

AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCUDA ZENCEFİLİN KURUMA KİNETİĞİNİN İNCELENMESİ

Nezaket PARLAK

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, M-7, Esentepe Kampüsü, Serdivan,
54187, Sakarya, Türkiye
naydemir@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 02.10.2013; Kabul/Accepted: 10.04.2014)

ÖZET

Bu çalışmada zencefilin akışkan yataklı kurutucuda kuruma kinetiği incelenmiştir. Yaş baza göre başlangıç nemi %88-89 olan zencefil kökleri, 2 mm kalınlığında dilimlenmiş ve % 4-5 nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Kurutma havasının sıcaklığı, hızı ve bağıl neminin kuruma kinetiğine olan etkisini incelemek üzere, deneyler farklı kurutma havası (40, 50, 60 °C) sıcaklıklarında ve farklı (3 ve 4 m/s) hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma esnasında belli zaman aralıklarında alınan numunelerin kuru baza göre nem değerleri ölçülmüş ve daha sonra belirlenen nem oranları kullanılarak difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, kurutma havası sıcaklığının, hızının ve neminin kuruma hızında oldukça etkili bir parametre olduğunu göstermiştir. Ayrıca deneysel veriler literatürde var olan ince tabaka kuruma kinetiği modelleri ile karşılaştırılmış, verilerin Page modeli ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kurutma, akışkan yataklı kurutucu, zencefil

INVESTIGATION OF DRYING KINETICS OF GINGER IN A FLUIDIZED BED DRYER

ABSTRACT

In the study, drying kinetics of ginger in a fluidized bed dryer are investigated. Ginger roots are sliced with thickness of 2 mm and dried from initial moisture content of 88-89% (w.b.) to the final moisture content of 4-5% (w.b.). Experiments are carried out with three different drying air temperatures of 40, 50, and 60°C by keeping the air velocity fixed at different values (3 and 4 m/s) to investigate temperature, humidity and velocity of drying gas (air). The moisture content of the samples on dry basis is measured at predetermined time intervals and then overall moisture diffusivities are calculated using the moisture ratios. Experimental results show that temperature, humidity and velocity of air are important parameters have an effect on drying rate of sliced ginger in fluidized bed dryer. In addition, experimental moisture loss data has been compared with thin layer drying models available in the literature and Page model has shown a better fit to the experimental data.

Keywords: Drying, fluidized bed dryer, ginger

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kurutma ürünlerdeki nemin buharlaştırma yoluyla uzaklaştırılması işlemi olarak ifade edilen en eski gıda saklama yöntemlerinden biridir. Genel olarak hasat edilmiş bir üründe, ürünün cinsine göre yaklaşık % 30 ila 90 arasında nem bulunmaktadır. Bu nem miktarı geleneksel yöntemlerle (güneşte açık havada kurutma) uzaklaştırılmak istendiğinde, ürün miktarı çok, hava şartları uygun değil ve çevredeki zararlı canlılardan

ürün muhafaza edilemiyorsa, ürünün değeri giderek düşecektir. Bu sebeple; özellikle sağlığımızı tehdit eden küf (Aflatoksin) oluşumunun önüne geçilebilmesi için tarım ürünlerinin kısa süre içerisinde ve modern kurutma yöntemleri ile kurutulması gerekmektedir. Dünyada 100' ü yaygın olmak üzere yaklaşık 400 farklı tipte kurutucu mevcuttur [1]. Bu kadar fazla çeşitte kurutucu olmasının nedeni; kurutmanın endüstrinin birçok alanında yer alması ve bu prosesin ülkelerin toplam enerji tüketiminde büyük bir orana

sahip olmasıdır. Bu oran Amerika Birleşik devletlerinde %15 iken, Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde %25'i bulmaktadır. Ürün kalitesini bozmadan en az enerjiyi harcayarak kısa sürede kurutan bir kurutucu arayışı bu çeşitliliğin nedeni olarak gösterilebilir.

Akışkan yataklı kurutucular günümüzde yüksek kurutma oranları ve termal verimleri ile küçük akış alanı, düşük maliyet ve kolay kontrol edilebilir özelliklerinden dolayı geleneksel kurutma yöntemlerinin yerini almıştır. Bir akışkan yataklı kurutma prosesinde ürünün kurutucu haznesi içinde akışkanlaştırılması sağlanarak madde parçacıklarının eşit dağılımı sağlanmakta ve böylece ısı ve kütle transferi gerçekleşmektedir. Bu kurutucular çapları 2 ila 5 mm arasında değişen başta kimya, gıda, ecza, seramik ve yapı ürünlerinin kurutulması gibi endüstrinin birçok alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde yayınlanmış çalışmalara bakıldığında; Pugsley [2]; Vervloet,[3] ve Wormsbecker vd. [4] akışkan yataklı kurutucuyu ilaç; Bizmark vd. [5] , Izadifar ve Mowla [6], Assari vd. [7]; Fyhr ve Kemp [8]; Lai ve Chen [9]; Madhiyanon vd. [10]; Palancz [11]; Srinivasakannan ve Balasubramanian [12] ve Zare ve Chen [13] çeltik; Geng vd. [14] tütün; Meziane [15] zeytin posası; Białobrzewski vd. [16] havuç ; Zanoelo [17] çay yaprakları; Niamnuy ve Devahastin [18] hindistan cevizi; Bayrock ve Ingledew [19] maya; Tasirin vd. [20] biber ve Topuz vd. [21] fındık kurutmada kullandıkları görülmüştür.

