

Üzümlerin mikrodalga kurutma eğrilerinin ve sıcaklık değişiminin matematiksel modellenmesi

Gökhan BİNGÖL*, Y. Onur DEVRES

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, Türkiye'nin önemli ihracat ürünlerinden olan üzümün kuruması esnasında kararmaya neden olan Polifenol Oksidaz enziminin, çocuklarda ve yaşlılarda astım, isilik ve mide rahatsızlıklarına neden olabilen sülfid kullanılmadan inaktive edilmesi ve aynı zamanda da kuruma hızının artırılması amaçlanmıştır. Mikrodalga yardımcı konvektif kurutma, konvansiyonel kurutma yöntemlerine göre daha hızlı olduğundan ve gıda maddesinde bulunan dipolar su molekülleri ile etkileşebilmesinden dolayı etkin bir kurutma işlemine olanak sağlamaktadır. Gıda içindeki sıcaklık artışının modellenmesi mikrodalga ısıtma ve kurutma işleminin kontrolü açısından önem arz etmektedir. Kurutma hızını daha da arttırmak ve iyi bir son ürün elde edebilmek amacıyla üzümler kurutma işleminden önce 40°C sıcaklığındaki etil oleat ve potasyum karbonat içeren çözelti içine 3 dakika süreyle daldırılmış veya 90°C'deki buharla 140 saniye süreyle haşlanarak önışlenmişlerdir. Üzümler önışlemlerden sonra mikrodalga yardımcı konvektif kurutucuda 0.25 W/g başlangıç mikrodalga güç oranı ve 60°C sıcaklığında ortalama 1.8 m/s hızındaki hava ile kurutulmuşlardır. Matlab programının Eğri Yaklaştırma (CFT) araç kutusu kullanılarak kuruma eğrileri literatürdeki ince tabaka modelleri ile tanımlanmışlardır. Kuruma esnasındaki sıcaklık değişimleri fiber optik prob kullanılarak ölçülmüş ve Matlab programının Kısmi Diferansiyel Denklemler (PDE) araç kutusu kullanılarak matematiksel olarak modellenmiş ve simüle edilmiştir. Matematiksel modelde mikrodalga enerjisi hacimsel ısı üretim kaynağı olarak kabul edilmiş ve kuruma esnasında meydana gelen ve ince tabaka modelleriyle hesaplanan nem kaybı, evaporatif ısı kaybı olarak modele dahil edilmiştir. Sonuçları literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırdığımızda, mühendislik açısından gerekli yakınsaklık sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga kurutma, üzüm, modelleme, Matlab, eğri yaklaştırma.

*Yazışmaların yapılacağı yazar Gökhan BİNGÖL. bingolgo@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 60 13.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Farklı önışlemlerin Thompson çekirdeksiz üzümlerinin mikrodalga yardımcı konvektif ve yalnız konvektif kurutulması sırasında kurutma ve renk kinetiği üzerine olan etkilerinin incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 14.02.2008 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 28.05.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Modeling drying curves and temperature profiles of microwave-assisted convective drying of grapes

Extended abstract

Raisin is an important export product of Turkey and darkens during drying due to the enzyme Polyphenol Oxidase (PPO). To prevent browning reactions, these products are sulfited. Ingestion of sulfites can lead to asthmatic attacks, rashes and abdominal upset especially for elderly people and children. For these reasons sulfites are either prohibited or subject to very low limits in USA. Thompson seedless grapes were used in this study. Grapes were dipped into 2% ethyl oleate (v/v) and 5% potassium carbonate solution (m/v) at 40°C for 3 minutes and were blanched with steam at 90°C for 140 seconds. The aims of these pretreatments were to accelerate drying rate and to inactivate PPO without the use of sulphur dioxide. Pretreated grapes were dried in a microwave-assisted convective dryer. Center temperature profile of grapes were obtained using a fiber optic probe. It was observed that 0.25 W/g initial power ratio combined with 60°C convective air produced better end-product thus in this study drying curves and temperature profiles were modeled at this selected condition.

The thin layer drying models were used to describe the drying curves of both pretreated and untreated grapes. Using curve fitting tool (CFT) of Matlab software, non-linear regression analysis were performed to thin layer models. Regression coefficient (R^2), Sum of Squares Due to Error (SSE) and Root Mean Square Error (RMSE) were adopted to evaluate the goodness of fit in each model. Among the thin layer models, drying curves of microwave-assisted drying of both untreated and pretreated grapes at 0.25 W/g initial power ratio and 60°C convective air temperature could be accurately described by all of the applied thin-layer models. For all cases the R^2 were greater than 0.97 and SSE and RMSE were close to zero. In order to compare the moisture loss with time, derivative of logarithmic model with respect to time was taken. It was found that moisture loss of untreated and chemically dipped grapes could be considered as same however, moisture loss of steam blanched grapes were 2.30 times higher than untreated and chemically dipped grapes until 300 minutes drying.

