures were taken at $20\pm 3^{\circ}\text{C}$)

Oleojellerin Fiziksel Özellikleri

Jel oluşum zamanının (JOZ) belirlenmesi için, içinde taze oleojel bulunan deney tüpleri 90 °C'deki su banyosunda 30 dak bekletilerek tamamen ergitilmiş ve daha sonra tekrar oda sıcaklığına (20±3 °C) alınarak, aynı anda kronometre de başlatılarak yeniden jel oluşması için geçen süre dakika olarak ölçülmüştür. Jel oluşumunu kontrol etmek için tüpler 90° çevrilerek içeriğin akış durumu kontrol edilmiş ve eğer akış yoksa jelleşmenin tamamlandığına hükmedilmiştir (Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021).

Yağ bağlama kapasitesinin (%YBK) ölçülmesi önceki çalışmamızdaki tekniğe göre yapılmıştır (Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021). Bu amaçla, 90 °C'deki su banyosunda 30 dak bekletilerek tamamen ergitilmiş taze oleojel örneklerinden 1 ml (a) kadar eppendorf tüplerine aktarılmış ve tartılmıştır. Oleojel içeren eppendorf tüpleri +4°C sıcaklıkta 1 saat bekletilmiş ve jelleştirilmiştir. Jel oluşumu sonrasında eppendorf tüpleri (eppendorf tüpü+örnek) yeniden tartılmıştır (b). Daha sonra 20 °C sıcaklıkta 10.000 rpm hızla 15 dak santrifüj edilmiş, hemen sonrasında oda sıcaklığında (20±3°C) tüpler ters çevrilerek 3 dak boyunca drenaj işlemi uygulanarak sıızan sıvı yağ ayrılmıştır. Tüpler drenaj işleminin ardından yeniden tartılmıştır (c). Oleojellerin %YBK aşağıda verilen eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Serbest Yağ} = \frac{(b-a)-(c-a)}{(b-a)} \times 100 \quad \% \text{YBK} = 100 - \text{Serbest yağ}$$

Taze oleojellerin renkleri Minolta CR-400 (Konica, Minolta Sensing, Osaka, Japonya) ile CIE lab standardına göre ölçülmüştür. CIE standardında L değeri parlaklık/koyuluk, a* değeri kırmızılık (+) / yeşillik (-), b* değeri ise sarılık (+) / mavilik (-) olarak ifade edilmektedir. Renk ölçümü taze oleojel örneklerinde yapılmıştır (Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021).

Oleojellerin Mikroyapısal Özellikleri

Taze oleojel örneklerinin X-ışınları kırınım desenleri AOCS Cj 2-95 metodu uygulanarak PANalytical Empyrean (Hollanda) cihazı ile belirlenmiştir (AOCS, 2012). Üretilen oleojeller 24 saat boyunca oda sıcaklığında (20±3 °C)

bekletilmiş ve cihazın numune haznesine dikkatlice yerleştirilmiştir. Açılal taramalar Cu radyasyonu (λ (CuK α) = 1.54056 Å voltaj 40 kV akım 40 mA) ile 20= 2.0-50° tarama aralığında 0.02 basamak ve 2°/dak tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Veri analizi X'Pert HighScore Plus yazılımı (Malvern Panalytical Ltd., Royston, UK) ile yapılmıştır. Bu analizde amaç oda sıcaklığındaki polimorfik kristal tiplerini belirlemek olduğu için örnekler oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek kristal polimorflarındaki olası dönüşümlerin tamamlanması sağlanmıştır.

Taze oleojel örneklerinin polarize ışık mikroskobu görüntülerinin analizi için tamamen ergitilmiş akışkan formdaki oleojelden küçük bir miktar lam üzerine damlatılarak hava kabarcığı oluşumuna müsaade etmeden lamel ile kapatılmıştır. Jel oluşumu için oda sıcaklığında 1 saat beklendikten sonra Olympus CX 31 polarize ışık mikroskobu (PLM, Olympus Optical Co., Ltd., Japonya) altında incelenerek sisteme bağlı CCD kamera ekipmanı (Canon) ile görüntüler kaydedilmiştir. Bu analizde oleojel lam üzerine yerleştirmek için zorunlu olarak ergitildiği için, lamel kapatıldıktan sonra 1 saat yeniden jelleşmesi için bekletilmiştir. Bu süre jelleşme için yeterli olduğundan daha uzun süre beklenilmesine ihtiyaç duyulmamıştır (Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021).

Oleojellerin Termal Özellikleri

Hazırlanan oleojellerin kristallenme ve ergime başlangıç, tepe sıcaklıkları ve entalpi değerleri Perkin-Elmer 4000 Serisi Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) (Groningen, Hollanda) ile ölçülmüştür. Bu amaçla, yaklaşık 8 mg oleojel örneği alüminyum pana tartılıp üzerine alüminyum kapak kapatılmıştır. Oleojel içeren panlar DSC cihazının numune bölümüne yerleştirilmiş ve uygun sıcaklık programında analiz yapılmıştır. Örnekler uygulanan sıcaklık programı, oleojellerin 20 °C'den 120 °C'ye 10 °C/dak ile ısıtılması, sonra -30 °C'ye 10 °C/dak ile soğutulması ve bu sıcaklıkta kristalizasyonun tamamen gerçekleşebilmesi için 3 dak süreyle bekletilmesinin ardından 110 °C'ye 5 °C/dak ile ısıtılması işlemidir. Elde edilen termogram grafiğinden ergime sıcaklık (T_m) ve entalpileri (ΔH_m) ile kristalizasyon sıcaklık (T_c) ve entalpileri

(ΔH_c) cihazın yazılım programı olan Pyris 1 Manager kullanılarak hesaplanmıştır (Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021).