Zencefil (*Zingiber officinale*) vatanı Güney Asya olarak bilinen bir bitki olup, tadı, keskin lezzeti ve diğer içerdiği yağlar nedeniyle hem ilaç hem de gıda sektöründe aranan katkı maddelerinden biridir [22]. Bugün başta Hindistan ve Çin olmak üzere Asya, Afrika, Avusturalya, Güney ve Orta Amerika'da ve birçok ülkede yetiştirilmektedir. Uluslararası pazarda zencefilin tonu 300-500 Amerikan Doları arasındadır. Ülkemizde ise 1 kg'lık yaş zencefilin perakende fiyatı 6TL-15TL arasında değişmektedir. Zencefil toz haline gelinceye kadar temel olarak yıkama, soyma, kurutma ve öğütme işlemlerinden geçmekte, bu süreç beraberinde kalite ve hijyen problemlerini getirmektedir. Schweiggert ve ark. [23] sprey kurutucu kullanarak kuruttıkları zencefilin gıda analizlerini gerçekleştirmişler ve bu tür problemlerin önüne geçmek için alternatif kurutma yöntemlerine ihtiyaç olduğu sonucuna varmışlardır. Alakalı vd., [24] zencefilin uygun depolama şartlarının belirlenmesi için denge nemi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Denge nemi içeriğinin su aktivitesi ile doğru orantılı, sıcaklıkla ters orantılı olduğunu rapor etmişlerdir. Phoungchandang ve Saentaweesuk [25] dilimlenmiş zencefile ait desorpsiyon izotermelerini deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneysel tepsi kurutucu kullanışlar, difüzyon katsayılarını kurutma

eğrilerinden elde etmişlerdir. Dilimlenmiş zencefilin kuruma davranışının, literatürde Page modeli olarak bilinen modelle uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir. Bir diğer zencefil kurutma üzerine çalışma Ganesapillai ve ark., [26] tarafından mikrodalga kurutma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. 1 mm kalınlığında dilimlenmiş zencefil örneklerinin difüzyon katsayısını $9,17 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak rapor etmişler, bu değer zencefil örneklerinin kalınlığı ile değiştiğini belirtmişlerdir. Thorat ve ark. [27] 5 mm kalınlığında dilimlenmiş zencefilin kuruma karakteristiğini vakum kurutma yoluyla farklı sıcaklıklarda (40 °C, 50 °C, 60 °C, ve 65 °C) incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel verileri eğri uydurma metodu ile modellemişler ve efektif difüzyon katsayılarını bu kurutma metodu için belirlemişlerdir. Ortalama efektif difüzyon katsayılarının sıcaklıkla $1,859 \times 10^{-8}$ ila $4,777 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ değerleri arasında değiştiğini rapor etmişlerdir. Yine Jayashree ve Visvanathan [28] tepsi kurutucu kullanarak başlangıçta kuru baza göre % 419,93 nem içeren zencefil dilimlerini, %10 nem içeriğine kurutmuşlardır. Tipik kuruma eğrilerini çıkararak, ortalama efektif difüzyon katsayısını $1,59 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak rapor etmişlerdir.

Literatüre bakıldığında akışkan yataklı kurutucuların zencefil kurutulmasında kullanıldığını gösteren çalışmaların olmadığı görülmüştür. Sunulan bu çalışmada zencefil akışkan yataklı kurutucuda kurutulmuş, kurutma havasının sıcaklığı, hızı ve bağıl neminin kuruma kinetiğine olan etkisi incelenmiştir. Zencefil, 2 mm kalınlıklarında dilimlenerek deneyler farklı kurutma havası (40, 50, 60 °C) sıcaklıklarında ve farklı (3 ve 4 m/s) hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma esnasında belli zaman aralıklarında alınan numunelerin kuru baza göre nem değerleri belirlenmiş ve nem oranları kullanılarak difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca deneysel veriler literatürde var olan ince tabaka kuruma kinetiği modelleri ile karşılaştırılmış, verilerin Page modeli ile uyumlu olduğu görülmüştür.

2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Kurutulacak üründe nem çeşitli hallerde ve farklı fiziksel-kimyasal bağlarla tutulur. Nemin bulunduğu duruma bağlı olarak uzaklaştırılması için farklı ortam şartlarının sağlanması gerekir. Ürünün nem içeriği genel olarak % yaş baz ve kuru baz olmak üzere iki şekilde ifade edilmektedir. Yaş baza göre nem, $M_{yb,t}$, üründeki su ağırlığının, toplam ağırlığına oranı, kuru baza göre nem ise, $M_{kb,t}$, üründeki su ağırlığının, kuru ağırlığına oranı olarak ifade edilir. Kurutma işleminde önce kurutulacak ürün yüzeyindeki su buharlaşır, sonra ürün içerisinde bulunan nem yüzeye taşınarak buharlaşma gerçekleşir. Buharlaşma hızı genel olarak ürünün fiziksel özelliklerine, boyutuna, içerdiği su miktarına, kurutma şartlarına göre değişmektedir.

2.1. Boyutsuz nem oranı ve kuruma hızı (Dimensionless moisture ratio and drying rate)

Kurutma esnasında ürünün herhangi bir anda içerdiği nem, nem oranı, MR, ile ifade edilir [29].

$$MR = \frac{M_{kb,t} - M_e}{M_{kb,0} - M_e} \quad (1)$$

Burada, $M_{kb,t}$ ürünün herhangi bir t anında sahip olduğu nem içeriği, $M_{kb,0}$ ise başlangıçtaki nem içeriği ve M_e denge nemidir. Kuruma karakteristiğinin belirlenmesindeki bir diğer önemli parametre kuruma hızı (oranı) 'dır.

2.2. Efektif difüzyon katsayısı (Effective diffusion coefficient)

Kuruma sürecinde nemin taşınması karmaşık bir işlem olup; hidrodinamik, knudsen akışı, kılcal akış, moleküler difüzyon ve yüzey difüzyonu ile belirlenebilir. Yapılan çalışmalar, gıda ürünleri gibi biyolojik maddelerin genellikle azalan hız periyodunda kuruduğunu ve matematiksel olarak aşağıda verilen Fick difüzyon yasası ile ifade edilebileceğini göstermişlerdir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 M \quad (2)$$

Bu denklemin kartezyen koordinatlar için çözümü yapıldığında [31];

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

elde edilir. Burada D_{ef} efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), L ince tabaka dilim kalınlığının yarısı (m) ve t (s) zamandır. Uzun kurutma süreleri için ($MR < 0,6$) L küçük t büyük bir değer alır, dolayısıyla ince tabaka geometrisi için serinin ilk terimi alınır. Efektif difüzyon katsayısını belirlemek için denklem 3,

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} t \quad (4)$$

halini alır [32].