It is critical to have knowledge of dielectric properties, relative dielectric constant and relative dielec-

tric loss factor, of materials which are the most important physical properties in microwave heating. In this study dielectric properties of grapes were calculated using descriptive equations for fruits and vegetables. In these equations dielectric properties of materials were related with temperature and moisture content. Within the temperature range of this study, temperature had negligible effect on the values of dielectric properties of grapes. Thus during microwave-assisted convective drying of grapes, only moisture dependent dielectric properties were taken into consideration. Electric field in the grapes was calculated through calorimetry. Since the penetration depth of microwave energy was less than radius of grape, integral average of electric field within the grape was calculated. The thermophysical properties, density, specific heat and heat conduction coefficient of grapes were also calculated using descriptive equations. The results were in close agreement with the literature.

Experimental center temperature of grapes was modeled using a one dimensional heat equation which uses microwave energy as a heat generation source term. The main assumptions to solve this equation were that the initial temperature and moisture content of grapes were uniform, both heat and moisture flows in radial direction and heat losses due to radiation were negligible. For simulations Partial Differential Equation Toolbox of Matlab was used. Generic Scalar equation type was selected and the partial differential equation was specified to be parabolic type. Since Matlab requires boundary conditions to be specified to solve the time and space dependent differential equation, Neumann boundary condition was selected due to constant heat flux provided by convective air with a velocity of 1.8 m/s and temperature at 60°C. Since Thompson seedless grapes could be approximated to cylinders, both the boundary conditions and the differential equation were expressed in cylindrical coordinates.

It was found that the maximum difference between experimental and simulation values were 4°C was during initial heating up period. However, after then the difference was less than 1°C. Since the phase changes of grapes were not incorporated into the model, sudden increase in temperature below 56% moisture content could not be predicted by the proposed simulation model.

Keywords: Microwave drying, grapes, modeling, Matlab, curve fitting.

Giriş

Üzüm dünyada en çok yetiştirilen (8 026 000 ton) meyveler arasındadır (Baydar vd., 2004). *Vitis vinifera*'nın bir çeşidi olan Thompson çerkeksiz üzümü özellikle kuru üzüm eldesinde kullanılmaktadır (Pirog, 2005). Türkiye'de 1995 ve 2006 yılları arasında, yıllık ortalama 234 000 ton kuru üzüm üretilmiş olup, başta Almanya, Hollanda ve İngiltere olmak üzere ortalama 264.47 milyon dolarlık ihracat yapılmıştır (Özden, 2007).

Kurutma veya dehidrasyon, mikrobiyal bozulmaların ve kimyasal reaksiyonların yavaşlatılması veya durdurulması amacıyla katı maddeden su gibi uçucu sıvının uzaklaştırılması işlemidir (Geankoplis, 1993). Kurutma işlemi gıdanın raf ömrünü uzatmakla birlikte, nakliye sırasında hacim ve ağırlık azalması avantajlarını da beraberinde getirmektedir (Cohen ve Yang, 1995).

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun iyonize etmeyen 300 MHz ile 300 GHz bölgesinde yer almaktadır (Saltiel ve Datta, 1998). Malzemelerin mikrodalga ile ısıtılması, iletim ve taşınım gibi yüzeyden başlayan bir ısı geçişine gereksinim duymadığından, mikrodalgalar nemli cisim içinde hızlı bir şekilde yayılır ve hacimsel ısıtma gerçekleştirerek konvansiyonel kurutma işleminin karakteristik özelliklerini değiştirir (Metaxas ve Meredith, 1988). Mikrodalga ısıtmanın tek düzeliğinin sağlanabilmesi ve nem transferi üzerinde daha fazla kontrolün elde edilebilmesi için, mikrodalga enerjisi genellikle başta sıcak hava olmak üzere diğer ısıtma türleriyle birleştirilmektedir (Datta vd., 2005).

Schiffman (2001) mikrodalga enerjisinin kurutma işlemi için üç farklı kullanımını önermiştir:

- 1) Mikrodalga enerjisinin, sıcak havanın kurutma üzerindeki etkinliğinin azaldığı ve kuruma işleminin uzun sürdüğü azalan kuruma hızı evresinde kullanımı.
- 2) Mikrodalga enerjisinin düşük seviyelerde kurutma işlemi boyunca kullanımı.
- 3) Sıcak hava ile kurutmadan önce, ürünün kurutma sıcaklığına hızlı bir şekilde çıkartılması için mikrodalga enerjisinin prosesin başlangıç aşamalarında kullanımı.

Bu çalışmada ikinci yöntem tercih edilmiş ve mikrodalga enerjisinden tüm kurutma boyunca düşük seviyelerde faydalanılmıştır.

İnce tabaka modelleri

Kuruma eğrilerini tanımlayan ince tabaka modelleri, *teorik*, *kısmi-teorik* ve *ampirik* olmak üzere üçe ayrılmaktadırlar (Sharaf-Eldeen ve Hamdy, 1979). Teorik modeller nem transferinin iç direnç mekanizmaları ile kontrolünü temel alırken, diğer modeller dış kütsel dirençleri baz almaktadırlar. Ayrıca kısmi-teorik modeller Fick kanununun çözümü ile elde edilirken, ampirik modeller nem içeriği ve zaman arasındaki istatistiksel ilişkilerden türetilmektedir (Babalıs vd., 2006).