Olejellerin Reolojik Özellikleri

Hazırlanan taze oleojel örnekleri 24 saat boyunca buzdolabında bekletilmiş ve reolojik karakterizasyonu yapılmak üzere çapraz taramalı paralel plaka geometrisiyle ($\phi = 40$ mm, aralık boşluğu 0.9 ± 0.1 mm) donatılmış ve Peltier ısıtma sistemi olan ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) bir DHR 2 reometresi (TA Instruments, ABD) kullanılmıştır. İlk olarak her bir oleojel örneğinin doğrusal viskoelastik bölgesini (LVR) tespit etmek için 10°C sıcaklık, $\%0.01$ - 100 gerinim aralığı ve 1 Hz frekansda genlik taraması testi yapılmıştır. Gerinim taramalarında belirlenen LVR örneklerin depo (G') ve kayıp modüllerinin (G'') tespit edildiği, tüm reolojik değerlendirmelerde geçerli ölçümlerin yapılabildiği bölge olarak tanımlanmıştır (Mezger, 2014). Bu test ile belirlenen LVR gerinim değerleri sonraki testlerde sabit değer olarak kullanılmıştır. Reolojik analizlerde 10°C sıcaklığın tercih edilmesinin nedeni bu sıcaklıkta örneklerin yeterince plastik özellik gösterebiliyor olmasındandır. Oda sıcaklığı gibi daha yüksek sıcaklıklarda yapılacak ölçümde frekans ve zaman tarama testlerinden kesin doğru sonuç alınamama olasılığı bulunduğu için önceki çalışmalarımızda da tercih ettiğimiz 10°C sıcaklık tercih edilmiştir. Ayrıca yükselen sıcaklıkta oleojellerin davranışını belirlemek için de daha düşük sıcaklıktan başlanıp örnek sıcaklığı kademeli olarak 70°C 'ye kadar çıkartılarak sıcaklık rampa testi de yapılmıştır.

LVR bölgesindeki gerinim değeri (%) belirlenen oleojellerin 10°C sıcaklık ve 0.1 - 100 Hz frekans aralığında frekans-tarama testi ile depo (G') ve kayıp modülleri (G'') belirlenerek jel yapı özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, LVR bölgesindeki gerinim değerlerinde (%) yapısal geri dönüşüm yeteneklerinin tespiti için zaman-tarama testi uygulanmıştır. Bu amaçla, 10°C sıcaklıkta üç farklı zaman bölgesinde tiksotropik özellikleri incelenmiştir. Birinci bölgede normal kuvvete karşı gösterdiği davranış için 180 s boyunca LVR'de belirlenen gerinimler, ikinci bölgede yapısal bozulma davranışını değerlendirmek için 180 s süre boyunca LVR'de belirlenen

değerlerden çok daha yüksek gerinimler ($\text{LVR}_{\text{strain}} \geq \text{Strain}$), üçüncü bölgede ise yapısal geri kazanım özelliklerini değerlendirmek için 900 s süreyle LVR'de belirlenen değerlerden çok daha düşük gerinimler ($\text{LVR}_{\text{strain}} \leq \text{Strain}$) uygulanarak oleojellerin yapısal geri-dönüşüm yetenekleri belirlenmiştir. Bu testte yüksek mekanik kuvvet uygulanarak jel yapısı kırılan oleojelin, uygulanan bu kuvvet ortadan kaldırıldıktan sonra tekrar başlangıçtaki jel haline dönme yeteneğinin varlığı ölçülmektedir (Mezger, 2014).

LVR bölgesindeki gerinim değerinde, 1 Hz frekansta uygulanan sıcaklık-rampa testi ile sıcaklığın numuneler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, 1 Hz sabit frekansta, 120 s bekletme süresinde, 0°C 'den 70°C 'ye kadar örnek sıcaklığı dakikada 1°C artırılarak, örneklerin depo ve kayıp modül değerleri izlenmiştir. Böylece çevresel sıcaklık artışının oleojellerin viskoelastik davranışı üzerinde meydana getirdiği değişiklikler belirlenmiştir (Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021).

İstatistiksel Analizler

Üç farklı oleojel örneği iki farklı zamanda iki tekerrür olarak hazırlanmış, analiz edilen örneklerle ilişkin özellik ölçümleri üç paralel olarak uygulanmıştır. Toplanan verilerin ortalama değerleri, standart sapmalarıyla birlikte verilmiştir. Güven seviyesi en az $\%95$ olarak varyans analizi (ANOVA) ve Tukey testi uygulanmıştır. İstatistiksel analizler Minitab v.16.1 yazılımı ile yapılmıştır (Minitab, 2010).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Fiziksel Özellikler

Olejellerin jel oluşum zamanı (JOZ) sırasıyla LA-O, LA/F68-O ve LA/SP60-O için yaklaşık olarak 17.33 , 20.67 ve 110.67 dak olarak tespit edilmiştir (Çizelge 2). Tek bileşen olarak $\%20$ konsantrasyonda LA içeren ayçiçek yağı oleojelinin JOZ'nının, LA'nın Span 60 ve F68 emülgatörleri ile $\%15$ konsantrasyonda meydana getirdiği oleojellerin JOZ'ından daha kısa olduğu belirlenmiştir. Katılan oleojeletör oranı arttıkça, JOZ'un kısalması literatüre göre de beklenen bir durumdur. Yağ asitleri kristal kümeleri oluşturarak jelleşme sağlarken, farklı oleojeletörler

farklı mekanizmalarla jel oluşturmaktadır. Genel olarak JOZ, jel ajanının türüne, jelleştirme mekanizmasına ve konsantrasyona bağlı olarak değişmektedir (Co ve Marangoni, 2012; Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021). Jelator konsantrasyonundaki artış jelleşmenin daha kısa sürede gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu durum gıda uygulamalarında zamandan tasarruf sağlaması bakımından olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Fakat yüksek miktarda jel ajanı kullanımı üründe bazı lezzet/aroma kusurları, renk farklılıkları veya diğer sorunlara yol açabileceği için oleojelator seviyesinin maksimum