2.3. Matematiksel model (Mathematical model)

Gıda ürünlerinin nem içeriği ile kurutma süresinin değişimi eğrilerinin matematiksel modellenmesi Fick difüzyon yasasının (denklem 2) çözümünden ya da deneyler yardımıyla var olan denklemlerden türetilmiş yarı teorik modeller yardımıyla mümkündür. İnce tabaka modelleri arasında denklemleri Tablo 1'de verilmiş olan Newton [1], Page [29] ve Henderson ve Pabis [15] en yaygın kullanılan modellerdir. Denklemlerde yer alan k kurutma sabiti, a ve n diğer

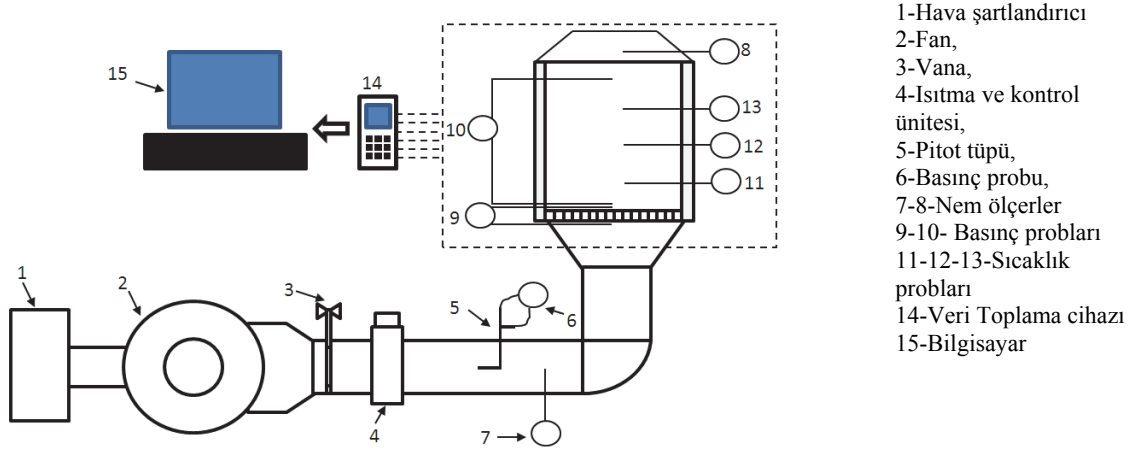
sabitler ve t kurutma zamanıdır. Çalışmada MATLAB (R2012b) programının eğri uydurma aracı kullanılarak bu denklemler deneysel verilere uygulanmış, en uygun denklemi seçmek için regresyon (R^2) katsayısı, artıkların karelerinin toplamı (SSE) ve hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE) kriter olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Literatürde var olan ince tabaka modelleri

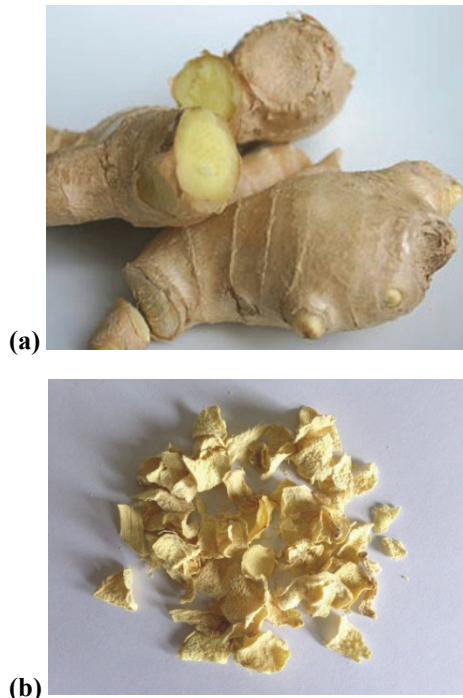
No	Model adı	Denklemi
1	Newton, [1]	$MR = \exp(-kt)$
2	Page, [29]	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson ve Pabis, [15]	$MR = a \exp(-kt)$

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Deneyler Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Laboratuvarında bulunan akışkan yataklı kurutma tesisatında (Şekil1) gerçekleştirilmiştir. Genel olarak test düzeneği akış, ısıtma ve kontrol ünitesi, ölçüm aletleri ile akışkan yataklı kurutma haznesinden meydana gelmektedir. Akışkan yatak iç çapı 200 mm, boyu 700 mm ve duvar kalınlığı 2 mm olup plastik malzemeden yapılmıştır. Dağıtıcı levha 2 mm kalınlıkta, çapları 4 mm olan üçgen dizilmiş deliklere sahiptir. Akışkan yataklı test düzeneğinde hava sıcaklığı 20 ila 80 °C ve hızı 0,5 ila 8 m/s arasında ayarlanabilir. Kurutulacak ürün dağıtıcı levha üzerine konulur. Deney süresince hava sıcaklığı, nemi, hızı, yatak basınç düşüşü sürekli Testo marka ölçüm aletleri ile ölçülür ve bilgisayara aktarılır. Kurutucu haznesindeki sıcaklık değişimi veri toplama cihazına bağlanan sıcaklık ölçerler ile (Testo 905, K-Tipi, 0.1 °C hassasiyetli) Şekil 1 'de gösterildiği gibi dağıtıcı levha üzerinden 3 farklı yükseklikte ölçülür. Basınç düşümü elektronik basınç dönüştürücüsü (Testo 505-P1, 1 mm H₂O hassasiyetli) ile, hava hızı pitot tüpü ile belirlenir. Kurutucu havanın giriş ve çıkıştaki bağıl nem değerleri (RH) 'de Testo 605-H1, 5-95% RH, 0.1% RH hassasiyetle ölçülerek kayıt edilir. Deneylerde zencefil soyularak bir doğrayıcı yardımıyla 2 mm kalınlığında dilimlenmiştir. Her bir deneyde kurutulacak zencefil dilimlerinin ağırlığı 1 kg olarak belirlenmiş, 0,01 gr hassasiyetli terazide ölçülmüştür. Her bir deneyde; kurutma öncesinde ve esnasında periyodik olarak alınan zencefil numunelerin nem değerleri Sartorius marka nem tayin cihazı belirlenmiştir. Zencefil numunelerin başlangıç nem değerleri yaklaşık olarak %88-89 (yaş baz) olarak ölçülmüştür. Yaş ve deney sonrası kurutulmuş zencefile ait numunelere ait resimler aşağıda görülmektedir. Kurutma deneyleri başlamadan önce kurutma şartları (sıcaklık ve ürün boyutu) göz önüne alınarak deney düzeneğinde minimum akışkanlaşma hızı belirlenmiştir.