Lewis (1921) tarafından önerilen ve Newton'un soğuma kanununa benzeyen temel eşitlik, farklı taşınım olaylarının birlikte olan etkisinin ifadesi için k gibi tek bir kuruma sabiti içermektedir.

$$\frac{dM}{dt} = -k \cdot (M - M_{eq}) \quad (1)$$

Kuruma eğrilerini modellemek için farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen eşitlikler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Deneysel kurutma verilerini tanımlayan ince tabaka modelleri

| Model | Matematiksel İfade | Referans |
|--------------------|---|--------------------------|
| Lewis | $MR = \exp(-k \cdot t)$ | Lewis, 1921 |
| Page | $MR = \exp(-k_1 \cdot t^n)$ | Page, 1949 |
| Henderson ve Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ | Henderson ve Pabis, 1961 |
| Logaritmik | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$ | Yaldız vd., 2001 |
| Midilli vd. | $MR = a \cdot \exp(-k_1 \cdot t^n) + b$ | Midilli vd., 2002 |

Biyolojik malzemelerin dielektrik özellikleri
Dielektrik özellikler, malzemelerin radyo dalgası ve mikrodalga ısınma özelliklerini etkileyen ve elektromanyetik dalga ile etkileşimlerini tanımlayan en önemli fiziksel parametredir (Tang, 2005; Ryyanen, 2002).

Malzemelerin mikrodalga ile etkileşimleri, elektrik ve manyetik enerjinin malzemede depolanmasını ve ısı açığa çıkmasını ifade eden kompleks permittivite ve manyetik geçirgenlik ile karakterize edilebilmektedir (Dibben, 2001). Malzemelerin kompleks permittivite veya eşdeğer ifadesi ile kompleks dielektrik sabitleri 2 numaralı eşitlik ile ifade edilebilir:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de; ε' , malzemenin bağıl dielektrik sabiti olup, elektrik enerjisi depolama yeteneğini göstermekte; ε'' ise bağıl dielektrik kayıp faktörü olup, malzemenin elektrik enerjisini ısı enerjisine çevirebilme kapasitesini ifade etmektedir (Metaxas ve Meredith, 1988). Biyolojik malzemelerin manyetik geçirgenliği serbest uzayınki ile aynı olduğundan elektromanyetik enerjinin sadece elektrik enerjisi kısmını yutmaktadırlar (Ryynanen, 2002).

Elektromanyetik dalganın malzeme içinde ilerlerken elektrik alan kuvvetindeki azalma 3 numaralı eşitlik ile tanımlanmaktadır:

$$E = E_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (3)$$

Elektrik alanının malzeme içindeki azalma derecesi, malzemenin bir özelliği olan zayıflama "attenuation" faktörü ile 4 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \varepsilon' \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

λ_0 elektromanyetik dalganın serbest uzaydaki dalga boyunu göstermektedir.

Mikrodalgaların malzemenin yüzeyi ile temas tan itibaren cisim içinde ilerlerken enerjisini %37'ye düşüren uzaklığa penetrasyon derinliği adı verilmektedir ve 5 numaralı eşitlik ile tanımlanmaktadır:

$$d_p = \frac{1}{2\alpha} \quad (5)$$

Biyolojik malzemelerin mikrodalga ile ısınması

Mikrodalga fırınların magnetronu pozitif ve negatif kutupların sürekli olarak hızlı bir şekilde yön değiştirdiği elektromanyetik bir alan oluşturur. Malzemeye iletilen elektromanyetik enerji dipolar moleküller ve tuzların pozitif ve negatif iyonları ile etkileşime girer. Alan değişimine reaksiyon olarak, hızlı bir moleküler rotasyon veya titreşim oluşur ve bunun sonucu olarak da moleküller arası sürtünme ile ısı ortaya çıkar (Nijhuis vd., 1998). Isı transferi göz önüne alınmaksızın açığa çıkan ısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f \cdot E^2 \cdot \varepsilon'' \quad (6)$$

Eşitlikte, malzemenin yoğunluğu ρ (kg/m^3), özgül ısısı C (J/kgK); elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddeti E (V/m), frekansı f (Hz) ile gösterilmiştir.

Datta (2001) tarafından, malzeme içindeki sıcaklık profilinin hesaplanabilmesi için mikrodalga enerjinin hacimsel ısı üretimi olarak ele alındığı ısı transferini tek boyutta inceleyen aşağıdaki eşitlik önerilmiştir:

$$\underbrace{\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{enerji birikim oranı}} + \underbrace{\rho \cdot C \cdot u \cdot \frac{\partial T}{\partial x}}_{\text{konvektif enerji akışı}} = \underbrace{\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}_{\text{difüz enerji}} + \underbrace{\dot{Q}}_{\text{mikrodalga ısı üretimi}} - \underbrace{m_w \cdot h_{fg}}_{\text{buharlaşma enerjisi}} \quad (7)$$

Eşitlikte, hacimsel ısı üretimi Q (W/m^3), t anında ve x uzaklığındaki sıcaklık T , sistem sınırlarına giren akışın hızı u (m/s) ve malzemenin ısı iletkenliği λ (W/mK) ile gösterilmiştir.

