



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.05.2023  
Kabul Tarihi : 06.07.2023

Received Date : 15.05.2023  
Accepted Date : 06.07.2023

### JELATİN ÇÖZELTİLERİNİN FARKLI SICAKLIKLARDA KURUTULMASI; KİNETİK, TERMODİNAMİK ve FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

#### DRYING OF GELATIN SOLUTIONS AT DIFFERENT TEMPERATURES; EVALUATION OF KINETIC, THERMODYNAMIC AND FUNCTIONAL PROPERTIES

Ümran CANSU<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-0504-8308)  
Erdal YILDIRIM<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-9309-2420)

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye  
<sup>2</sup>Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ümran CANSU, umrancansu@harran.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada, alternatif kaynaklar arasında gösterilen tavuk derisinden elde edilen jelatin çözeltilerinin kurutma sıcaklığına bağlı olarak değişen fizikokimyasal özellikleri ile kurutma kinetiği ve termodinamiği araştırılmıştır. Kurutmanın matematiksel modellenmesi ve termodinamik davranışların tespiti için 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda jelatin çözeltilerinin kuruma miktarı takip edilmiştir. Aynı zamanda üç farklı sıcaklıkta kurutularak elde edilen toz jelatinin fizikokimyasal özellikleri karşılaştırılmıştır. Farklı sıcaklıklardaki kurutmaya ait deneysel verileri en iyi açıklayan matematiksel modelin Midilli ve Küçük modeli olduğu tespit edilmiştir. Kurutma sürecinin başlangıcında 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda sırasıyla 0.1386, 0.1728, 0.1848 g su/g kuru madde.dak kurutma hızları gözlenmiştir. Efektif difüzyon katsayıları ( $D_{eff}$ ) ise sıcaklıkla birlikte artarak aynı sıcaklıklar için sırasıyla  $1.877 \times 10^{-7}$ ,  $2.082 \times 10^{-7}$ ,  $2.568 \times 10^{-7}$  olarak bulunmuştur. Nem difüzyonunu başlatmak için gereken aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ) ise  $13.53 \text{ kJ mol}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Jelatin çözeltisinde sıcaklığın artmasıyla birlikte Gibbs serbest enerji ( $\Delta G$ ) değerleri artarken entalpi ( $\Delta H$ ) ve entropi ( $\Delta S$ ) değerleri azalmıştır. Jel gücü, 40, 50 ve 60°C'de yapılan kurutmada sırasıyla 343, 291 ve 123 g olarak ölçülmüş ve kurutma sıcaklığının jel gücünü olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen jelatin örneklerinin viskozite değerleri sıcaklık ile azalırken su tutma kapasitesi artmıştır. Ancak jelatin örneklerinin termal stabilite değerlerinin (TGA) kurutma sıcaklığından etkilenmediği belirlenmiştir. Sonuçlar, farklı kurutma sıcaklıklarının hem jelatin tozunun kalitesi hem de çözeltisinin kinetik ve termodinamik davranışı üzerinde etkili olduğunu açıkça göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Konveksiyonel kurutma, jelatin, kinetik modelleme, termodinamik, kalite, termal özellikler.

#### ABSTRACT

In this study, the physicochemical properties, drying kinetics and thermodynamics of gelatin solutions obtained from chicken skin, which is indicated as an alternative source, were investigated as a function of drying temperature. The drying amount of gelatin solutions at 40, 50 and 60°C temperatures were followed for the mathematical modeling of drying and the determination of thermodynamic behavior. Meanwhile, the physicochemical properties of powdered gelatin obtained by drying at three different temperatures were compared. It has been determined that the mathematical model that best explains the experimental data of drying at different temperatures is the "Midilli-Küçük" model. At the beginning of the drying process, 0.1386, 0.1728, 0.1848 g water/g dry matter.min drying rates were observed at 40, 50 and 60°C temperatures, respectively. The effective diffusion coefficients ( $D_{eff}$ ) increased with temperature and were found to be  $1.877 \times 10^{-7}$ ,  $2.082 \times 10^{-7}$ ,  $2.568 \times 10^{-7}$ , respectively, for the same temperatures. The activation energy ( $E_a$ ) required to initiate moisture diffusion was found to be  $13.53 \text{ kJ mol}^{-1}$ . With the increase

ToCite: CANSU, Ü., & YILDIRIM, E., (2023). JELATİN ÇÖZELTİLERİNİN FARKLI SICAKLIKLARDA KURUTULMASI; KİNETİK, TERMODİNAMİK ve FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 742-752.

in temperature in the gelatin solution, Gibbs free energy ( $\Delta G$ ) values increased, while enthalpy ( $\Delta H$ ) and entropy ( $\Delta S$ ) values decreased. The gel strength was measured as 343 g, 291 g, and 123 g, respectively, for drying conducted at 40, 50, and 60°C. It was determined that the drying temperature had a negative impact on gel strength. Furthermore, while the viscosity values of the obtained gelatin samples decreased with temperature, the water holding capacity increased. However, it was determined that the thermal stability values (TGA) of the gelatin samples were not affected by the drying temperature. The results clearly showed that different drying temperatures had an effect on both the quality of the gelatin powder and the kinetic and thermodynamic behavior of its solution.

**Keywords:** Conventional drying, gelatin, kinetic modelling, thermodynamics, quality, thermal properties.

## GİRİŞ

Jelatin, özellikle gıda endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahip çok fonksiyonlu doğal bir proteindir. Jelatinin çok yönlü oluşu ve işlevsel özellikleri, kullanılan ham madde çeşidine, ön işlem basamaklarına, kurutma yöntemlerine ve ekstraksiyon koşullarına bağlıdır (Rather vd. 2022). Asit veya alkali ön işlem, asit veya alkali konsantrasyonu, ekstraksiyon sıcaklığı, ekstraksiyon süresi, kurutma yöntemi ve sıcaklığı gibi proses koşulları jelatinin verimini, tekstürel, fizikokimyasal ve molekül yapısı ve zincir uzunluğu gibi biyolojik özelliklerini etkilemektedir (Kanwate vd. 2019). Ekstraksiyon işleminden sonra, daha iyi fonksiyonel özelliklere sahip jelatin elde etmek için uygulanacak kurutma işlemi önem arz etmektedir. Endüstriyel üretimde toz jelatin, ekstraksiyon çözeltisinin konvektif sıcak hava kullanılarak elde edilmesiyle ön plana çıkmaktadır. Genel olarak kurutma, eş zamanlı ısı ve kütle transferi nedeniyle jelatin gibi proteinlerin fizikokimyasal dönüşümlerini beraberinde getirmektedir (Dehnad vd. 2016). Kurutma işlemi sırasında, ısı, kovalent ve kovalent olmayan bağların bölünmesini tetikleyebilir ve bu da jelatinin protein yapısının değişmesine neden olabilir. Jelatinin fizikokimyasal özelliklerindeki değişiklikler esas olarak kurutma yöntemlerine ve uygulanan kurutma koşullarına bağlıdır. Bu durumda kurutulan jelatinin kalitesi ve özellikleri kurutma sıcaklığından etkilenmektedir (Kanwate vd. 2019; Dehnad vd. 2016).