Şekil 1. Deneysel düzenek (Experimental setup)



Şekil 2. (a) Yaş zencefil kökü (Fresh ginger root) ve (b) akışkan yatakta kurutulmuş zencefil dilimleri (Ginger slices dried by fluidized bed dryer)

Kurutulacak ürün akışkan yatağa konulduktan sonra, havanın hızı yavaş yavaş artırılarak her bir hız değerine karşılık gelen yatak basınç düşüşleri ölçülmüştür. Hız değerine karşılık yatak boyu basınç farkının artmadığı nokta minimum akışkanlaşma hızı 2,1 m/s olarak bulunmuştur. Daha sonra minimum akışkanlaşma hızı ile sürüklenmenin olduğu hız aralığı tespit edilmiş, deneydeki hava hızları bu aralık içerisinde olacak biçimde ayarlanmıştır. Zencefil dilimlerinin kuruma davranışının incelenmesi için, deneyler süresi boyunca her 15 dakikalık ya da her 20 dakikalık zaman aralıklarında numuneler alınmış ve çevre koşullarından etkilenmemesi için poşetlere konulmuştur. Alınan numuneler, Sartorius MA30 infrared nem tayin cihazında ölçülerek son nemleri belirlenmiştir. Bu çalışmada yapılan deneylerin listesi aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Yapılan deneyler (Experiments)

Hava Sıcaklığı T (°C)	Hava Hızı V (m/s)	Kurutulan Ürünün Başlangıç Kütleli m (kg)
40	3	1000
50		
60		
40	4	1000
50		
60		

3.1. Belirsizlik analizi (Uncertainty analysis)

DeneySEL çalışmalarda ölçülen değerlerin doğruluğu elde edilen sonuçlar kadar önemli olup, mutlaka değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada son yıllarda hata oranlarının tespitinde çokça tercih edilen Kline ve McClintock belirsizlik analizi [33] yöntemi kullanılarak hata analizi gerçekleştirilmiştir. Bir deneysel çalışmada tespit edilmesi gereken büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olmak üzere, fonksiyon $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ şeklinde yazılabilir. Deneylerde etkili olan her bir bağımsız değişkene ait hataları $\pm w_{x_1}, \pm w_{x_2}, \pm w_{x_3}, \dots, \pm w_{x_n}$ ise R büyüklüğünün toplam belirsizliği $\pm w_R$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$w_R = \pm \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Denkleme bakıldığında her bir parantez içerisindeki ifade asıl belirlenecek parametreye etki eden belirsizlikleri göstermektedir. Buradan etkisi büyük olan bağımsız değişkenler belirlenerek onun azaltılması yoluna gidilebilir. Bu çalışmada deneyler sürekli rejimde gerçekleştirilmiş olup, deney süresince havanın sıcaklığı, hızı, bağıl nemi, basınç

düşüşleri, zencefilin kütlesi ve nem içerikleri ölçülmüştür. Hataya yol açan büyüklükler ile hata oranları Tablo 3’ de verilmiştir.

Tablo 3. Hata oluşturan parametreler ve hatalar (Parameters and standard uncertainties)

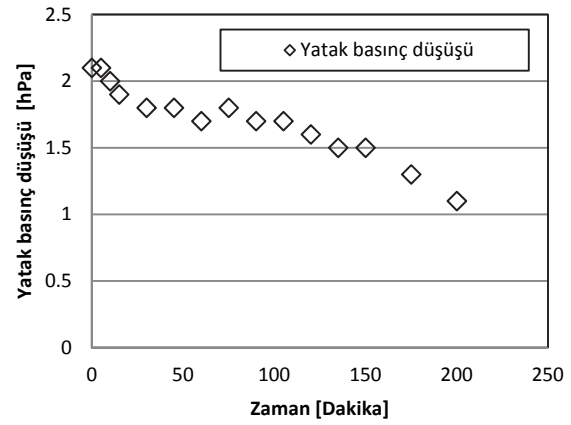
Hata oluşturan parametreler	Birim	Hata
Basınç düşüşü, ΔP	%	$\pm 2,3$
Giriş, Çıkış ve hazne sıcaklıkları	$^{\circ}C$	$\pm 0,2$
Hassas terazi	gr	$\pm 0,001$
Nem tayin cihazı	gr	$\pm 0,001$
Bağıl nem (Higrometre)	% RH	$\pm 0,1$
Zaman ölçer	dakika	$\pm 0,0003$
Anemometre	m/s	$\pm 0,1$
Zencefil dilim kalınlığı	%	± 1
Okuma hatası	%	$\pm 0,1$
Fiziksel değerlerin okunmasında yapılan hata	%	$\pm 0,1$

Deneyler 3 kez tekrarlanmış ve test süresi boyunca toplanan ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır. Elde edilen sonuçların standart sapması hesaplanıp %95 güven seviyesi için 1,95 ile çarpılarak rastgele hata belirlenmiştir. Diğer taraftan deney düzeneğinde kullanılan ve ölçümleri etkileyen elemanların üretici firma tarafından belirlenen hata oranları da sistematik hata olarak alınmış ve yapılan toplam hata belirlenmiştir. Deneylerde nem oranı, MR değerlerindeki belirsizliklerin deney şartlarına göre değiştiği tespit edilmiştir. En yüksek belirsizliğin 40 C, 3 m/s şartlarında yapılan deneylerde olduğu gözlenmiş ve bu deneyler için belirsizlik % 11,2 olarak bulunmuştur.

4.DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

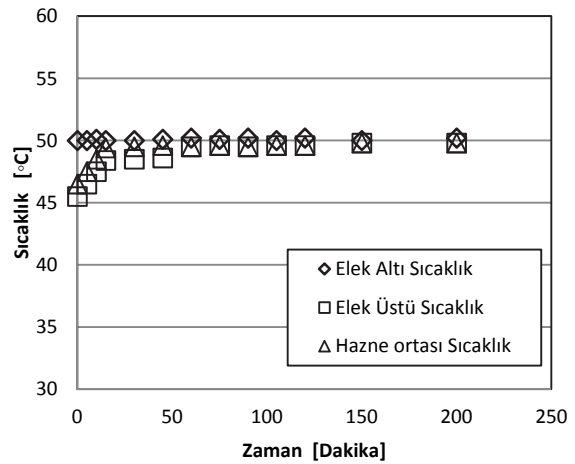
Kuruma, doğrudan doğruya ısı ve kütle transferine etki eden faktörler tarafından kontrol edilir. Bu faktörler; kurutucu havanın sıcaklığı, nemi ve hızı, kurutulacak ürüne maksimum yüzey alanı kazandıracak geometrik düzenleme (parça iriliği, şekli, yığın kalınlığı v.s.) gibi fiziksel faktörlerle, kurutulan materyalin başta bileşimi olmak üzere kendine özgü nitelikleridir. Deneylerde akışkan yatağa konulan zencefil dilimlerinin toplam kütlesi ile her bir deney için hazırlanan numunelerin boyutları aynıdır. Deneylerin amacı, zencefil dilimlerinin akışkan yatağa kurutulması esnasında hava sıcaklığının, nemi ve hava hızı etkisinin ortaya çıkarılmasıdır. Akışkan yataklı kurutucularda kurutulacak materyal yatak içerisinde akışkan haline gelir ve tüm yüzeyleri sıcak havayla temas eder. Bu nedenle bu tip kurutucular kütle ve ısı geçişinin mükemmel sağlandığı kurutma hızlarının yüksek olduğu kurutuculardır. Kurutma başlangıcında akışkan yatak içerisinde ürünün toplam kütlesi fazla olduğundan basınç düşüşü yüksektir. Şekil 3’ de