Mikrodalgaların gıda işlemede kullanımı, gıda içindeki sıcaklık dağılımının ve gıdanın mikrodalga ile etkileşiminin tam olarak anlaşılması ile daha da artacaktır (Tang vd., 2002).

Materyal ve yöntem

Çalışmada, kurutma amacıyla çapları 18.83 ± 1.98 mm arasında ve nem yüzdeleri genellikle $\%80.25 \pm 1.91$ arasında değişen Thompson çekirdeksiz üzümleri kullanılmıştır.

Üzümlerin ortalama fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Thompson çekirdeksiz üzümünün fiziksel özellikleri

| Nem | Karbohidrat | Protein | Yağ | Kül |
|--------|-------------|---------|-------|-------|
| 80.54% | 18.10% | 0.72% | 0.16% | 0.48% |

Mikrodalga ısıtmanın modellenmesi amacıyla kullanılan üzümün çapı 20.62 mm ve uzunluğu 28.5 mm’dir. Üzümlerin nem oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak normalize edilmiştir:

$$MR = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (8)$$

Burada M(t) herhangi bir t anında üzümün kuru baz üzerinden nem değeri, M_0 kuru baz üzerinden başlangıç nem değeri ve M_{eq} ise kuru baz üzerinden denge nem değeridir. Üzümün denge nem oranı mikrodalga kurutma için sıfır olarak kabul edilmiştir (McMinn, 2006; Soysal, 2004).

Üzümün yoğunluğu (ρ), özgül ısısı (C) ve ısı iletim katsayısı (λ) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve 1077.932 kg/m³, 3.395 kJ/kgK ve 0.479 W/mK olarak bulunmuştur.

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\frac{x_C}{1600} + \frac{x_P}{1320} + \frac{x_F}{920} + \frac{x_A}{2420} + \frac{x_W}{1000}} \quad (9)$$

$$C = 1.6x_C + 2.0x_P + 2.0x_F + 1.1x_A + 4.2x_W \quad (10)$$

$$\lambda = \lambda_{su} \cdot \frac{C_{üzüm}}{C_{su}} \quad (11)$$

Eşitlik (9) ve (10)’da; x, bileşenin kütle fraksiyonunu ve C, P, F, A, W alt indisleri ise sırasıyla karbohidrat, protein, yağ, kül ve suyu göstermektedir.

Mikrodalga fırın ve sıcaklık ölçümü

Çalışmada kullanılan mikrodalga fırın, 2450 MHz frekasında, 0-2500 W arasında değişken sürekli güç sağlayabilen bir magnetrona sahiptir (GAE Inc., Modesto, CA). Magnetron fırın boşluğuna WR-284 dalga kılavuzu ile bağlanmıştır. Fırının

boyutları 0.88 m ×0.88 m×0.88 m olup, 30 ve 35 rpm hızlarında çalışan iki tane “mode stirrer” a sahiptir. Üzümün merkez, yüzey ve havanın sıcaklığını ölçmek için 3 tane fiber optik (Model 790 Thermometry System, Luxtron Corporation, Santa Clara, CA) kullanılmıştır.

Önişleme

Önişleme yöntemi olarak üzüm ya buhar ile haşlanmış ya da çözeltiye daldırılmışlardır. Bu amaçla üzüm 90°C’deki buhar ile 140 saniye haşlanmış veya 40°C’de %2 etil oleat (hacim/hacim) ve %5 potasyum karbonat (kütle/hacim) içeren çözeltiye 3 dakika süreyle daldırılmışlardır. Hiç önişlem görmemiş üzüm kontrol örnekleri olarak adlandırılmıştır.

İstatistiksel analiz

Deneysel kurutma verileri, Matlab (Natick, Massachusetts, ABD) yazılımının Eğri Yaklaşdırma (“Curve Fitting”) araç kutusu kullanılarak Tablo 1’de verilen eşitlikler ile modellenmiştir. Eğri yaklaşırma kalitesi her bir model için 3 parametre kullanılarak incelenmiştir: R² (Regresyon Katsayısı), SSE (Hataların karelerinin toplamı) ve RMSE (Hataların karelerinin karekök ortalaması). SSE ve RMSE aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{predict,i})^2 \quad (12)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{predict,i})^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

Eşitlik (12) ve (13)’de $MR_{exp,i}$ deneysel nem oranı, $MR_{predict,i}$ matematiksel model ile hesaplanan nem oranı ve N ise deney sayısını göstermektedir.

Sıcaklık profillerinin modellenmesi

Simulasyon ve modelleme için Matlab yazılımının Kısmi Diferansiyel Araç Kutusu (PDE) kullanılmıştır. Modelleme için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Üzümün başlangıç sıcaklığı homojendir.
- Üzümün başlangıç nemi homojendir.