%10 civarında olması önerilmiştir (Co ve Marangoni, 2012; Sagiri vd., 2018). Bu bakımdan %15-20 gibi yüksek konsantrasyonlarda jel ajanı ilavesi ile oleojel eldesi LA'nın oleojelator olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Özellikle gıda ürünlerinde bu yüksek oran aynı zamanda üründe serbest yağ asitliği değerinin de yükselmesine neden olabilecektir. Genel olarak 12 karbonlu doymuş laurik asit gıda dışı alanlarda kullanılmak üzere oleojelator olarak kullanılabilir durumdadır. Emülgatörle birlikte konsantrasyon %15'e düşürülse bile gıda uygulamaları için halen yüksek bir oran olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Hazırlanan oleojellerin bazı fizikokimyasal özellikler

Table 2. Some physico-chemical properties of the prepared oleogels

	Jel Oluşum Zamanı (dak) <i>Gel Formation Time (min)</i>	Yağ Bağlama Kapasitesi (%) <i>Oil Binding Capacity (%)</i>	L Değeri <i>L Value</i>	a* Değeri <i>a* Value</i>	b* Değeri <i>b* Value</i>
LA-O	7.33±0.58 ^c	99.98±0.01 ^a	61.26±0.38 ^c	1.09±0.02 ^a	6.22±0.08 ^b
LA/F68-O	20.67±0.58 ^b	99.99±0.01 ^a	40.30±0.15 ^b	-1.43±0.05 ^b	5.07±0.17 ^b
LA/SP60-O	110.67±1.53 ^a	99.82±0.24 ^a	76.97±1.49 ^a	-2.53±0.02 ^c	8.53 ±0.58 ^a

LA-O: %20 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli. Aynı sütündeki farklı harfler örnekler arasındaki istatistik farkı gösterir ($P < 0.05$)

LA-O: 20% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel. Different letters within the same column indicate the statistical differences among the samples ($P < 0.05$)

Hazırlanan oleojellerin yağ bağlama kapasiteleri (YBK) Çizelge 2'de verilmiştir. Tüm oleojel örneklerinin YBK'nin %99'un üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Oleojeli meydana getiren kristal ağ yapısının likit yağı iyi derecede hapsedebilme yeteneği yağ bağlama kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu kavram, bir oleojelatorün jel oluşturma kapasitesi ve stabilitesi hakkında fikir veren bir parametredir. Ağsı yapı tarafından tutulan likit yağ ne kadar fazlaysa oleojelin yağ bağlama kapasitesi de o kadar yüksektir (Co ve Marangoni, 2012; Keskin Uslu ve Yılmaz, 2019 ve 2021). Likit yağın kristal yağ içine immobilizasyonu mikroyapısal faktörlere ve moleküller arası etkileşime bağlıdır. Bu durum likit yağın kristal ağ içindeki mikro gözeneklere hapsedilmesi ve kristal triaçilgliserol nanoparçacıklarının yüzeyine yağın tutunması olmak üzere iki ana mekanizmayla gerçekleştirilmektedir (Mattice ve Marangoni, 2018). Bu durumda LA'nın oleojel yapısında

bulunan likit ayçiçek yağının hemen hemen tamamını immobilize edebildiği söylenebilmektedir.

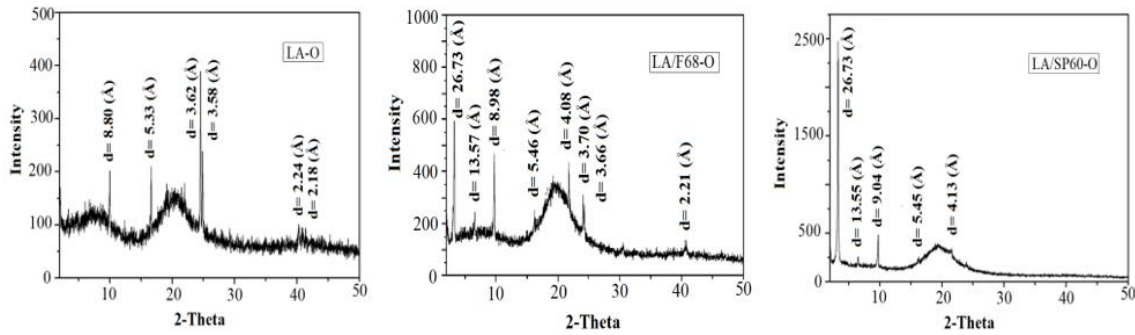
Oleojel örneklerine ait renk değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. CIE renk koordinat sisteminde L değeri açıklık-koyuluk koordinatı olup L=0 değeri siyah, L=100 değeri beyaz renk ile, +a* = kırmızı - a* = yeşil ve +b* = sarı - a* = mavi ile ifade edilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek L değerine sahip oleojelin LA/SP60-O, en düşük oleojelin ise LA/F68-O olduğu dolayısıyla en beyaz oleojel örneğinin Span 60 ilaveli LA oleojeli olduğu görülmüştür. Tüm oleojellerin a* değerlerinin negatif olduğu, yani bir miktar yeşilimsi renge sahip oldukları, b* değerlerinin pozitif olduğu, yani daha çok sarı rengin hakim olduğu gözlenmiştir. Oleojellerin renk özelliklerini belirleyen faktörlerin kullanılan oleojelator ve stok likit yağ olduğu bildirilmiştir (Mattice ve Marangoni, 2018; Keskin Uslu ve