deney süresince yatak boyunda ölçülen basınç farkının zamanla değişimi görülmektedir. Ağırlık kayıpları nedeniyle deney sonlarına doğru basınç farkının giderek azaldığı saptanmıştır.



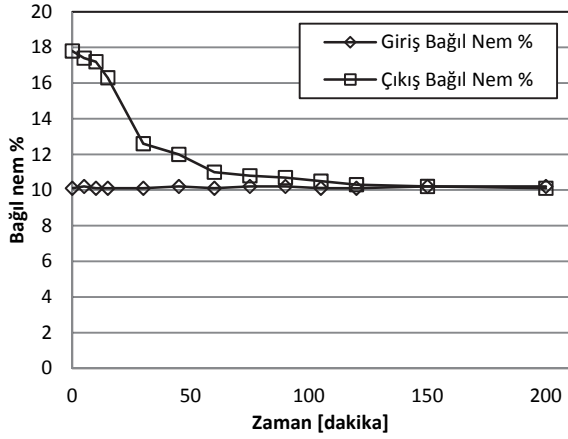
Şekil 3. Yatak basınç düşüşü (Pressure drop across the bed)

Akışkan yataklı kurutucularda ürün sürekli hareketli olduğundan sıcak hava ile karışmakta ve yatak içerisindeki sıcaklık dağılımı homojen kalmaktadır. Şekil 4 ‘de yatak içerisinde ölçülen sıcaklıklar görülmektedir. Zencefil dilimlerinin ilk nem değerleri yaklaşık yaş baza göre %90’ dır. Buharlaşan nem miktarı kurutmanın ilk 15 dakikasında yüksek kurutma hızı sebebiyle fazladır. Bu nedenle yatak içerisindeki hava sıcaklığında belirgin bir düşmeye sebep olmaktadır.



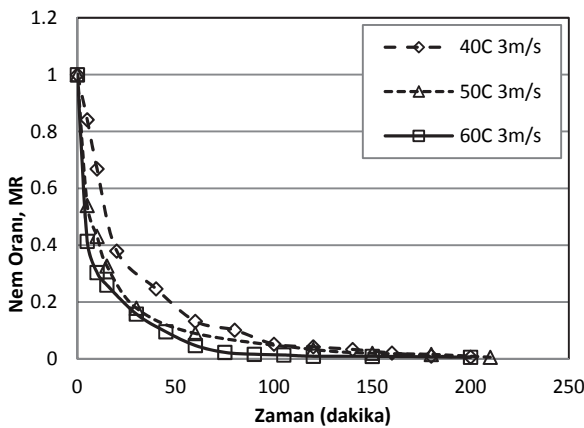
Şekil 4. Akışkan yatak kurutucu haznesinde sıcaklık değişimi (Temperature profiles in fluidized bed dryer)

Şekil 5 ‘de görüldüğü gibi deneylerde kurutucu havanın nemi sabit tutulmaktadır. Yatağın giriş ve çıkışında ölçülen nem farkının kurutmanın ilk safhalarında oldukça yüksek olduğu, daha sonraki safhalarında ise bu farkın kurutma hızının düşmesiyle giderek düştüğü ortaya çıkmıştır. Kurutma havası sıcaklığının kurumaya etkisini incelemek amacıyla, kurutma havası üç farklı (40, 50 ve 60 $^{\circ}C$) sıcaklığa ayarlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



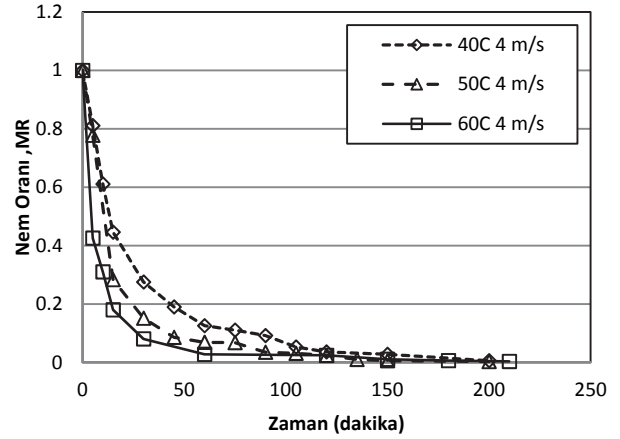
Şekil 5. Kurutucu havanın akışkan yatak haznesine girişi ve çıkışındaki bağıl nem değerleri (Inlet and outlet relative humidity values of drying air)

3 m/s hava hızında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen nem oranının zamanla değişimi aşağıda Şekil 6 'da görülmektedir. 60 °C kurutma havası ile yapılan deneylerde ilk 15 dakika sonunda nem oranı yaklaşık 0,25 değerine gelirken, 40 °C ' de yapılan deneylerde 0,25 nem oranı değerine ancak 40 dakikada ulaşabildiği görülmüştür. Akışkan yataklı kurutucuda bir diğer önemli etken kurutma havasının hızıdır. Sonraki deneylerde yine hava sıcaklıkları 40, 50 ve 60 °C 'ye ayarlanmış, hava hızı 4 m/s 'ye çıkarılmıştır. Şekil 7 'de 4 m/s ile yapılan deney sonuçları verilmiştir. Benzer olarak kurutma havası sıcaklığı arttıkça nem oranlarının azaldığı görülmüştür. Böylece akışkan yatakta kurutma havasının sıcaklığı artırıldığında kurumanın daha çabuk gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