- iii. Isı ve kütle akışı radyal yönde gerçekleşmektedir.
- iv. Işınımından kaynaklanan ısı kayıpları ihmal edilebilir seviyededir.

Parabolik diferansiyel eşitlik aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır:

$$d \cdot u' + \text{div}(c \cdot \text{grad}(u)) + a \cdot u = f \quad (14)$$

Burada u zaman ve mekan ile değişebilen bir özelliktir. Silindirik koordinatlarda zamana bağlı ısı transfer denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} = \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

Eşitlik (15)'de T sıcaklığı (°C), t zamanı (s), r yarıçapı (m), λ ısı iletkenlik katsayısını (W/mK), ρ yoğunluğu (kg/m³), C özgül ısıyı (J/kgK) ve \dot{q} ısı üretimini (W/m³) göstermektedir. Eşitlik (15)'i Matlab ile çözebilmek için eşitlik (14)'deki d, c, a ve f sabitleri $\rho \cdot C$, $\lambda \cdot r$, sıfır ve \dot{q} olarak alınmıştır.

Matlab, eşitlik (14)'ün çözülebilmesi için sınır koşullarının tanımlanmasını gerektirir. Bu çalışmada seçilen Neumann sınır koşulu Matlab tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$n \cdot c \cdot \text{grad}(u) + q \cdot u = g \quad (16)$$

Silindirik koordinatlarda sınır koşulları ise:

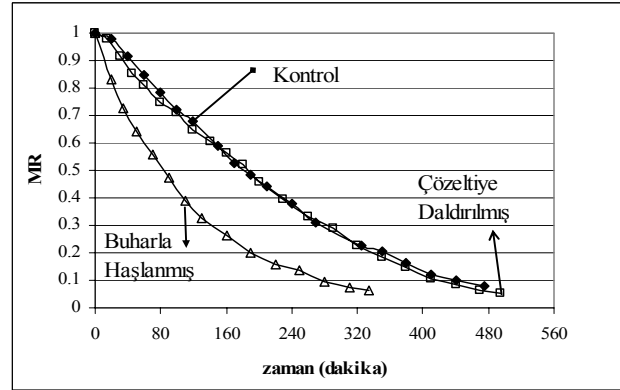
$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = h \cdot (T - T_{\infty}) \quad (17)$$

Eşitlik (16)'daki c sabiti $\lambda \cdot r$ tanımlandığından, eşitlik (17), r ile çarpılmıştır. Eşitlik (16)'yı eşitlik (17) ile çözebilmek için q ve g, h·r ve h·T_∞·r olarak alınmıştır. Burada h, T_∞ dış ortamın konvektif ısı transfer katsayısı ve sıcaklığını göstermektedir.

Deneysel çalışma sonuçları İnce tabaka modelleri

0.25 W/g mikrodalga güç oranı kullanılarak 60°C'deki konvektif hava ile kurutulan önışlen-

miş veya hiç işlem görmemiş üzümlerin kuruma eğrileri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 0.25 W/g başlangıç mikrodalga güç oranı ile 60°C konvektif hava ile kurutulan kontrol ve önışlenmiş üzümlerin kuruma eğrileri

Şekil 1'den de görüleceği gibi, kontrol ile çözeltilmiş üzümlerin kuruma eğrileri arasında belirgin bir fark olmazken, buharla haşlanan üzümler farklı bir şekilde hızlı kurumuşlardır.

Şekil 1'de gösterilen kuruma eğrileri Tablo 1'de verilen ince tabaka modelleriyle doğru bir biçimde tanımlanmıştır. Eğri uydurma metodu ile hesaplanan katsayılar Tablo 3'de her bir model için verilmiştir. Logaritmik modelin a ve k sabitleri kontrol ve çözeltilmiş üzümler için eşit olarak alınabilmektedir ki bu da Şekil 1'de çakışan eğriler olarak görülmektedir.

Tablo 3. 0.25 W/g başlangıç mikrodalga güç oranı ile 60°C konvektif hava ile kurutulan kontrol ve önışlenmiş üzümlerin ince tabaka model katsayıları

| Model | Kontrol | Buhar ile haşlanan | Çözeltilmiş daldırma |
|--------------------|--|---|---|
| Lewis | k=0.004 | k=0.008 | k=0.004 |
| Page | k ₁ =0.000 n=1.331 | k ₁ =0.009 n=0.968 | k ₁ =0.001 n=1.281 |
| Henderson ve Pabis | a=1.084 k=0.005 | a=0.989 k=0.008 | a=1.062 k=0.005 |
| Logaritmik | a=1.346 k=0.003 c=-0.304 | a=0.983 k=0.008 c=0.007 | a=1.347 k=0.003 c=-0.330 |
| Midilli vd. | a=1.009 k ₁ =0.001 n=1.260 b ₂ =-0.00 | a=0.998 k ₁ =0.010 n=0.961 b ₂ =-0.000 | a=1.001 k ₁ =0.002 n=1.119 b ₂ =-0.000 |

Tablo 1'de verilen logaritmik modelin zamana göre türevi alınır:

$$\frac{dMR}{dt} = -a \cdot k \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (18)$$

Eşitlik (18) kullanılarak 300 dakikalık kurutma süresi için buhar ile haşlanmış üzümün nem kaybı, çözeltiye daldırılmış üzümün nem kaybı ile oranlandığında sonuç 2.30 çıkmaktadır. Bu ise buharla haşlanan üzümün, 300 dakika boyunca çözeltiye daldırılan üzümünden ortalama 2.30 kat daha hızlı kuruduğunu göstermektedir.