Kurutma işlemi jelatin endüstrisinde varyasyonlara sahip olmakla beraber son ürünün kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Kinetik modeller varyasyonların en aza indirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede enerji ve zaman kullanımında en iyi koşullar tespit edilebilecektir. Bu sayede üretim maliyetlerinin minimize edilmesi mümkün olacaktır. Gıda alanında gerçekleştirilen kurutma kinetiği matematiksel modelleme çalışmalarında ince tabaka modelleri ön plana çıkmaktadır. Bu modeller gıda maddesi ile hava arasındaki nem transferine karşı dış direnci dikkate alır ve böylece kurutma davranışının daha iyi tahmin edilmesini sağlar. En yaygın olarak uygulanan ince tabaka modelleri yarı teorik ve ampirik modellerdir. Yarı teorik modeller, Fick'in ikinci yasasının genel seri çözümü basitleştirilerek türetilir ve bir gıda maddesinin geometrisi, difüzyon hızı ve iletkenliği ile ilgili herhangi bir varsayıma ihtiyaç duymazlar (Turan & Fıratlıgil. 2019). Literatürde farklı kurutma sıcaklıklarında gıda maddelerinin kurutulması ve deneysel nem verilerinin matematiksel modeller ile karşılaştırılmasını içeren çalışmalar mevcuttur. Kılıç & Çınar (2019) yaptıkları çalışmada farklı kurutma havası sıcaklıklarında (60, 70 ve 80°C) havuç, kabak ve patlıcanın konvektif sıcak hava kurutma özelliklerini ve kurutma kinetiğini araştırmıştır. Deneysel sonuçlar Henderson ve Pabis, Newton gibi seçilmiş ince tabaka kurutma modellerine ve iki terimli modellere uydurulmuş ve nem içeriğinin deneysel ve tahmin edilen değerleri arasında iyi uyum gözlemlenmiştir. Elma dilimleri ile gerçekleştirilen bir diğer çalışmada farklı kalınlıkların ve nem oranının kurutma kinetiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, Page, Midilli ve Henderson-Pabis modellerine uyarlanarak Henderson-Pabis modelinin elma dilimlerinin kuruma kinetiğini diğer modellere göre daha iyi açıkladığı tespit edilmiştir (Yıldız & Gökayaz, 2020). İnce tabaka halinde kurutulan (40, 50, 60 ve 70°C) fıstık çekirdeklerinin deneysel kurutma verileri matematiksel modeller ile açıklamaya çalışılmıştır. Difüzyon Yaklaşımı, İki Terim, Midilli, Page ve Thompson Modelleri, fıstık çekirdeklerinin ince tabakalar halinde kuruma kinetiğini temsil etmek için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Goneli vd. 2017).

Kurutma işlemleri ile elde edilen deneysel verilerin matematiksel modeller ile açıklanmasına ek olarak kurutmaya ait termodinamik analizler de yapılmaktadır. Termodinamik hesaplamalar ile, ısı ve kurutma ilişkileri, difüzyon katsayılarını ve aktivasyon enerjisi gibi kuruma süresince termodinamik davranışları daha anlaşılır hale getirilmesi sağlanabilmektedir. Morais vd. (2019) çalışmalarında farklı ısıl koşullar altında (40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda) 'bacaba' (*Oenocarpus bacaba* Mart.) pulpu kurutulmuş ve işlemin difüzyon katsayıları, aktivasyon enerjisi ve termodinamik özellikleri hesaplanmıştır. Efektif difüzyon katsayıları,  $10^{-9}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> mertebesindeki büyüklüklerle artan sıcaklıkla artmıştır. Aktivasyon enerjisi 37.01 kJ mol<sup>-1</sup> olarak bulunmuş ve kurutma işlemi endergonik olarak

karakterize edilmiştir. Bir başka çalışmada ince nohut tabakalarını kurutmak için sıcak hava konvektif kurutucuda 40, 50, 60, 70 ve 80°C kurutma sıcaklıkları kullanılmıştır. Hesaplanan efektif difüzyon katsayıları kullanılarak, aktivasyon enerjisinin yanı sıra işlemin termodinamik özellikleri de belirlenmiştir. Efektif yayılım, kurutma sıcaklığına bağlı olarak  $54.0 \times 10^{-11}$  ile  $78.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  arasında değişen değerlerle her modele göre değişmektedir. Entalpi ve entropi değerleri artan sıcaklıkla birlikte azalmış, Gibbs serbest enerjisi sıcaklıkla doğru orantılı olarak bulunmuştur. Kurutma işleminin spontan olmadığı sonucuna varılmıştır (Cavalcanti-Mata vd. 2020). Zencefil için yapılan çalışmada ise kurutma havasının sıcaklığı, hızı ve bağıl nem değerinin kurumaya olan etkileri kinetik olarak incelenmiştir. Farklı sıcaklıklardaki kurumaya ait difüzyon katsayıları  $1.346 \times 10^{-7}$  ile  $2.174 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  değerleri arasında bulunarak, kurutma havası sıcaklığının, hızının ve neminin zencefil kurutmasına etki eden önemli parametreler olarak tespit edilmiştir. Deneysel veriler kuruma kinetiği modelleri ile karşılaştırılmış, %99 regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ile en uygun modelin Page modeli olduğu görülmüştür (Parlak, 2014). Patlıcan dilimlerinin kurutma özellikleri ile ilgili yapılan çalışmada sıcaklık ve ön işlemlerin kuruma süresini önemli ölçüde azalttığı ve rehidrasyon kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Çalışmaya ait efektif difüzyon katsayı değerleri  $2.28 \times 10^{-10}$  ile  $9.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  arasında bulunarak kurutma sıcaklığının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kurutma aktivasyon enerjisinin değeri  $26.14\text{-}32.69 \text{ kJ mol}^{-1}$  olarak bulunmuştur (Doymaz & Aktaş, 2018).