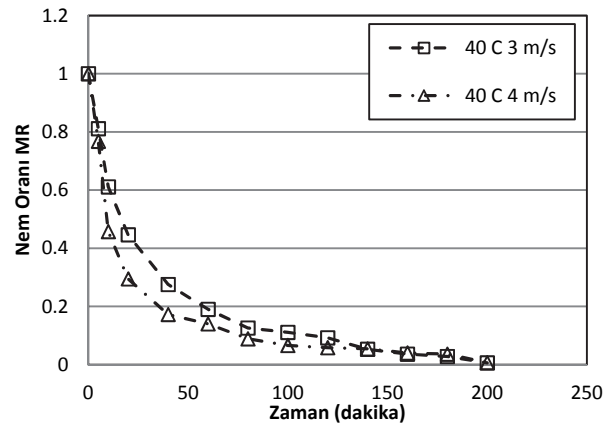


Şekil 6. Dilimlenmiş zencefile ait nem oranının zamanla değişimi (Hava hızı:3 m/s) (Moisture ratio of sliced ginger versus time (Air velocity:3 m/s))

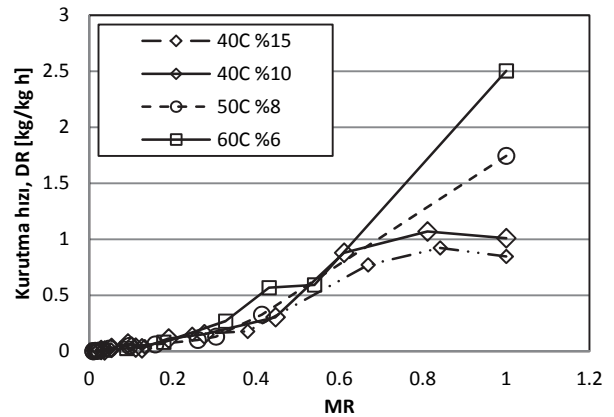
Farklı hızlarda yapılmış deney sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 8 'de verilmiştir. Hava hızı yüksek olan deney verilerine bakıldığında aynı nem oranlarına 10 dakika daha önce vardığı, 120 dakika sonra bu farkın ortadan kalktığı görülmüştür.



Şekil 7. Dilimlenmiş zencefile ait nem oranının zamanla değişimi (Hava hızı:4 m/s) (Moisture ratio of sliced ginger versus time (air velocity:4 m/s))



Şekil 8. Hava hızının kurumaya etkisi (Effect of air velocity on drying)



Şekil 9. Kurutma hızının nem içeriğine göre değişimi (Drying rate versus moisture ratio)

Deneylerde kurutucu havanın bağıl nemi sürekli ölçülmüştür. Yukarıdaki Şekil 9 'da hava hızları aynı 3 farklı sıcaklık ve farklı nemlerde yapılan deneylerin kurutma hızları görülmektedir. 40°C 'de yapılan deneylerde kurutmanın tipik olarak sabit ve azalan periyotlarda gerçekleştiği açıkça görülmüştür. Fakat 50°C ve 60°C yapılan deney tekrarlamalarına rağmen yüksek kurutma hızları sebebiyle sabit kurutma periyodu açıkça gözlenememiştir. 60°C'de yapılan

deneylerde en yüksek kurutma hızına ulaşıldığı, düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerde kurutma hızının düştüğü tespit edilmiştir. 40 °C 'de %10 ve 14 bağıl nemlerdeki kurutucu hava ile yapılan deneylerde kurutmanın ilk safhalarında kurutma hızında %15 bir fark görülmüş, daha sonraki safhalarda ise kurutma hızının eşitlendiği dikkat çekmiştir. Zencefilin efektif difüzyon katsayılarını bulmak için ln MR ile zaman grafiği çizilmiştir. Buradan elde edilen doğru denklemindeki katsayı denklem 4 'de yerine yazılarak efektif difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Tablo 4 'de farklı sıcaklık ve hava hızlarında yapılan deneyler için efektif difüzyon katsayıları ile literatürde yayınlanmış katsayılar verilmiştir. Burada deneysel veriler incelendiğinde difüzyon katsayılarının sıcaklığın ve hızın artması ile arttığı gözlenmiştir.

Tablo 4. Efektif Difüzyon katsayıları (Effective diffusion coefficients)

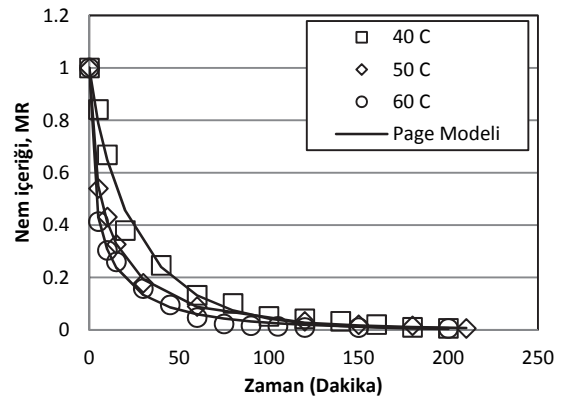
Efektif difüzyon katsayısı, D _{ef} [m ² /s]					
Deneyler			Literatürde yayınlanmış ortalama difüzyon katsayıları		
Sıcaklık °C	Hava hızı 3 m/s	Hava hızı 4 m/s	Referans		
			[26]	[27]	[28]
40	1,346.10 ⁻⁷	1,60.10 ⁻⁷	Mikrodalga kurutma	Vakum kurutma	Tepsi kurutma
50	1,765.10 ⁻⁷	1,846.10 ⁻⁷	9,17x10 ⁻¹¹	1,86 ila 4,78x10 ⁻⁸	1,31 ila 1,91x10 ⁻⁷
60	2,032.10 ⁻⁷	2,174.10 ⁻⁷			

Elde edilen difüzyon katsayıları literatürdeki mevcut veriler ile karşılaştırıldığında, mikro dalga (Ganesapillai ve ark., (2010)), vakum (Ganesapillai ve ark., (2010)) ve tepsi (Jayashree ve Visvanathan (2013)) kurutucularında kurutulmuş zencefil dilimlerine ait difüzyon katsayılarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Difüzyon katsayısının yüksek oluşu kütle transferinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Akışkan yataklı kurutucuda karışma mekanizması ve akışkanlaşma etkisiyle ısı ve kütle transferinin diğer kurutuculara oranla daha iyi oluşu deneysel olarak bir kez daha gösterilmiş, akışkan yataklı kurutucuların zencefil dilimlerinin kurutulmasında da yüksek kurutma oranlarına erişildiği görülmüştür. Ayrıca difüzyon katsayısı kurutucu ortam şartlarının dışında ürünlerin sahip olduğu neme ve ürünün şekline (karakteristik uzunluk) de bağlıdır. Deneylerde zencefil dilimlerinin ince tabakalar halinde (2 mm)

oluşu, kuruma esnasında ürünün iç direncini azaltarak kütle transferinin artmasına ve dolayısıyla efektif difüzyon katsayılarının yüksek değer almasına katkı sağlamıştır.