Tablo 3'te verilen katsayıların eğri uydurma istatistikleri Tablo 4'te verilmiştir:

Tablo 4. 0.25 W/g başlangıç mikrodalga güç oranı ile 60°C konvektif hava ile kurutulan kontrol ve önışlenmiş üzümün ince tabaka model eğri uydurma istatistikleri

| Model | Kontrol | Buhar ile Haşlanan | Çözeltiye Daldırma |
|--------------------|---|---|---|
| Lewis | R ² =0.973 RMSE=0.05 SSE=0.046 | R ² =0.999 RMSE=0.00 SSE=0.001 | R ² =0.97 RMSE=0.04 SSE=0.047 |
| Page | R ² =0.999 RMSE=0.00 SSE=0.001 | R ² =0.999 RMSE=0.00 SSE=0.000 | R ² =0.996 RMSE=0.02 SSE=0.008 |
| Henderson ve Pabis | R ² =0.985 RMSE=0.03 SSE=0.024 | R ² =0.999 RMSE=0.00 SSE=0.000 | R ² =0.983 RMSE=0.04 SSE=0.033 |
| Logaritmik | R ² =0.997 RMSE=0.01 SSE=0.004 | R ² =0.999 RMSE=0.00 SSE=0.000 | R ² =0.998 RMSE=0.01 SSE=0.002 |
| Midilli vd. | R ² =0.999 RMSE=0.00 SSE=0.000 | R ² =0.999 RMSE=0.00 SSE=0.000 | R ² =0.998 RMSE=0.01 SSE=0.002 |

Mikrodalga ısıtmanın modellenmesi

2450 MHz frekansında meyve ve sebzelerin dielektrik özellikleri aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilmektedir:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= 2.14 - 0.104 \cdot T + 0.808 \cdot X_w \\ \epsilon'' &= 3.09 - 0.0638 \cdot T + 0.213 \cdot X_w \end{aligned} \quad (19)$$

Eşitlik (19)'da, ϵ' ve ϵ'' meyve ve sebzelerin dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü, T (°C) sıcaklığı ve X_w yaş bazda nem yüzdesini

ifade etmektedir. Mikrodalga fırın içerisindeki etkin elektrik alanı eşitlik (20) ile 250.09 V/m olarak hesaplanmıştır.

$$E_{rms} = \left(\frac{\rho \cdot Cp \cdot (T - T_0) / t}{0.556 \cdot 10^{-10} \cdot f \cdot \epsilon''} \right)^{1/2} \left(\frac{V}{m} \right) \quad (20)$$

Hesaplama f değeri mikrodalga frekansı olan $2450 \cdot 10^6$ Hz olarak alınmış, ρ ve C eşitlik (9) ve (10) kullanılarak hesaplanmıştır. Üzümün 10 dakikalık ısınması izotermal olarak gerçekleşmesi nedeniyle, T değeri 10 dakika süre sonundaki 52.4°C olarak alınmıştır. Eşitlik (3)'ün integral ortalaması alınarak, üzüm içindeki ortalama elektrik alan 194.07 olarak hesaplanmıştır.

Lewis modelinin zaman göre türevi alınarak M(t) yerine $m_w(t)/m_s$ koyulursa, üzümün zamana bağlı su kaybı eşitlik (21) kullanılarak hesaplanabilir. Burada $m_w(t)$ üzümde zamanla değişen su miktarını ve m_s ise üzümün katı madde miktarını göstermektedir.

$$\frac{dm_w(t)}{dt} = -k \cdot e^{-k \cdot t} \cdot (M_0 - M_e) \cdot m_s \quad (21)$$

Dolayısıyla nem yüzdesinin zamana bağlı değişimi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$\frac{dX_w}{dt} = \frac{m_{w,i} - \left| \frac{dm_w(t)}{dt} \right|}{m_i - \left| \frac{dm_w(t)}{dt} \right|} \times 100 \quad (22)$$

Burada m_i üzümün başlangıç ağırlığı, $m_{w,i}$ ise üzümde bulunan başlangıç su ağırlığını göstermektedir.