Bu çalışmada, tavuk derisinden elde edilen jelatin çözeltilerinin konvektif kuruması kinetik ve termodinamik açıdan incelenmiştir. Bu amaçla konvektif sıcak hava kullanılarak 40 50 ve 60°C'lerde jelatin çözeltilerinin kuruması takip edilmiş ve elde edilen veriler ilk defa farklı kinetik modeller ile açıklanmıştır. Farklı kinetik modellere uygulanan kurumaya ait deneysel verilerin matematiksel modellere uygunluğu regresyon katsayısı, hata kareler ortalaması ve ki kare testleri ile araştırılmıştır. Jelatin çözeltilerinin kuruma esnasındaki davranışları ayrıca ısıl davranışları termodinamik açıdan da açıklanmış ve kurumaya ait aktivasyon, entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerji değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca farklı sıcaklık değerlerinin jelatinin kalite ve termal özellikleri üzerindeki etkisi jel gücü, viskozite ve termal özellikler ile açıklığa kavuşturulmuştur.

## **MATERYAL ve METOT**

### **Materyal**

Jelatin ekstraksiyonu için kullanılan tavuk derisi yerel marketlerden temin edilmiştir. Tavuk derisinin üzerinde bulunan et parçaları uzaklaştırıldıktan sonra -18°C'de muhafaza edilmiştir.

### **Ön işlemler ve jelatin ekstraksiyonu**

Tavuk derisi dondurarak kurutucu (Armfield, Limited-FT33) kullanılarak 18 saat boyunca kurutulduktan sonra bir kenarı 4 cm olan kare parçalar halinde kesilmiştir. Derinin yapısında bulunan yağın uzaklaştırılması için, 1/25 oranında hekzan ile muamele edilip çalkalamalı inkübatörde (Lab-Line, ABD) 5 saat bekletilmiştir. Yağ ayırma işleminden alınan derilerin üzerinde kalan fazla hekzan 50 °C ayarlanmış etüv yardımıyla uzaklaştırılmıştır (Sarbon vd. 2013).

Protein olmayan kısımların uzaklaştırılması için tavuk derileri 1/25 (g/L) oranında 0.1 M NaOH ile bir saat boyunca muamele edilmiş ve ardından kolajenin suda çözünmesini sağlamak amacıyla 1/20 (g/L) oranında 0.1 M HCl ile muamele edilmiştir. Asit ve alkali işlemleri sonrası deri örnekleri musluk suyuyla 3 defa yıkanmış ve süzölmüştür (Cansu & Boran, 2022). Temizleme, alkali ve asit uygulamalarından geçen deri örneklerinden jelatin ekstraksiyonu, 55°C'de 4 saatte gerçekleştirilmiştir. Elde edilen jelatin çözeltisi vakumlu filtrasyon yardımıyla kaba filtreden geçirildikten sonra 2 mg/mL (jelatin/su) oranına gelinceye kadar rotary evaporatörde (IKA, Almanya) konsantre hale getirilmiştir (Sarbon vd. 2013).

### **Deneysel kurutma yöntemi**

Konsantre edilen jelatin çözeltisi 35 cm çapında polipropilen tabaklara 100 mL dökülerek kurutma denemeleri yapılmıştır. Farklı sıcaklıklardaki kurutma işlemi bir etüv yardımıyla (Mikrotest MKD420, Türkiye) yapılmış ve kurutma işleminin takibi için örnekler her 15 dakikada bir hassas terazide tartılmış ve veriler kaydedilmiştir.

### **Kinetik modeller ve kurutmanın modellenmesi**

Kurutma deneyleri sırasında çözeltinin nem oranı (MR) ve kuruma hızı (DR) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (2)$$

$M_t$  belirli bir zamandaki nem içeriği (g su/ g kuru madde),  $M_o$  başlangıçtaki nem içeriği (g su/ g kuru madde),  $M_e$  denge nem içeriği (g su/ g kuru madde),  $M_{t+dt}$  t+dt zamanındaki nem içeriği (g su/ g kuru madde), t ise kuruma süresidir (saat).  $M_e$  denge nem içeriği sıfır olarak kabul edilmiştir (Özbek & Dadalı. 2007).

Kurutma sürecinde efektif difüzyon, ikinci Fick yasası kullanılarak, sabit difüzyon katsayısı, ihmal edilebilir küçülme ve sabit sıcaklık şartlarında aşağıdaki denklemle hesaplanabilir (Deshmukh vd. 2014):

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemde  $D_{eff}$  efektif difüzyon katsayısı ( $m^2 s^{-1}$ ), L ürünün yarı dilim kalınlığıdır ve protein çözeltisi için bu değer 1.592 mm'dir. t ise kuruma süresidir (saniye). Kuruma süresine karşı ln MR grafiğinin eğimi aşağıdaki gibidir:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (4)$$

Nem hareketinin hızını veren efektif difüzyon  $D_{eff}$  bu eşitlikten hesaplanmaktadır. Belirlenen efektif difüzyon katsayısının kuruma sıcaklığı ile ilişkisi Arrhenius eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$D_{eff} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemde  $D_o$  ön-üstel faktörü ( $m^2 s^{-1}$ ),  $E_a$  aktivasyon enerjisini ( $J mol^{-1}$ ), R gaz sabitini ( $8.3143 J mol^{-1} K^{-1}$ ), T ise kuruma sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Aktivasyon enerjisi  $\ln D_{eff}$  değerine karşı  $1/T$  grafiğinin eğiminden hesaplanmaktadır. Tavuk derisi jelatin çözeltilerinin farklı sıcaklıklarda kurutma kinetiği için Tablo 1'de verilen modeller kullanılmıştır.

Tablo 1. Kinetik Modeller ve Denklemleri

Kinetik model	Denklem
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Midilli-Küçük	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Logaritmik	$MR = a \exp(-kt^n) + b$

### **Kurutma termodinamik parametreler**

Aktivasyon enerjisinin değeri, entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi gibi farklı termodinamik parametrelerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Jelatin çözeltileri kurutmanın termodinamik özellikleri Jideani & Mpotokwana (2009) tarafından açıklanan yöntem kullanılarak eşitlik (6), (7) ve (8) yardımıyla elde edilmiştir:

$$\Delta H = E_a - RT \quad (6)$$

$$\Delta S = R \left( \ln A - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (8)$$

Eşitlik (7)'deki  $k_B$  ve  $h_p$  sırasıyla  $1.38 \times 10^{-23} J K^{-1}$  Boltzmann sabiti ve  $6.626 \times 10^{-34} Js$  Planck sabitidir.