4.1. Matematiksel model sonuçları (Mathematical model results)

Zencefil dilimleri akışkan yataklı farklı şartlarda kurularak nem içeriğinin (MR) zamanla değişimi için deneysel veriler elde edilmiştir. Bu veriler literatürde yaygın olarak kullanılan 3 matematiksel model kullanılarak modellenmiştir. Model sonuçları Tablo 5'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi regresyon katsayısının (R²) 0,9406 ila 0,9992 arasında değiştiği, kuruma kinetiğini veren en uygun modelin en yüksek regresyon katsayısına sahip Page modeli olduğu görülmüştür. Modelin sonuçları kullanılarak teorik (tahmin) nem içerikleri hesaplanmış, deneysel veriler ile Şekil 10' da karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi deneysel verilerin teorik veriler ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.



Şekil 10. Page modelinin deneysel veriler ile karşılaştırılması (Comparison of Page model data with experimental results)

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada kurutma havasının sıcaklığı, hızı ve bağıl neminin zencefil dilimlerinin kuruma kinetiğine olan etkisi incelemek üzere, zencefil örnekleri 2 mm kalınlığında dilimlenerek akışkan yataklı kurutucuda kurutulmuştur. Deneyler farklı kurutma havası (40, 50, 60 °C) sıcaklıklarında ve

Tablo 5. Model sonuçları (Model results)

Model	Deneyler	Model sabitleri		SSE	RMSE	R ²		
Newton	40 °C	k =	0,03841	0,01582	0,03631	0,989		
	50 °C	k =	0,08256	0,03373	0,06122	0,9637		
	60 °C	k =	0,128	0,0559	0,06825	0,9406		
Page	40 °C	k =	0,05915	n =	0,8631	0,01064	0,0311	0,9926
	50 °C	k =	0,2419	n =	0,5639	0,000715	0,00945	0,9992
	60 °C	k =	0,3843	n =	0,4869	0,002518	0,01513	0,9973
Henderson ve Pabis	40 °C	a =	0,9863	k =	0,03757	0,01554	0,03759	0,9892
	50 °C	a =	0,9391	k =	0,0752	0,02979	0,06102	0,9679
	60 °C	a =	0,9439	k =	0,1108	0,05289	0,06934	0,9438

farklı (3 ve 4 m/s) hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma esnasında belli zaman aralıklarında alınan numunelerin kuru baza göre nem değerleri belirlenmiş ve nem oranları kullanılarak difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Deneylerde kurutma havası sıcaklığının ve neminin kuruma hızında oldukça etkili bir parametre olduğu, artan sıcaklık ve azalan bağıl nem ile kuruma hızının arttığı görülmüştür. Difüzyon katsayıları $1,346 \times 10^{-7}$ ila $2,174 \times 10^{-7}$ m²/s değerleri arasında bulunmuş, literatürdeki mevcut değerler ile karşılaştırıldığında yüksek olduğu görülmüştür. Deneysel veriler literatürde var olan ince tabaka kuruma kinetiği modelleri ile karşılaştırılmış, % 99 regresyon katsayısı (R^2) ile en uygun modelin Page modeli olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışma, yüksek nem içeriğine sahip zencefil gibi bir gıda ürününün akışkan yataklı kurutucular kullanılarak yüksek kurutma hızlarında kurutulabileceğini göstermiştir.

SİMGELER (NOMENCLATURE)

D	Difüzyon katsayısı, m ² /s
L	Kalınlık, m
m	Kütle, kg
M	Nem içeriği, %
MR	Nem oranı, %
n	Katsayı
R	Kurutma hızı (oranı)
RH	Bağıl nem, %
T	Sıcaklık, °C
V	Hız, m/s
π	Pi sayısı
Alt simgeler	
0	Başlangıç
e	Denge
kb	Kuru baz
t	Zaman
yb	Yaş baz