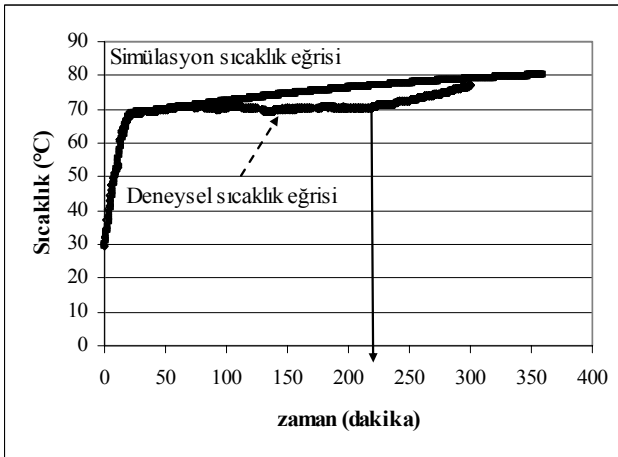
Bulunan değerler eşitlik (6)'nın sağ tarafına yerleştirilirse, üzüm tarafından zamanla absorbe edilen mikrodalga gücü aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir.

$$P_{abs} = 1092.87 \cdot \frac{dX_w}{dt} \quad (23)$$

Fırında kullanılan havanın ortalama hızı 1.9 m/s ve sıcaklığı ise 60°C'dir. Bu şartlarda aşağıdaki formül (Çengel, 1998) kullanılarak havanın taşınım ısı transfer katsayısı 29.73 W/m²K olarak hesaplanmıştır.

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} = 0.683 \cdot Re^{0.466} \cdot Pr^{1/3} \quad (24)$$

(7) numaralı eşitlik, konvektif enerji akışı ihmal edilerek üzümün zamana bağlı sıcaklık değişimini hesaplamak için kullanılmıştır. Konvektif enerji akışı sınır şart olarak ele alınmıştır. Hacimsel ısı üretimi eşitlik (23) kullanılarak üzümün kuruma esnasındaki yüzde nemine bağlı olarak ifade edilmiştir. Nem kaybı Lewis eşitliği kullanılarak bulunmuş ve bu şekilde evaporatif ısı kaybı hesaplanmıştır. Eşitlik (14)'deki f sabiti hacimsel ısı üretimi ile evaporatif ısı kaybı farkı olarak ifade edilmiştir. Aynı eşitlikteki d ve c sabitleri $\rho \cdot C$, $\lambda \cdot r$ olarak ifade edilip; ρ , C ve λ eşitlik (9), (10) ve (11) kullanılarak hesaplanmıştır. Üzümün 0.25 W/g mikrodalga güç oranı ve 60°C hava kullanılarak kurutulması sırasındaki deneysel ve matematiksel modellenmiş sıcaklık değişimi verilmiştir.



Şekil 2. 0.25 W/g başlangıç mikrodalga güç oranı ve 60°C konvektif hava kullanılarak kurutulan üzümlerin deneysel ve simülasyon merkez sıcaklık değişimi

Deneysel ve model arasında ilk ısınma sürecinde 4°C'lik maksimum sıcaklık farkı ortaya çıkmıştır. İlk ısınma sürecinden sonra sıcaklık farkı

1°C'den az olmuştur. 110 dakika sonra sıcaklık farkı 1°C'nin üzerine çıkmış ve ilerleyen süreçlerde fark çok az miktarda artma eğilimi göstermiştir. Sıcaklık farkındaki bu artış Lewis eşitliğine eğri uyuşturmada kaynaklanmış ve bu da evaporatif sıcaklık kaybını etkilemiştir. Yaş baz üzerinden %56 nem yüzdesinden sonra (ok ile gösterilmiştir) deneysel sıcaklık değerleri birden artmış fakat simülasyon sıcaklık değerindeki artış kademeli devam etmiştir.

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 0.25 W/g mikrodalga güç oranı ve 60°C konvektif hava ile kurutulan kontrol ve çözeltiye daldırılmış üzümlerin kuruma hızı arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Fakat buhar ile önişlenmiş üzümler kontrole göre belirgin bir şekilde daha hızlı kurumuştur.
- Çalışmada verilen tüm ince tabaka modelleri kuruma eğrilerini istatistiksel olarak hassas tanımlamıştır.
- Önerilen matematiksel model, üzüm içerisindeki sıcaklık değişimini deneysel sıcaklık verileri ile paralellik gösterecek şekilde tanımlamıştır.

Semboller

- a : Boyutsuz sabit
 b : Sabit (saat⁻¹)
 C : Özgül ısı (J/kgK)
 D : Üzümün çapı (m)
 d_p : Penetrasyon derinliği (m)
 E : Üzüm içerisindeki elektrik alan şiddeti (V/m)
 E_0 : Serbest uzaydaki elektrik alan şiddeti (V/m)
 E_{rms} : Fırın içerisindeki etkin elektrik alan şiddeti (V/m)
 f : Frekans (Hz)
 h : Taşınım ısı transfer katsayısı (W/m²K)
 h_{fg} : Buharlaşma gizli ısı (J/kg)
 k : Kurutma sabiti (saat⁻¹)
 M : Üzümün nem miktarı (kuru baz)
 M_0 : Üzümün başlangıç nemi (kuru baz)
 M_{eq} : Üzümün denge nem miktarı (kuru baz)
 MR : Nem oranı
 m_s : Üzümün katı madde miktarı (kg)
 m_w : Buharlaşan su miktarı (kg)
 Nu : Nusselt sayısı
 Pr : Prandtl sayısı
 Re : Reynolds sayısı