## ***Toz jelatinlerin fonksiyonel ve termal özellikleri***

### ***Jel Gücü ve viskozite analizi***

Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş toz jelatin örneklerinin jel gücü analizi için jelatin numunelerinden %6.67'lik konsantrasyonda çözeltiler hazırlandı. Bunun için her bir örnekten 7 g alınarak üzerine 105 mL saf su ilave edilmiş ve su banyosu (Nüve, Ankara, Türkiye) kullanılarak çözüldürülmüştür. Çözeltilerden 40 mL alınarak kapaklı polipropilen kaplarda jel oluşumu için 4°C'de 16-18 saat olgunlaştırıldı. Jel gücü analizi 12.7 mm çapında düz silindirik başlık ile tekstür analiz cihazı (TA-XT II, Stable Micro Systems Ltd., Godalming, İngiltere) kullanılarak ölçüldü (BSI, 1975). Jelatin çözeltilerinin viskozitesi, 60°C'deki su banyosunda termal olarak dengelenmiş cam kalibreli bir kolon viskozimetresi (Cannon Fenske, State College, PA, ABD) ile ölçüldü (GMIA, 2019).

### ***Su bağlama ve yağ tutma kapasitesi***

Jelatin numunelerinin su tutma kapasitesi (STK), yağ bağlama kabiliyeti (YBK) Cho vd. (2004) tarafından rapor edilen yöntemler kullanılarak analiz edildi. Sabit tartıma getirilen 50 mL'lik falkon tüplerinin içine tartılan 1'er g jelatin örneklerinin üzerine 10 mL saf su ilave edildi ve 15 dakikada bir çalkalanarak oda sıcaklığında 1 saat bekletildi. Daha sonra 6500 rpm'de 5 dakika santrifüj edilen tüpler filtre kâğıdı üzerinde 45° eğimle yarım saat bekletilerek üst fazın ayrılması sağlandı. Tüp içinde kalan peletin ağırlığı tespit edilerek gram jelatin başına tutulan su miktarı hesaplandı. Yağ bağlama kapasitesi için yukarıdaki prosedürde su yerine bitkisel sıvı yağ kullanılmıştır.

### ***Termogravimetrik Analiz (TGA)***

Farklı kurutma sıcaklıklarından elde edilen jelatin tozlarının termal davranışları, inert gaz atmosferi altında (N<sub>2</sub>) ve 30°C'den 800°C'ye kadar 10°C/dak ısıtma hızında çalışan bir Termogravimetrik Analiz Cihazı DTG-60 H (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japonya) ile ölçülmüştür (Nuthong vd. 2009). TGA analizlerinden elde edilen sonuçların 1. türevlerinden yararlanılarak Diferansiyel Termogravimetrik (DTG) sonuçları değerlendirilmiştir.

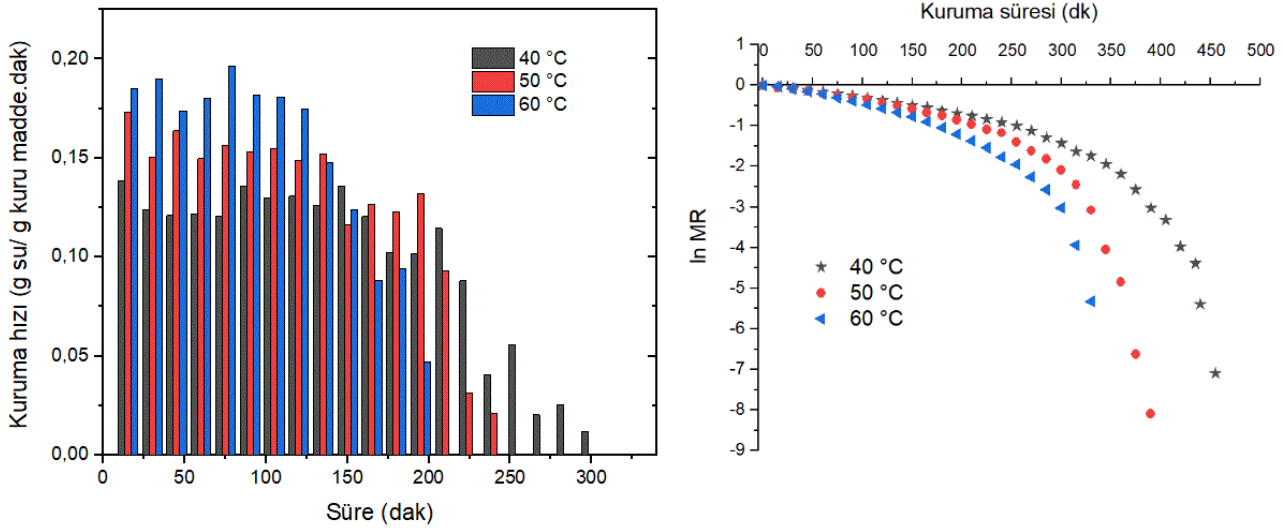
### ***İstatistiksel analizler***

Bu çalışmada yapılan tüm analizler en az 3 tekerrürlü olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kurutma kinetiği çalışmasında elde edilen veriler ile modellere ait tahmini veriler arasındaki ilişki, SPSS (IBM, statistics 25, New York, USA) paket programının ikili regresyon yöntemi kullanılarak regresyon katsayısı (R<sup>2</sup>) belirlenmiştir. Ayrıca deneysel ve tahmini verilerin birbirine olan yakınlıkları hata kareler ortalaması (RMSE- root mean square error) ve X<sup>2</sup> (ki-kare) testleri ile tespit edilmiştir.