Yılmaz, 2021). Tüm oleojellerde likit yağ olarak ayçiçek yağı kullanılması sebebiyle renk değerlerindeki farklılığının ilave edilen laurik asit oleojelatörü ve emülgatörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Mikroyapısal Özellikler

Oleojel örneklerinin polimorfik formlarını belirlemek için ölçülen X-ışını kırınım desenleri Şekil 2’te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde LA-O için 3.58, 3.62 ve 5.33 Å, LA/F68-O için 3.66, 3.70 ve 4.08 Å, son olarak LA/SP60-O için 4.13 ve 5.45 Å değerlerinde farklı yoğunlukta pikler tespit edilmiştir. Kristal polimorfi sınıflandırmasına göre numunelerde 4.2 Å

değerinde tek bir pik gözleniyorsa α polimorfu, 3.8-4.2 Å pik noktaları içeriyorsa β' ve 4.6 Å konumunda bir pik mevcut ise β poliformik formu yapıya sahip olduğu belirtilmiştir (AOCS, 2012). Bu bilgiler doğrultusunda pik konumları tam olarak örtüşmese de oleojellerin çoğunlukla β ve β' tipindeki kristalleri birlikte içerdiği gözlenmiştir. Eisa vd. (2020) çalışmalarında kanola yağını %10 LA ve %2 etil selüloz ile yapılandırarak oleojeller üretmiş, X-ışını kırınım deseni sonuçlarında 3.7-4.1 Å değerlerinde kısa aralıklı yansıma piklerinin varlığını bildirmiştir. Bulgular genel olarak literatür ile örtüşmektedir.



Şekil 2. Hazırlanan oleojellerin X-ışınları kırınım desenleri (LA-O: %20 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli)

Figure 2. The X-ray diffraction patterns of the prepared oleogels (LA-O: 20% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel)

Örneklerin PLM görüntüleri Şekil 3’te verilmiştir. Tüy benzeri kristallerin yanı sıra yoğun çökelti şeklinde meydana gelen kristal yapıların varlığı tespit edilmiştir. Span 60 ve Pluronic F68 emülgatör ilaveli LA oleojellerinin (Şekil 3b ve c) morfolojilerinin yalnızca LA katkılı oleojellerden (Şekil 3a) büyük farklılık göstermediği belirlenmiştir. Benzer bir çalışmada kanola yağının farklı zincir uzunluğuna sahip iki yağ asidi (laurik ve behenik asitler) ile farklı konsantrasyon ve farklı kombinasyonları ile elde edilen oleojellerden; laurik asit (LA) bazlı oleojellerde tüy benzeri kristaller, behenik asit (BA) bazlı oleojellerde ise uzun iğne benzeri kristaller, LA:BA karışımı içeren oleojellerde ise kısa iğne benzeri kristallerin varlığı polarize ışık mikroskobu görüntülerinde bildirilmiştir (Harris vd., 2019). Benzer bir başka

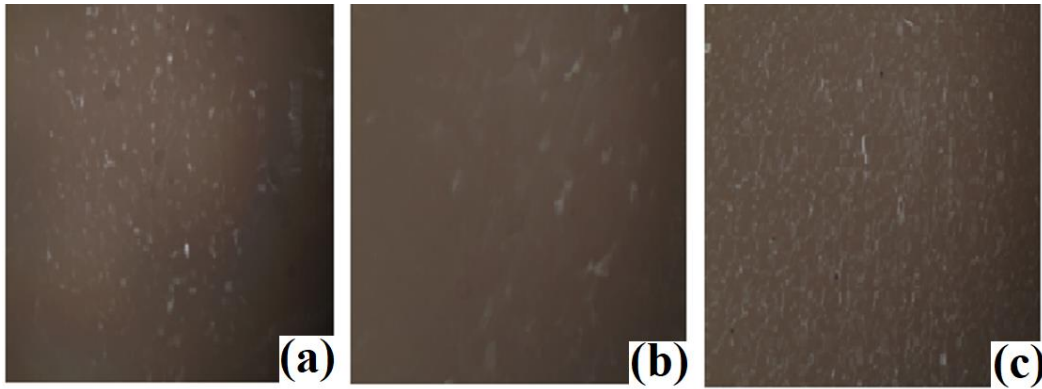
çalışmada stearik asit bazlı oleojellerde sürekli dallanma gösteren ince uzun lifli kristallerin varlığı tespit edilmiş ayrıca stearik asit konsantrasyon artışına bağlı olarak ağın ve kristallerin yoğunluğunun da arttığı bildirilmiştir (Sagiri vd., 2018). Hazırlanan oleojellerin morfolojik özellikleri literatür bulgularıyla benzemektedir.