- T : Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
 t : Zaman (saat)
 X_w : Üzümün yüzde nem miktarı (yaş baz)
 z : Radyal uzunluk (m)
 α : Zayıflama faktörü (Np/m)
 ϵ' : Bağlı dielektrik sabiti
 ϵ'' : Bağlı dielektrik kayıp faktörü
 λ : Isı iletim katsayısı (W/mK)
 ρ : Yoğunluk (kg/m^3)
 j : Sanal (imajinal) sayı ($\sqrt{-1}$)

Kaynaklar

- Babalıs, S.J., Papanicolau, E., Kyriakis, N. ve Belesiotis, V.G., (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), *Journal of Food Engineering*, **75**, 2, 205-214.
- Baydar, N.G., Özkan, G. ve Sağdıç, O., (2004). Total phenolic contents and antibacterial activities of grape (*Vitis vinifera* L.) extracts, *Food Control*, **15**, 335-339.
- Cohen, J.S. ve Yang, T.C.S., (1995). Progress in food dehydration, *Trends in Food Science and Technology*, **6**, 20-25.
- Çengel, Y.A., (1998). *Heat transfer: A practical approach*, McGraw-Hill, Inc., New Jersey, USA.
- Datta, A.K., (2001). *Fundamentals of heat and moisture transport for microwaveable food product and process development*, in Datta, A.K. ve Anantheswaran, R.C., eds, *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*, Marcel Dekker, Inc., 115-172, New York.
- Datta, A.K., Geedipalli, S.S.R. ve Almeida, M.F., (2005). Microwave combination heating, *Food Technology*, **59**, 36-40.
- Dibben, D., (2001). *Electromagnetics: Fundamental aspects and numerical modelling*, in Datta, A.K. ve Anantheswaran, R.C., eds, *Handbook of microwave technology for food applications*, Marcel Dekker Inc., 1-28, New York.
- Geankoplis, C.J., (1993). *Transport processes and unit operations*, 3rd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Henderson, S.M. ve Pabis, S., (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient, *Journal of Agriculture Research Engineering*, **6**, 169-174.
- Lewis, W.K., (1921). The rate of drying of solid materials, *Industrial Engineering Chemistry*, **13**, 427-443.
- McMinn, W.A.M., (2006). Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder, *Journal of Food Engineering*, **72**, 113-123.
- Metaxas, A.C. ve Meredith, R.J., (1988). *Industrial microwave heating*, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
- Midilli, A., Kucuk, H. ve Yapar, Z., (2002). A new model for single-layer drying, *Drying Technology*, **20**, 7, 1503-1513.
- Nijhuis, H.H., Torringa, H.M., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C. ve Kloek, W., (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables, *Trends in Food Science & Technology*, **9**, 13-20.
- Page, G.E., (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers, *MSc. Thesis*, Purdue University.
- Ryynanen, S., (2002). Microwave heating uniformity of multi-component prepared foods, *PhD Thesis*, University of Helsinki, Finland.
- Saltiel, C. ve Datta, A.K., (1998). Heat and Mass Transfer in Microwave Processing, *Advances in Heat Transfer*, **32**, 1-94.
- Sharaf-Eldeen, Y.I. ve Hamdy, M.Y., (1979). Falling rate drying of fully exposed biological materials: A review of mathematical models, *ASAE Paper*, No: 79-6622, 1979 Winter Meeting of ASAE.
- Schiffmann, R.F., (2001). *Microwave processes for the food industry*, in Datta A.K. ve Anantheswaran R.C., eds, *Handbook of microwave technology for food applications*, Marcel Dekker, Inc., 299-337, New York.
- Soysal, Y., (2004). Microwave drying characteristics of parsley, *Biosystems Engineering*, **89**, 2, 167-173.
- Tang, J., Hao, F. ve Lau, M., (2002). *Microwave heating in food processing*, in Yang, H. ve Tang, J., eds, *Advances in bioprocess engineering (Advances in agricultural science and technology)*, World Scientific Publishing, 1-44, London, United Kingdom.
- Tang, J., (2005). *Dielectric properties of foods*, in Schubert, H. ve Regier, M., eds, *The microwave processing of foods*, CRC Press, Woodhead Publishing Limited, 3-20, Cambridge, England.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. ve Uzun, H.I., (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy*, **26**, 457-465.
- Pirog, R., (2005). Grape expectations: A food system perspective on redeveloping the Iowa grape industry. <http://www.leopold.iastate.edu/pubs/ /staff/grapes /grape.htm>.
- Özden, C., (2007). Kuru üzüm. http://www.igeme.org.tr/tur/rapor/sektor/Kuru_uzum.pdf.