## **BULGULAR ve TARTIŞMA**

### ***Difüzyon katsayıları ve kuruma hızları***

Efektif difüzyon katsayılarının Eşitlik (4)'de tanımlanan eğim ifadesinden hesaplanabilmesi için farklı sıcaklıklarda elde edilen deneysel sonuçların  $\ln MR$  değerlerine karşılık kuruma süreleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Eşitlik (5) kullanılarak ön-üstel faktörü ( $Do$ )  $3.337 \times 10^{-5} m^2 s^{-1}$  ve aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ) ise  $13.53 kJ mol^{-1}$  olarak hesaplanmıştır. Yüksek sıcaklıklardaki kurutma sırasında kütle ve ısı transferinin artmasıyla birlikte yüksek efektif difüzyon katsayıları elde edilmiştir (Ismail vd. 2020). Jelatin çözeltilerinde kurutma sıcaklığına bağlı olarak efektif difüzyon katsayılarının artması, çeşitli gıdaların kurutulması ile ilgili yapılan kurutma denemelerinde de görülmektedir (Parlak, 2014; Doymaz & Aktaş, 2018). Jelatin çözeltilerinin 40 50 ve 60°C sabit sıcaklıklardaki tam kuruma süreleri sırasıyla 455, 390 ve 330 dak olarak gerçekleşmiştir. Kuruma süresinin yüksek sıcaklıklarda daha kısa olması efektif difüzyon katsayısının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır ki yüksek sıcaklıklarda suyun daha hızlı buharlaşmasını göstermektedir. Jelatin çözeltilerinin kuruma hızları incelendiğinde (Şekil 1) 60°C'de en yüksek kuruma hızının gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kurutma koşullarının sabit tutulduğu şartlarda, 40°C'de en düşük kuruma hızı ve buna bağlı olarak en uzun kuruma süresi tespit edilmiştir.

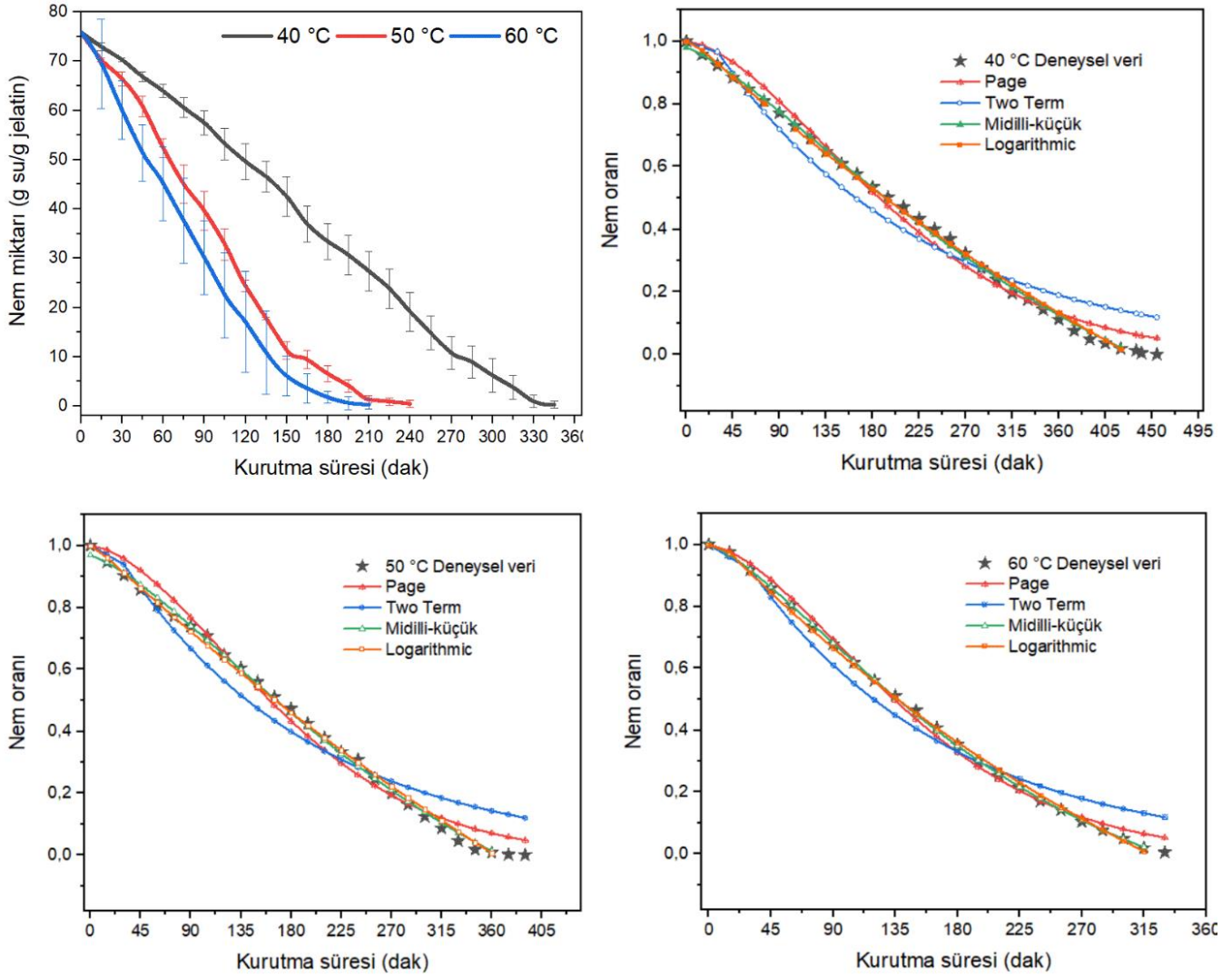


Şekil 1. Jelatin Çözeltilisinin Değişik Sıcaklıklardaki Kuruma Hızları ve Ln MR Değerlerinin Kuruma Sürelerine Karşı Eğrileri

### Jelatin çözeltilerinin kuruma kinetiği ve model uyumlulukları

Şekil 2’de 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda jelatin çözeltileri için ortalama deneysel verilerle çizilen nem oranı eğrileri (Eşitlik 1) ve literatürde sıkça kullanılan modellerden elde edilen nem oranı eğrileri gösterilmektedir. Jelatin çözeltilerinin kurutma işlemi kütle kayıpları ve kurutma kabin sıcaklığı takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda çizilen farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri meyve ve sebze kurutma işlemlerindeki gibi tipik eğriler sergilemiştir. Jelatin çözeltilerinden uzaklaştırılabilecek nem oranının zamana bağlı değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Jelatin çözeltilerine ait kuruma eğrileri farklı sıcaklıklarda farklı değişimler sergilemiştir. Her üç sıcaklık değeri için zamana bağlı olarak uzaklaşan nem miktarı azalma göstermiş ve bu azalma üstsel olmuştur.