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Mujumdar, A.S., **Handbook of Industrial Drying**, Marcel Dekker, New York, A.B.D., 1995.
- Pugsley, T., Chaplin, G., Khanna, P., “Application of Advanced Measurement Techniques to Conical Lab-Scale Fluidized Bed Dryers Containing Pharmaceutical Granule”, **Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing**, Cilt 85, No C3, 273–283, 2007.
- Vervloet, D., Nijenhuis, J., Ommen, J.R. Van, “Monitoring A Lab-Scale Fluidized Bed Dryer: A Comparison Between Pressure Transducers, Passive Acoustic Emissions and Vibration Measurements”, **Powder Technology**, Cilt 197, 36–348, 2010.
- Wormsbecker, M., Ommen, R. Van, Nijenhuis, J., Tanfara, H., c, Pugsley, T., “The Influence of Vessel Geometry on Fluidized Bed Dryer Hydrodynamics”, **Powder Technology**, Cilt 194, 115–125, 2009.
- Bizmark, N., Mostoufi, N., Sotudeh-Gharebagh, R., Ehsani, H., “Sequential Modeling of Fluidized Bed Paddy Dryer”, **Journal of Food Engineering**, Cilt 101, 303–308, 2010.
- Izadifar, M., Mowla, D., “Simulation of a Cross-Flow Continuous Fluidized Bed Dryer For Paddy Rice”, **Journal of Food Engineering**, Cilt 58, 325–329, 2003.
- Assari, M.R., Basirat Tabrizi, H., Saffar-Avval, M., “Numerical Simulation of Fluid Bed Drying Based on Two-Fluid Model and Experimental Validation”, **Applied Thermal Engineering**, Cilt 27, 422–429, 2007.
- Fyhr, C., Kemp, I. C., “Mathematical Modelling of Batch and Continuous Well-Mixed Fluidised Bed Dryers”, **Chemical Engineering and Processing**, Cilt 38, 11–18, 1999.
- Lai, F.S., Chen, Y., Fan, L.T., “Modelling and Simulation of a Continuous Fluidized-Bed Dryer” **Chemical Engineering Science**, Cilt 41, No 9, 2419-2430, 1986.
- Madhiyanon, T., Techaprasan, A., Soponronnarit, S., “Mathematical Models Based on Heat Transfer and Coupled Heat and Mass Transfers for Rapid High Temperature Treatment in Fluidized Bed: Application for Grain Heat Disinfestation”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 49, 2277–2290, 2006.
- Palancz, B., “A Mathematical Model for Continuous Fluidized Bed Drying”, **Chemical Engineering Science**, Cilt 38, No 7, 1045-1059, 1983.
- Srinivasakannan, C., ve Balsubramaniam, N., “A Simplified Model for The Drying of Solids in Batch Fluidised Beds”, **Braz. J. Chem. Eng.**, Cilt 19, 293–298, 2002.
- Zare, D., Chen, G., “Evaluation of a Simulation Model in Predicting the Drying Parameters for Deep-Bed Paddy Drying”, **Computers and Electronics in Agriculture**, Cilt 68, 78–87, 2009.
- Geng, F., Xu, D., Yuana, Z., Yanb, Y., Luob, D., Wang, H., Li, B., Chyangc, C.S., “Numerical Simulation on Fluidization Characteristics of Tobacco Particles in Fluidized Bed Dryers”, **Chemical Engineering Journal**, Cilt 150, 581–592, 2009.
- Meziane, S., “Drying Kinetics of Olive Pomace in a Fluidized Bed Dryer”, **Energy Conversion and Management**, Cilt 52, 1644–1649, 2011.
- Białobrzewski, I., Zielin’ska, M., Mujumdar, A.S., Markowski, M., “Heat and Mass Transfer During Drying of a Bed of Shrinking Particles – Simulation for Carrot Cubes Dried in a Spout-Fluidized-Bed Drier”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 51, 4704–4716, 2008.

17. Zanoelo, E., F., “A Theoretical and Experimental Study of Simultaneous Heat and Mass Transport Resistances in a Shallow Fluidized Bed Dryer of Mate Leaves”, **Chemical Engineering and Processing**, Cilt 46, 1365–1375, 2007.
18. Niamnuy, C., ve Devahastin, S., “Drying Kinetics and Quality of Coconut Dried in a Fluidized Bed Dryer”, **Chemical Engineering and Processing**, Cilt 46, 1365–1375, 2007.
19. Bayrock, D., ve Ingledew, W. M., “Fluidized Bed Drying of Baker’s Yeast: Moisture Levels, Drying Rates, and Viability Changes During Drying”, **Food Research International**, Cilt 30, No 6, 407-415, 1997.
20. Tasirin, S.M., Kamarudin, S.K., Jaafar, K., Lee, K.F., “The Drying Kinetics of Bird’s Chillies in a Fluidized Bed Dryer”, **Journal of Food Engineering**, Cilt 79, 695–705, 2007.
21. Topuz, A., Gur, M., Gul M. Z., “An Experimental and Numerical Study of Fluidized Bed Drying of Hazelnuts”, **Applied Thermal Engineering**, Cilt 24, 1535–1547, 2004.
22. Balladin, D.A., Headley, O., Chang-Yen, I., McGaw, D.R., “High Pressure Liquid Chromatographic Analysis of The Main Pungent Principles of Solar Dried West Indian Ginger (Zingiber Officinale Roscoe)”, **Renewable Energy**, Cilt 13, No 4, 531–536, 1998.
23. Schweiggert, U., Hofmann, S., Reichel, M., Schieber, A., Carle, R., “Enzyme-assisted liquefaction of ginger rhizomes (Zingiber officinale Rosc.) for the production of spray-dried and paste-like ginger condiments”, **Journal of Food Engineering**, Cilt 84, 28–38, 2008.
24. Alakali, J., Irtwange, S.V., Satimehin, A., “Moisture adsorption characteristics of ginger slices”, **Ciencia e Tecnologia de Alimentos**, Cilt 29, No 1, 155-164, 2009.
25. Phoungchandang, S., Saentaweesuk, S., “Effect of Two Stage, Tray and Heat Pump Assisted-Dehumidified Drying on Drying Characteristics and Qualities of Dried Ginger”, **Food and Bioproducts Processing**, Cilt 89, No 4, 429-437, 2011.
26. Ganesapillai, M., Miranda, L. R., Reddy, T., Bruno, M., Singh, A., “Modeling, Characterization, and Evaluation of Efficiency and Drying Indices for Microwave Drying of Zingiber Officinale and Curcuma Mangga”, **Asia-Pac. J. Chem. Eng.**, Cilt 6, 912–920, 2011.
27. Thorat, I. D., Mohapatra, D., Sutar, R. F., Kapdi, S. S., Jagtap, D.D., “Mathematical Modeling and Experimental Study on Thin-Layer Vacuum Drying of Ginger (Zingiber Officinale R.) Slices”, **Food Bioprocess Technol.**, Cilt 5, 1379–1383, 2012.
28. Jayashree, E., Visvanthan, R., “Studies on Thin Layer Drying Characteristics of Ginger (Zingiber Officinale) in a Mechanical Tray Drier”, **Journal of Plantation Crops**, **Journal of Spices and Aromatic Crops**, Cilt 41, No 1, 86-90, 2013.
29. Akpınar, E., Midilli, A. ve Bicer, Y., “Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling”, **Energy Conversion Management**, Cilt 44, 1689–1705, 2003.
30. Doymaz, I., “Thin-layer drying behavior of mint leaves”, **J. Food Eng.**, Cilt 74, 370–375, 2006.
31. Crank, J., **The Mathematics of Diffusion**, Oxford University Press, Oxford, New York, A.B.D. 1975.
32. Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G., Wijesinghe, B., “Influence of Shapes of Selected Vegetable Materials on Drying Kinetics During Fluidized Bed Drying”, **Journal of Food Engineering**, Cilt 58, 277–283, 2007.
33. Holman, J.P., **Experimental Methods for Engineers**, (Sixth Edition) McGraw-Hill, New York, 1994.