Termal Özellikler

Oleojelatör olarak kullanılan LA ve hazırlanan üç farklı oleojelin kristalleşme ve ergime başlangıç sıcaklıkları ($Onset_c$ - $Onset_m$, °C), tepe sıcaklıkları (T_c - T_g , °C) ve entalpi değerleri (ΔH_c - ΔH_m , J/g) Çizelge 3’te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde LA’nın kristalleşme başladığı sıcaklık değerinin 40.98 °C olduğu ve 37.02 °C sıcaklıkta kristalleşmenin tamamen gerçekleştiği, ergimeye

başladığı sıcaklık derecesinin 43.39 °C olduğu ve 49.08 °C sıcaklıkta ise tamamen ergimenin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Literatürde saf LA'nın kristalizasyon ve ergime sıcaklık değerlerinin sırasıyla 40.58 °C ve 45.48 °C olarak belirlenmiştir (Eisa vd., 2020). Hazırlanan LA-O örneğinin 17.33 °C'de kristalleşmeye başladığı, 12.52 °C sıcaklıkta kristalleşmenin tamamlandığı, 11.04 °C'de ergimeye başladığı ve 24.01 °C sıcaklıkta ise ergimenin tamamlandığı belirlenmiştir. LA oleojellerinin saf LA'ya kıyasla

daha düşük kristalizasyon ve ergime tepe sıcaklıklarına sahiptir. Kanola yağının %10 konsantrasyonda LA ile yapılandırıldığı bir çalışmada oleojellerin kristalizasyon ve ergime tepe sıcaklığı sırasıyla 5.7 °C ve 22.35 °C olarak belirlenmiştir (Eisa vd., 2020). Literatürdeki çalışmada kullanılan likit yağ ve oleojeletör saflık değerleriyle bu çalışmada kullanılan materyallerin olası farklılığı göz ardı edildiğinde sonuçlar paralellik göstermektedir.



Şekil 3. Hazırlanan oleojellerin polarize ışık mikroskobu (PLM) görüntüleri (a: %20 laurik asit oleojeli, b: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, c: laurik asit-Span 60 oleojeli, 40x büyütme)

Figure 3. The polarized light microscopy (PLM) images of the prepared oleogels (a: 20% lauric acid oleogel, b: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, c: lauric acid-Span 60 oleogel, 40x magnification)

Çizelge 3. Hazırlanan oleojellerin termal özellikleri

Table 3. The thermal properties of the prepared oleogels

	Kristalizasyon Crystallization			Ergime Melting		
	Başlangıç (°C) Onset (°C)	Pik (T _c , °C) Peak (T _c , °C)	ΔH _c (J/g) ΔH _k (J/g)	Başlangıç (°C) Onset (°C)	Pik (T _m , °C) Peak (T _c , °C)	ΔH _m (J/g) ΔH _e (J/g)
LA	40.98±0.13	37.02±0.12	-185.05±1.89	43.39±0.02	49.08±0.35	170.03±1.65
LA-O	17.33±5.13	12.52±7.41	-22.90±2.98	11.04±0.95	24.01±1.07	22.40±3.56
LA/F68-O	19.21±1.44	13.60±1.84	-20.76±5.52	15.46±4.57	25.14±0.82	20.87±0.65
LA/SP60-O	10.40±0.04	6.27±0.13	-22.63±0.78	12.41±0.11	24.56±0.01	21.34±0.83

LA-O: %20 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli

LA-O: 20% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel

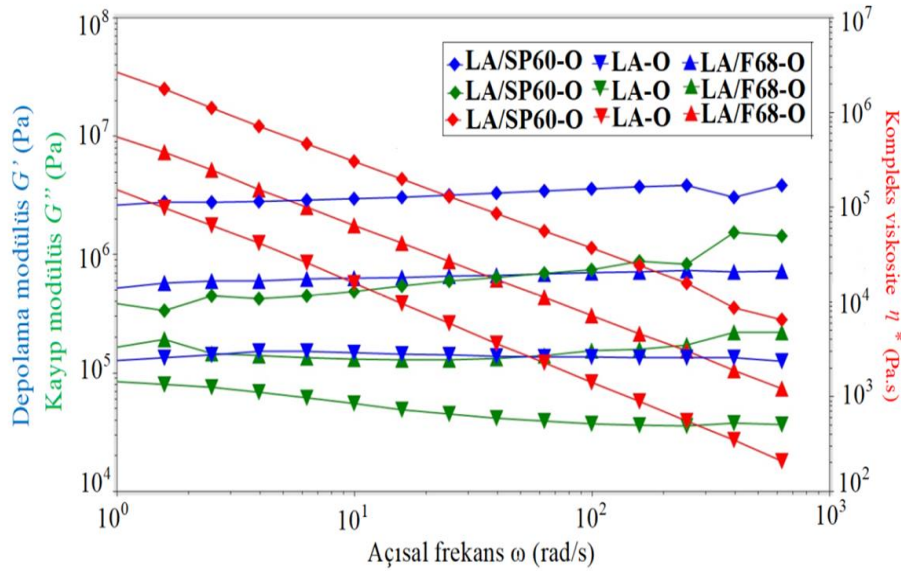
Reolojik Özellikler

Oleojellerin reolojik karakterizasyonu uygulanan frekans-tarama, zaman-tarama ve sıcaklık-rampa testleri gibi osilasyon testleri ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle geçerli reolojik ölçümler yapabilmek için gerinim-taraması testleri

yapılmış ve örneklerin doğrusal viskoelastik bölgeleri (LVR) LA-O, LA/F68-O ve LA/SP60-O için %0.04, %0.02 ve %0.035 gerinim değerleri olarak belirlenmiştir. İlk olarak LVR bölgesi içinde 10 °C sıcaklık ve 1-1.000 rad/s açısal frekans aralığında uygulanan frekans-tarama

testleri ile sabit genlikte salınım frekansı artışı ile oleojellerin G' , G'' ve η^* değerleri belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarına ait grafik Şekil 4'te sunulmuştur. Bir jel örneğinde ölçülen depo modülü (G'), o örneğin katıya ne kadar benzediğinin ve kayıp modül de (G'') o örneğin sıvılara ne kadar benzediğinin bir ifadesidir (Mezger, 2014). Oleojellerin tümünde ölçüm yapılan frekans aralığında her zaman $G' > G''$ olduğu, dolayısıyla her birinin jel yapıya sahip olduğu ve depolama süresince de jel yapının herhangi bir faz ayrımı olmadan korunabildiği tespit edilmiştir. Ölçüm aralığında uygulanan