Deneysel kurutma verilerinin matematiksel modellenmesi için uygulanan kinetik modeller Tablo 1’de gösterilmektedir. Jelatin çözeltilerinin farklı kurutma koşulları altında kuruma davranışını açıklamak ve tahmin etmek için seçilen modellere deneysel veriler uygulandı. Seçilen modeller için doğrusal olmayan regresyondan elde edilen model katsayıları ve uyum derecesi parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneysel veriler ile model uyumluluklarının tespiti için en yüksek  $R^2$ , en düşük RMSE ve  $X^2$  (ki-kare) kriterine göre değerlendirme yapılmıştır (Simpson vd. 2017). Modellerin istatistiksel analizinde en yüksek  $R^2$  değerleri Midilli-Küçük ve Logaritmik modellerinde olup 0.9980 ile 0.9999 arasındadır. Bununla beraber en düşük RMSE ve  $X^2$  (ki-kare) değerleri de aynı modellerde görülmüştür. Ayrıca En düşük RMSE ve  $X^2$  (ki-kare) değerleri, 60°C’lik kurutma sıcaklığı için seçilen tüm modellerde gözlemlenmiştir. Bu, tüm modeller için 60°C’deki deneysel ve tahmin edilen nem oranlarının birbirini olan yakınlığını göstermektedir (Kumar vd. 2019). Nispeten daha yüksek  $R^2$  ve daha düşük RMSE ve  $X^2$  (ki-kare) değerleri Midilli-Küçük modelinde görüldüğünden, jelatin çözeltilerinin kurutma sürecini bütün kurutma sıcaklıkları için en iyi tanımlayan model Midilli-Küçük modeli olmuştur.



Şekil 2. Jelatin Çözeltilisinin Değişik Sıcaklıklardaki Kuruma Eğrileri ve Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Deneysel Verilerin Kinetik Modellerden Elde Edilen Tahmini Verilerle Karşılaştırılması.

Tablo 2. Farklı Sıcaklıklardaki Kurumaya İlişkin Model Verileri ve Uyumluluk İstatistikleri

Model	Sıcaklık (°C)	Katsayılar ve uyumluluk değerleri						
		n	k	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>		
Page	40	1,6258	0,0001412	0,9939	0,03725	0,0015		
	50	1,6650	0,0001469	0,9928	0,04095	0,0018		
	60	1,6026	0,0002707	0,9977	0,02249	0,0006		
Two Term	40	a	b	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
	40	1,1621	-0,1621	0,005122	13,4948	0,9765	0,0726	0,0056
	50	1,1200	-0,1852	0,005949	0,03315	0,9814	0,0716	0,0055
60	1,1277	-0,1367	0,006825	0,05368	0,9900	0,0617	0,0042	
Midilli-Küçük	40	a	b	n	k	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
	40	0,9805	-0,00052	1,3478	0,000491	0,9991	0,0133	0,0002
	50	0,9695	-0,00060	1,4339	0,000313	0,9986	0,0167	0,0003
60	1,0002	-0,00045	1,3688	0,000693	0,9999	0,0052	0,0001	
Logaritmik	40	a	c	k	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	
	40	2,6051	-1,5885	0,001151	0,9986	0,0167	0,0003	
	50	3,1321	-2,1196	0,001075	0,9980	0,0205	0,0005	
60	1,9775	-0,9346	0,002350	0,9988	0,0156	0,0003		

### ***Jelatin çözeltilerinin kuruma termodinamik davranışı***

Jelatin çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki kurumasına ait termodinamik davranışları Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda kurutma sıcaklıklarında artışla birlikte entalpi değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Düşük entalpi değerlerinin sürecin gerçekleşmesinde daha az enerjiye ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Corrêa vd. 2017). Bununla beraber kurumaya ait entropi değerleri de entalpi değerleri gibi sıcaklık yükselmesiyle birlikte azalmaktadır. Yüksek sıcaklıkla birlikte jelatin çözeltilerinin içerisindeki su buharının kısmi basıncı artarak kurutma havasına olan difüzyonu hızlanmakta ve sonuçta entropide düşüş gerçekleşmektedir (Silva vd. 2020). Gibbs serbest enerji değerleri ise entalpi ve entropi değerlerinin aksine sıcaklığın artmasıyla birlikte artmaktadır. Tablo 3'te elde edilen Gibbs serbest enerji değerlerinin pozitif olduğu görülmekte ve kurutma işleminin spontan olmadığı anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Jelatin Çözeltilerinin Kurutma Termodinamik Parametreleri

Sıcaklık (°C)	$\Delta H(kj/mol)$	$\Delta S(kj/mol)$	$\Delta G(kj/mol)$
40	10,9277	-0,3310	114,5339
50	10,8445	-0,3313	117,8453
60	10,7614	-0,3315	121,1593

### ***Kalite ve fonksiyonel bazı özelliklerin kurutma sıcaklığına göre değişimi***

Jelatinin temel kalite özellikleri olarak tanımlanan jel gücü ve viskozite değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 40, 50 ve 60°C'deki konvektif kurutma sıcaklıklarında toz jelatinlerin jel güçleri sırasıyla, 343, 291 ve 123 g olarak tespit edilmiştir. Yüksek kurutma sıcaklığı muhtemelen jelatin zincirlerinin parçalanmasına ve daha düşük jel kabiliyetine sahip küçük moleküllere parçalanmasına neden olarak jel gücünde azalmaya neden olmuştur. Zayıf jelatin jeli, düşük molekül ağırlığına sahip protein zincirleri ile ilişkilendirilmiştir (Sae-Leaw vd. 2014). Öyle ki düşük molekül ağırlığına sahip bu zincirlerin jel oluşumunda ara bağlantı bölgelerine bağlanma yetenekleri uzun zincir yapılarına kıyasla daha düşüktür ve nihayetinde daha zayıf jel yapılarına neden olmaktadır. Dolayısıyla jel gücündeki bu azalma yüksek sıcaklık değerlerinde jelatin zincirlerinin daha fazla degradasyona uğradığını göstermektedir (Kanwate vd. 2019). Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda oluşan düşük moleküllü jelatin zincirleri düşük viskoziteye neden olduğu belirtilmiştir (Tan vd. 2020).

Jelatinin fonksiyonel özelliklerinden olan STK ve YBK değerleri Tablo 4'te verilmiştir. 50 ve 60°C'deki sıcaklıkların jelatin moleküllerinde polar olmayan kısımların artmasına ve su bağlama kapasitesinde bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir (Ninan vd. 2014). Ancak, Cho vd. (2004) yaptığı çalışmada köpek balığı kıkırdak jelatininin sıcak havayla kurutma sırasında daha fazla hidrofobik kalıntıların açığa çıktığını öne sürmüştür.

Tablo 4. Jelatinlerin Kalite ve Fonksiyonel Özelliklerinin Değişimi

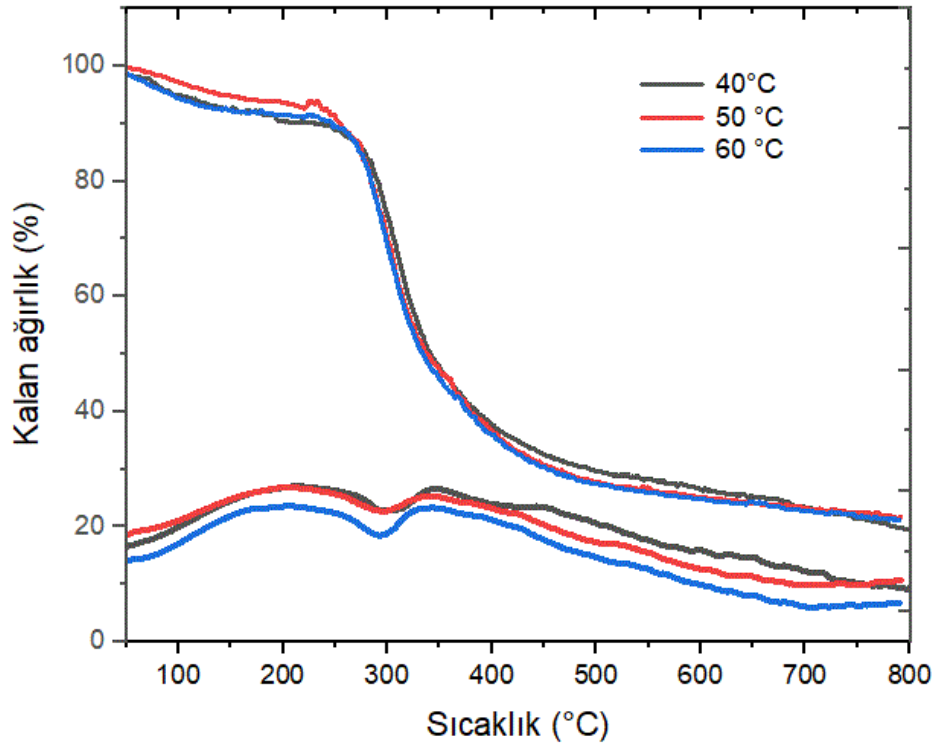
Örnek	Jel gücü (g)	Viskozite (cP)	STK (g su/g jelatin)	YBK (g yağ/g jelatin)
40°C	343±3,5	4,79±0,03	14,42±0,64	2,52±0,85
50°C	291±2,4	4,28±0,13	18,62±0,14	1,19±0,05
60°C	123±1,7	2,70±0,02	18,94±0,09	1,32±0,003

### ***Termal özelliklerin kuruma sıcaklığına göre değişimi***

Farklı sıcaklıklarda kurutulan tavuk derisi jelatinlerinin termal bozunma davranışları Şekil 3'te verilmiştir. Her üç jelatin örneği için bozunma adımları benzer özellikte olduğu belirlenmiştir. Bozunma grafiğinden de anlaşılacağı üzere jelatin örneklerinin sıcaklığa karşı tepkilerinin aynı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum farklı sıcaklıklarda kurutulan tavuk derisi jelatinlerinin termal stabilitelerini etkilemediği sonucunu doğurmaktadır. Jelatin örnekleri temelde üç bozunma adımı sergilemiştir. Sıcaklık artışı ile oluşan ilk etki, 200°C'nin altındaki sıcaklıkta yaklaşık %10 kütle azalması olarak gerçekleşmiş ve toz örneklerin barındırdığı nem miktarından kaynaklanmıştır (Mondragon vd. 2015). En çok bozunmanın meydana geldiği ikinci aşama ise 200 ile 450°C arasında ve muhtemelen protein bileşenlerinin parçalanmasıyla oluşmuştur. Benzer şekilde yapılan jelatine ait termal çalışmalarda 200-500°C aralığında endotermik etkide maksimum bozunma gösterdiği vurgulanmıştır (Mondragon vd. 2015; Sahraee vd. 2017). DTA piklerinin yansıttığı şekliyle DTA özelliklerinin TGA sonuçlarıyla tutarlı olduğu tespit edilmiştir. DTA eğrileri, ilk aşamanın endotermik olduğunu, diğer iki aşamanın ise ekzotermik olduğunu göstermektedir. Birinci pikteki endotermiklik, enerjinin adsorbe edilmiş su moleküllerini buharlaştırmak için gerekli olduğunu gösterir.



Gözlemlenen ekzotermik bölge ise en fazla bozunmanın olduğu yani yanmaktan veya yeni kimyasal bağlar oluşturmaktan salınan enerjiyi temsil etmektedir.



Şekil 3. Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Jelatinlerin Termal Davranışları

## SONUÇ

Kurutma işleminin daha yüksek dehidrasyon kapasitesine sahip olması ve kurutma işlemi sırasındaki gerek kalite gerekse fonksiyonel değişiklikleri en aza indirerek jelatinin özelliklerini koruması önem arz etmektedir. Mevcut çalışmada, Midilli-Küçük matematiksel modelin, jelatin çözeltilerinin deneysel olarak kurutulmasına diğer modellerden daha iyi uyum gösterdiğini tespit edilmiştir. Kurutma sıcaklığının kurutma modeli sabitleri ve istatistiksel değerler üzerindeki etkisi incelendiğinde 40°C sıcaklığın jelatin çözeltilerinin kurutulması için daha uygun olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, jelatinin kalite parametreleri arasında gösterilen jel gücü ve viskozitenin en yüksek değerlerini sergilediği için daha iyi bir ürün elde etme adına jelatin çözeltilerinin 40°C ile kurutulmasının optimum olduğunu ortaya koymuştur. Ancak jelatin, gıda endüstrisinde farklı amaçlar için farklı formlarda üretildiğinden söz konusu amaca yönelik özellikleri sergilediği sıcaklık dereceleri de seçilebilir.