frekansta artış olmasına rağmen $G' > G''$ durumunun korunması örneklerin gerçek jel yapılarını deformasyona karşı koruyabildiğini göstermiştir. Oleojellerin jel dayanıklılığı bakımından sıralanışı, depo modül değerlerinin büyüklüğü dikkate alınarak $LA/SP60-O > LA/F68-O > LA-O$ şeklinde belirlenmiştir (Şekil 4). Dolayısıyla LA'nin emülgatörlerle kombine kullanımının oleojel yapısını geliştirdiği, sertliğini artırdığı ve daha uzun süre dayanabileceği sonucunu göstermiştir. Bu pratik kullanım açısından oldukça olumlu bir sonuçtur.



Şekil 4. Hazırlanan oleojellerin frekans-tarama testi grafikleri (LA-O: %20 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli)

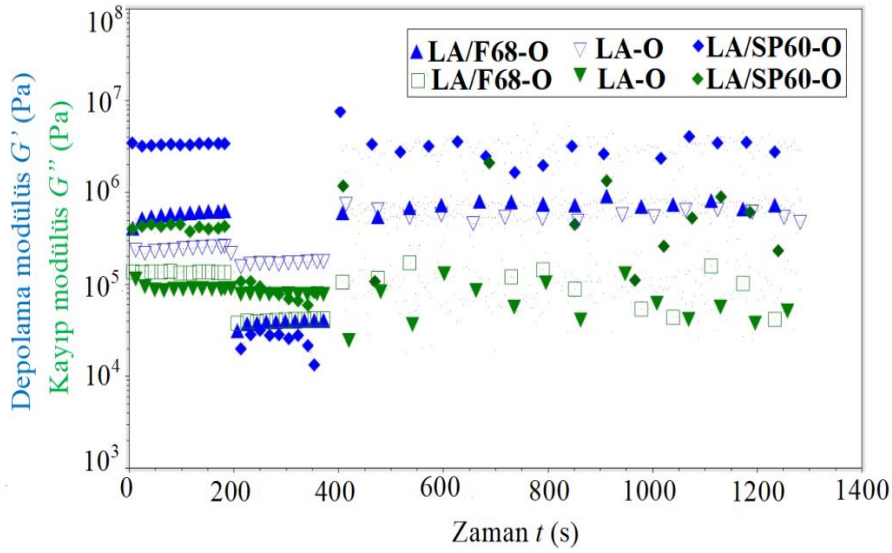
Figure 4. The frequency-sweep test graphics of the prepared oleogels (LA-O: 20% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel)

İkinci olarak oleojellerin zamana bağlı tiksotropik davranışlarını belirlemek için 1 Hz frekans ve 10 °C sabit sıcaklıkta üç bölge içinde (birinci bölgede LVR'de belirlenen gerinim değeri, ikinci bölgede bu değerlerin üstünde ($LVR_{strain} \geq Strain$) ve üçüncü bölgede bu değerlerin altındaki ($LVR_{strain} \leq Strain$) gerinim değerlerinde) farklı gerinim kuvveti ile zaman-tarama testleri uygulanmış ölçüm sonuçlarına ait grafik Şekil 5'te verilmiştir. Tiksotropik özellikler, büyük bir deformasyon işlemi sonrasında bir malzeme tarafından sergilenen geri-dönme (iyileşme) süresi

olarak tanımlanmaktadır (Mezger, 2014; Keskin Uslu ve Yılmaz, 2021). Birinci bölgedeki dinlenme bölgesinde oleojellerin tümünün $G' > G''$ koşulunu sağladığı yani jel yapıya sahip olduğu, ikinci bölgede üç oleojelde de yüksek kuvvete maruz kalması sebebiyle G' değerlerinde önemli düşüş gözlemlendiği ve yapısal deformasyonun olduğu ve son olarak üçüncü bölgede oleojellerin G' değerlerinin tekrar G'' değerlerinin üzerine çıktığı yani yapısal geri dönüşümün (recovery) meydana geldiği belirlenmiştir. Literatürde yer alan bir çalışmada kanola yağı

sırasıyla LA, etil selüloz ve farklı konsantrasyonlarda etil selülozun LA kombinasyonu ile yapılandırılarak oleojeller üretilmiş tiksotropik özellikleri zaman tarama testleriyle araştırılmıştır. Etil selüloz oleojeline LA

ilavesinin oleojellerin iyileştirilmiş tiksotropik performansa yol açan geri dönüşüm yeteneğini önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir (Eisa vd., 2020).