## KAYNAKLAR

Cansu, Ü., & Boran, G. (2022). Kinetic Evaluation of Gelatin Extraction from Chicken Skin and the Effect of Some Extraction Parameters. *Journal of Food Process Engineering*, 45 (4), e13995. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13995>

Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., Duarte, M. E. M., Lira, V. V., de Oliveira, R. F., Costa, N. L., & Oliveira, H. M. L. (2020). A New Approach to The Traditional Drying Models for The Thin-Layer Drying Kinetics of Chickpeas. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), e13569. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13569>

Cho, S. M., Kwak, K. S., Park, D. C., Gu, Y. S., Ji, C. I., & Jang, D. H. (2004). Processing Optimization and Functional Properties of Gelatin from Shark (*Isurus oxyrinchus*) Cartilage. *Food Hydrocolloids*, 18, 573–579. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2003.10.001>

- Corrêa, P. C., de Oliveira, G. H. H., de Oliveira, A. P. L. R., Botelho, F. M., & Goneli, A. L. D. (2017). Thermodynamic Properties of Drying Process and Water Absorption of Rice Grains. *CyTA-Journal of Food*, 15(2), 204-210. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1238012>
- Dehnad, D., Jafari, S. M., & Afrasiabi, M. (2016). Influence of Drying on Functional Properties of Food Biopolymers: from Traditional To Novel Dehydration Techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 116-131. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.002>
- Deshmukh, A. W., Varma, M. N., Yoo, C. K., & Wasewar, K. L. (2014). Investigation of Solar Drying of Ginger (*Zingiber Officinale*): Emprical Modelling, Drying Characteristics, and Quality Study. *Chinese Journal of Engineering*, 2014, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2014/305823>
- Doymaz, İ. & Aktaş, C. (2018). Patlıcan Dilimlerinin Kurutma ve Rehidrasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (3), 833-842. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416386>
- Gelatin Manufacturers Institute of America. (2019). *GMIA Standard Methods for the Testing of Edible Gelatin*, New York, USA (pp. 13-15)
- Goneli, A. L., Araujo, W. D., Hartmann, C. P., Martins, E. A., & Oba, G. C. (2017). Drying Kinetics of Peanut Kernels in Thin Layers. *Engenharia Agrícola*, 37, 994-1003. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430> <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.040>
- Ismail, M. H., Khan, K. A., Ngadisih, N., Irie, M., Ong, S. P., Hii, C. L., & Law, C. L. (2020). Two-Step Falling Rate in The Drying Kinetics of Rice Noodle Subjected to Pre-Treatment and Temperature. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11), e14849. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14849>
- Jideani, V. A., & Mpotokwana, S. M. (2009). Modeling of Water Absorption of Botswana Bambara Varieties Using Peleg's Equation. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 182-188.
- Kanwate, B. W., Ballari, R. V., & Kudre, T. G. (2019). Influence of Spray-Drying, Freeze-Drying and Vacuum-Drying on Physicochemical and Functional Properties of Gelatin from Labeo Rohita Swim Bladder. *International journal of biological macromolecules*, 121, 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.015>
- Kılıç, E. E. & Çınar, İ. (2019). Convective Hot Airdrying Characteristics of Selected Vegetables. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 3 (1), 7-13. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iarej/issue/44303/449564>
- Kumar, P. S., Nambi, E., Shiva, K. N., Vaganan, M. M., Ravi, I., Jeyabaskaran, K. J., & Uma, S. (2019). Thin layer drying kinetics of Banana var. Monthan (ABB): Influence of Convective Drying on Nutritional Quality, Microstructure, Thermal Properties, Color, and Sensory Characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 42(4), e13020. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13020>
- Mondragon, G., Peña-Rodríguez, C., González, A., Eceiza, A., & Arbelaz, A. (2015). Bionanocomposites Based on Gelatin Matrix and Nanocellulose. *European Polymer Journal*, 62, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.003>
- Morais, M. F. D., dos Santos, J. R., Santos, M. P. D., Santos, D. D. C., Costa, T. N. D., & Lima, J. B. (2019). Modeling and Thermodynamic Properties of 'Bacaba' pulp Drying. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 702-708. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n9p702-708>
- Ninan, G., Joseph, J., & Aliyamveetti, Z. (2014). A Comparative Study on The Physical, Chemical and Functional Properties of Carp Skin and Mammalian Gelatins. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2085-2091. DOI 10.1007/s13197-012-0681-4
- Nuthong, P., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2009). Characterization of Porcine Plasma Protein-Based Films as Affected by Pretreatment and Cross-Linking Agents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 44(2), 143-148. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2008.11.006>

- Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-Layer Drying Characteristics and Modelling of Mint Leaves Undergoing Microwave Treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 541-549. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.004>
- Parlak, N. (2014). Akışkan Yataklı Kurutucuda Zencefilin Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29 (2), 261-269. <https://doi.org/10.17341/gummfd.34777>
- Rather, J. A., Majid, S. D., Dar, A. H., Amin, T., Makroo, H. A., Mir, S. A., ... & Dar, B. N. (2022). Extraction of Gelatin From Poultry Byproduct: Influence of Drying Method on Structural, Thermal, Functional, and Rheological Characteristics of the Dried Gelatin Powder. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.895197>
- Sae-Leaw, T., Benjakul, S., & O'Brien, N.M. (2014). Effect of Pretreatments and Drying Methods on the Properties and Fishy Odor/Flavor of Gelatin from Seabass (*Lates calcarifer*) skin. *Drying Technology*, 34(1), 53-65. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.1003071>
- Sahraee, S., Ghanbarzadeh, B., Milani, J. M., & Hamishehkar, H. (2017). Development of Gelatin Bionanocomposite Films Containing Chitin and ZnO Nanoparticles. *Food and Bioprocess Technology*, 10(8), 1441-1453. DOI 10.1007/s11947-017-1907-2
- Sarbon, N. M., Badii, F., & Howell, N. K. (2013). Preparation and Characterization of Chicken Skin Gelatin as an Alternative to Mammalian Gelatin. *Food Hydrocolloids*, 30, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.009>
- Silva, L. P., dos Santos, S. G. F., Queiroz, J. S., Rodovalho, R. S., & Buso, W. H. D. (2020). Drying Kinetics of Soybean Grains. *Científica*, 48(2), 99-106. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p99-106>
- Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., & Almonacid, S. (2017). Understanding The Success of Page's Model and Related Empirical Equations in Fitting Experimental Data of Diffusion Phenomena in Food Matrices. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.003>
- Tan, C.C., Karim, A.A., Uthumporn, U., Ghazali, F.C. (2020). Effect Extraction Temperature on The Emulsifying Properties of Gelatin from Black Tilapia (*Oreochromis Mossambicus*) Skin. *Food Hydrocolloids*, 108, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106024>
- Turan, O. Y., & Fıratlıgil, E. (2019). Modelling and Characteristics of Thin Layer Convective Air-drying of Thyme (*Thymus vulgaris*) Leaves. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(2), 128-134.
- Yıldız, Z. & Gökayaz, L. (2020). Rafli Doğal Konvektif Güneş Enerjili Kurutucuda Elma Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi. *Engineering Sciences*, 15 (1), 34-42. <https://dergipark.org.tr/pub/nwsaeng/issue/51947/632701>