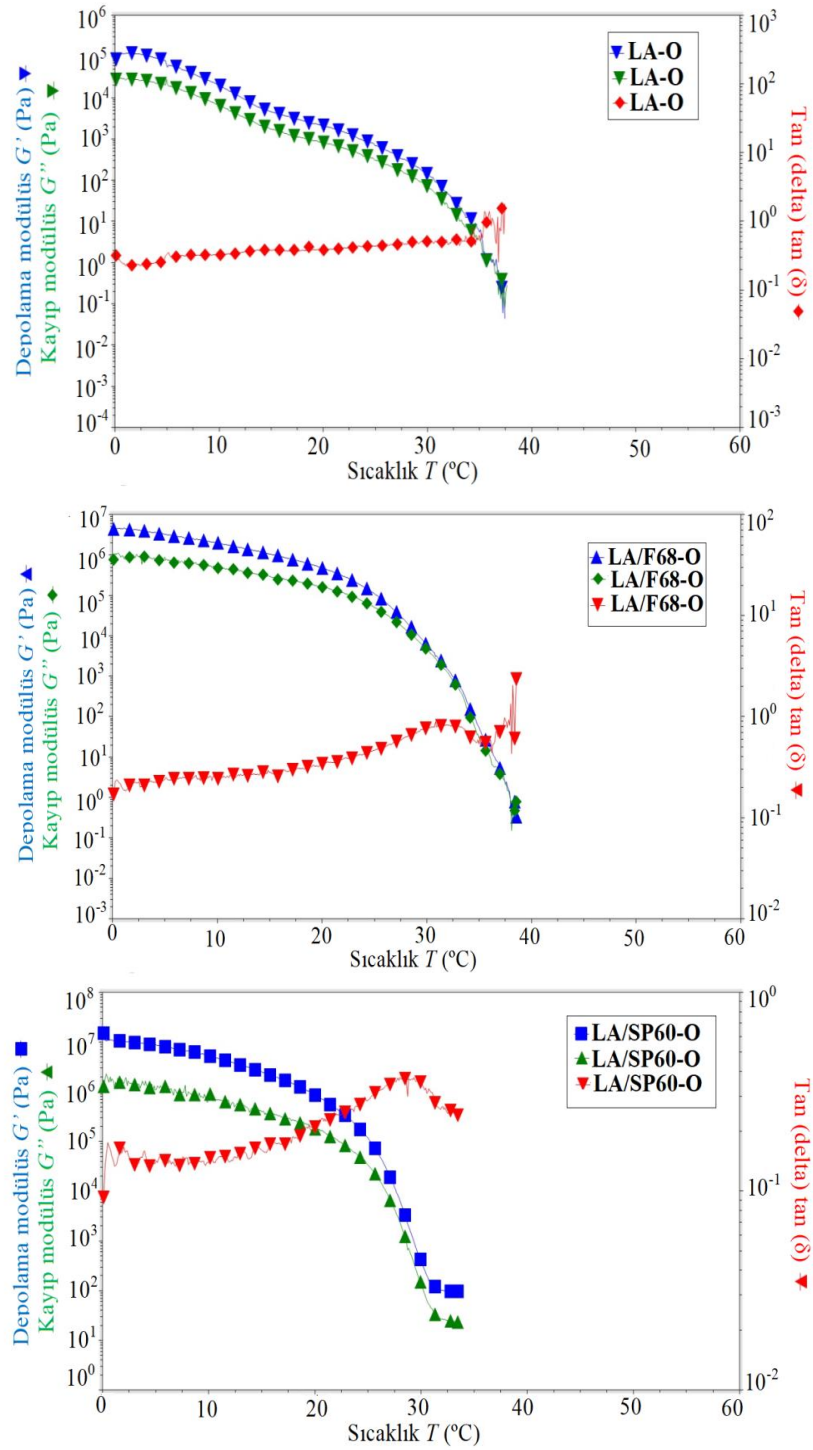


Şekil 5. Hazırlanan oleojellerin zaman-tarama testi grafikleri (LA-O: %20 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli)

Figure 5. The time-sweep test graphics of the prepared oleogels (LA-O: 20% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel)

Son olarak oleojellerin farklı sıcaklıklardaki davranışlarını incelemek için LVR'de belirlenen sabit gerinim ve 1 Hz frekansta, 120 s bekleme süresinde sıcaklık-rampa testleri uygulanmış ve sonuçlar Şekil 6'daki grafikte verilmiştir. Bu analiz ile 0 °C'den 70 °C'ye çıkıldığında oleojellerin yapısında meydana gelen değişiklikler belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sıcaklık artışına paralel olarak depo (G') ve kayıp (G'') modül değerlerinde kademeli olarak bir azalış görülmüştür. Bir jelin stabil jel formunu koruyabildiği son sıcaklık değeri çapraz geçiş noktası ($G' = G''$) olup bu noktadan sonra jel yapı son bularak sol yapıya geçilmektedir (Mezger,

2014). Şekil 6'dan görüleceği gibi LA/SP60-O, LA/F68-O ve LA-O örneklerinde sırasıyla yaklaşık 30 °C, 28 °C ve 34 °C'de çapraz geçiş noktasına varıldığı gözlenmiştir, bu sıcaklıklardan sonrası oleojel formunu kaybedip likit forma geçmiştir. Sonuçlar DSC analizinde elde edilen sonuçlar ile birbirini desteklemektedir. Fizikokimyasal ve reolojik analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde LA oleojellerin emülgatör ilavesiyle biraz daha iyi yapı ($p < 0.05$) jel oluşturduğu ancak mum oleojelleriyle (Mattice ve Marangoni, 2018; Keskin Uslu ve Yılmaz, 2019 ve 2021) kıyaslanamayacak ölçüde düşük stabiliteli, dayanıksız ve zayıf yapıları oldukları belirlenmiştir.



Şekil 6. Hazırlanan oleojellerin sıcaklık-rampa testi grafikleri (LA-O: %20 laurik asit oleojeli, LA/F68-O: laurik asit-Pluronic F68 oleojeli, LA/SP60-O: laurik asit-Span 60 oleojeli)

Figure 6. The temperature-ramp test graphics of the prepared oleogels (LA-O: 20% lauric acid oleogel, LA/F68-O: lauric acid-Pluronic F68 oleogel, LA/SP60-O: lauric acid-Span 60 oleogel)

SONUÇ

Bu çalışmada 12 karbon zincir uzunluğuna sahip laurik asit ve Span 60 - Pluronic F68 emülgatörlerinin kombinasyonunun ayçiçek yağı ile oluşturduğu oleojellerin fizikokimyasal, reolojik, yapısal ve termal özellikleri araştırılmıştır. Ayçiçek yağı yalnızca LA ile %20 konsantrasyonda oleojel oluşturabiliyor iken Span 60 ve Pluronic F68 emülgatör ilavesiyle (%5) daha düşük konsantrasyonda (%15) LA ile oleojel oluşturabilmiştir. Üstelik %15 konsantrasyonda LA ve emülgatörlerle (Span 60 veya Pluronic F68) hazırlanan oleojellerin %20 konsantrasyonda LA içeren oleojellerden daha dayanıklı bir jel yapıya sahip olduğu reolojik testlerle belirlenmiştir. Reolojik analizler ayrıca oleojellerin stabil jel formda olduğunu ve yapısal geri dönüşüm yeteneklerinin olduğunu ortaya koymuştur. Ancak laurik asidin nispeten yüksek konsantrasyonlarda oleojel oluşturma yeteneğinin, bu tür oleojellerin gıda ürünü olarak kullanımlarını sınırlandırabileceğini ortaya koymuştur. Öte yandan kolay bulunabilir ve beslenme açısından da önemli olan laurik asidin diğer oleojelatörlerle kombine edilmesiyle çok daha düşük konsantrasyonlarda da jel oluşturabileceği ve gıdalarda kullanılabileceği düşünülmektedir. Bunun için yeni araştırmalara ihtiyaç belirlenmiştir. Bu çalışmada üretilen oleojellerin gıda ürünlerinde belli oranlarda kullanımının ve gıda-dışı alanlarda kullanımının ise mümkün olduğu değerlendirilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarların, başka kişiler ve/veya kurumlar ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZAR KATKILARI

Orjinal taslak metninin yazılması: Eda Keskin Uslu, deneyin planlanması: Emin Yılmaz ve Eda Keskin Uslu, deneyin yapılması: Eda Keskin Uslu, çalışma fikrini oluşturma: Emin Yılmaz, deney tasarımını oluşturma: Emin Yılmaz, orijinal taslağın kontrolü/düzenlenmesi: Emin Yılmaz, çalışmanın araştırılması: Emin Yılmaz ve Eda Keskin Uslu tarafından yapılmıştır. Yazarlar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma (TÜBİTAK) kurumu (Proje No: TOVAG-2170094) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

AOCS. (2012). AOCS Official Method Cj 2-95. X-ray diffraction analysis of fats. Official Methods and Recommended Practices of the AOCS, 6th Ed. 2011-2012 Methods and Additions and Revisions.

Co, E.D., Marangoni, A.G. (2012). Organogels: An alternative edible oil-structuring method. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89: 749-780. doi 10.1007/s11746-012-2049-3.

Davidovich-Pinhas, M. (2016). Oleogels: a promising tool for delivery of hydrophobic bioactive molecules. *Therapeutic Delivery*, 7 (1), 1-3. <https://doi.org/10.4155/tde.15.83>.

Eisa, A.H., Laufer, S., Rosen-Kligvasser, J., Davidovich-Pinhas, M. (2020). Stabilization of ethyl-cellulose oleogel network using lauric acid. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 122 (1900044): 2-10. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900044>.

Harris, L., Rosen-Kligvasser, J., Davidovich-Pinhas, M. (2019). Gelation of oil using combination of different free fatty acids. *Food Structure*, 21: 100121-100131. <https://doi.org/10.1016/j.foosr.2019.100121>.

Hwang, H-S. (2020). A critical review on structures, health effects, oxidative stability, and sensory properties of oleogels. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 26: 101657. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101657>.

Keskin Uslu, E., Yılmaz, E. (2019). Protein emülsiyon ağıyla yapılandırılmış oleojeller. *Akademik Gıda*, 17(3), 410-416. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.647730>.

Keskin Uslu, E., Yılmaz, E. (2021). Production and characterization of oleogels with tallow and partially hydrolyzed tallow as organogelators. *Grasas Y Aceites*, 72 (1): 388-398. <https://doi.org/10.3989/gya.1031192>.

- Mattice K.D., Marangoni A.G. (2018). Insights into wax crystal networks in oleogels. In: *Edible Oil Structuring Concepts, Methods and Applications*. Patel, A.R. (chief ed.), Volume1, Royal Society Chemistry, Chambridge, pp. 71-95.
- Mezger, T.G. (2014). *Applied Rheology*. Volume1, Anton Paar GmbH, Austria, 191p. ISBN:10-3950401601.
- Minitab. (2010). Minitab Statistical Software (Version 16.1). Minitab, Inc., State College, Pennsylvania, US.
- O'Brien, R.D. (2004). *Fats and Oils: Formulating and Processing For Applications*. 2nd Edition, CRC press LLC, Boca Raton, Florida, 574 p. ISBN: 0-8493-1599-9.
- Sagiri, S.S., Samateh, M., John, G. (2018). Biobased molecular structuring agents. In: *Edible Oil Structuring: Concept, Methods and Applications*, Patel, A.R. (chief ed.), Volume1, Royal Society Chemistry, Chambridge, pp. 25-52.
- Singh, A., Auzanneau, F.I., Rogers, M.A. (2017). Advances in edible oleogel technologies – A decade in review. *Food Research International*, 97: 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.04.022>.
- Uvanesh, K., Sagiri, S.S., Senthilguru, K., Pramanik, K., Banerjee, I., Arfat S., Al-Zahrani, M., Pal, K. (2016). Effect of Span 60 on the microstructure, crystallization kinetics, and mechanical properties of stearic acid oleogels: an in-depth analysis. *Journal of Food Science*, 81(2), E380-E387. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13170>.