Kırmızı Biberlerin Karşıt Akışlı Taşınım Tipli Kurutucuda Kurutulmasının Deneysel ve Teorik Analizi

Ayhan ONAT[1], Muharrem İMAL[2], Nurettin IŞIK[3], A.Talat İNAN[4], A. Korhan BİNARK[4]

[1]BAÜ, Gönen Meslek Yüksekokulu, İklimlendirme-Soğutma Programı, Balıkesir
[2]KSÜ, Kahramanmaraş Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Kahramanmaraş
[3]Verbundplan Birecik Barajı İşletme Müdürlüğü, Birecik, Şanlıurfa
[4]Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Enerji Öğretmenliği, İstanbul

ÖZET : Bu çalışmada, karşıt akışlı taşınım tipli kurutucunun tasarımı ve imalatı yapılmıştır. İmal edilen bu kurutucuda Fick II. kanunu kullanılarak kartezyen koordinat sistemi yaklaşımına göre, b kalınlığındaki kırmızı biber yığınlarından z ekseni boyunca meydana gelen zamana bağlı nem kaybı incelenmiştir. Kırmızı biber yığınlarının alt yüzeyi yalıtılmış kabul edilerek, kurutma işleminin matematiksel modeli elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen kurutma eğrileri ile, teorik analiz sonucu elde edilen kurutma eğrileri karşılaştırılmıştır. Teorik sonuçlarla deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Matematik model, kurutma, taşınım tipli kurutucu.

Theoretical and Experimental Analysis of Red Pepper Drying in a Counter Flow-Convection Type Dryer

ABSTRACT : In this study, a counter flow convection type dryer was designed and manufactured. In this dryer, using the Fick II law according to Cartesian coordinate system approach, the time dependent moisture lost in b thickness of paprika across the z axis was investigated. The theoretical of mathematical model of drying process was developed considering the mass of paprika's bottom surface to be isolated. A comparison was made between drying curves obtained from the experiment and drying curves obtained from theoretical analyses. The results of the comparison showed that experimental results are consistent with the theoretical results.
Key Words: Mathematical model, drying, convection type dryer.

GİRİŞ

Endüstriyel bir proses olan kurutma işlemi kimya, tekstil, seramik, inşaat, kereste, kâğıt ve gıda sektörlerindeki ürünlerin kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sektörlerde kurutma için tüketilen enerji toplam enerji tüketimi içinde önemli bir paya sahiptir. Bu oran kimya sektöründe %6, tekstil sektöründe %5, seramik ve inşaat sektöründe % 11, kereste sektöründe %11, gıda sektöründe %12 ve kâğıt sektöründe %33 düzeylerine ulaşmaktadır (Majumdar, 1987). Kurutma, gıda maddelerinin korunmasında başvurulan en önemli yöntemlerden biridir. Kurutma ile sürecin bir sonraki adımında işlenecek veya pazara sunulacak ürünün istenilen şartlara getirilmesi, gıda maddelerinin bozulmadan uzun süre saklanması, sterilize edilmesi, çözeltilerden bazı ürünlerin elde edilmesi ve malzemelerin taşınmasında kütlenin azaltılması mümkündür (Özbalta ve Güngör, 1998).

Turhan ve ark., (1997), yapmış oldukları çalışmada hava hızı 2 m/s olan tünel tip bir kurutucuda 50, 60, 70 ve 80°C sabit sıcaklıklarda düzenli ve düzensiz serili biber yığınlarında kurutma yapmışlardır. Düzenli serili örneklerin düzensiz serili örneklere göre daha kısa sürede kuruduklarını tespit etmişlerdir. Kütle ve ısı geçiş verimlerinin sıcaklıkla fazla değişmediğini ortaya koymuşlardır. Sabit kurutma şartlarında kinetik karakteristiklerini araştırmışlardır. Çözüm için Geankoplis ve Arrhenius eşitliklerini kullanmışlardır. Arrhenius sabitini düzenli ve düzensiz örnekler için sırası ile $D_o=2.96*10^{-4}$ m^2/s ve $2.82*10^{-5}$ m^2/s almışlardır. Ayrıca aktivasyon enerji parametresini düzensiz örnekler için 28.4 kJ/mol, düzenli örnekler için ise 33.3 kJ/mol olarak tahmin etmişlerdir.

Querioz ve Nebra (2001), çalışmalarında farklı kurutma havası şartlarında muzun kurutma kinetiğini deneysel ve teorik olarak ele almışlardır. Sabit difüzyon katsayısı kabulüne göre muzun kurutma işlemi boyunca nem içeriğini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Muzun büzülmesi ve yüzeyindeki taşınımla olan kütle akışı dikkate alınarak elde edilen sonuçlar diğer modellerle çok yakın özellikler göstermiştir. Difüzyon ve taşınım katsayıları modele deneysel verilerin uygulanması ile elde edilmiştir. Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sabit difüzyon katsayısı ile difüzyon modelinde en uygun taşınım sınır şartları elde edilmiştir. Muzların kuruma süresince ilk boylarına göre yaklaşık % 43-47 oranında büzülmeleri gözlenmiştir. Sonuç olarak büzülme etkisinin dikkate alındığı modelde daha güvenli sonuçlar elde edildiğini belirlemişlerdir.

Dinçer ve Dost (1996), kurutmaya tabi tutulan düzgün şekilde kesilmiş kerestenin Biot katsayısının $0<Bi<100$ ve $Bi>100$ aralığında nem transfer parametrelerini, nem ve ısı iletim performansı açısından ele almışlardır. Çalışmalarında Fick eşitliğini Fourier eşitliği gibi düşünerek, düzlem yapılar için tek boyutlu teorik çözüm yapmışlardır. Ağacın kuruma kabiliyetinin önemli bir göstergesi olan kuruma performansı değerinin, difüzyon katsayısı üzerine doğrudan, nem iletim performansı üzerine ise dolaylı bir etkisi olduğunu belirten araştırmacılar, düzensiz şekillerde olan ağaç parçalarının incelenmesinde Keey tarafından geliştirilen şekil katsayılarının dikkate alınmasını

önermektedirler. Düzgün şekilde kesilmiş ağaç numunesinin hava akışlı bir kurutucu ile nem içeriğini zamana bağlı olarak gösteren deneysel sonuçlarla, geliştirdikleri model sonuçlarının yakınlık gösterdiğini belirtmişlerdir.

Ertekin ve Sultanoğlu (2001), yaptıkları çalışmada 30, 45 ve 60 ^{o}C sıcaklıklarda ve %10 ile %90 arası kurutma havası bağıl nem değerlerinde yeşil ve kırmızı biberin nem sorpsiyon izotermlerini tespit etmişlerdir. Alınan deney sonuçları lineer olmayan regresyon analizi ile diğer çözüm modelleri karşılaştırılmıştır. Halsey eşitliği oldukça geniş bir nem aralığında en uygun değerleri verirken, 0.1-0.5 nem aralığında ise BET (Brunauer-Emmett-Teller) denklemlerinin en uygun sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Deneylerde kırmızı ve yeşil biberdeki kuru madde miktarının belirlenmesi için 70 ^{o}C'de vakumlu fırında 24 saat kurutma yapılmıştır. Yeşil biber için yaş baza göre su miktarı %93.5(± 0.3), kırmızı biber için ise %90.5(± 0.2) olarak bulunmuştur. Kırmızı ve yeşil biberdeki nem miktarının azalması ile birim ağırlıktaki üründen nemi uzaklaştırmak için verilen ısı miktarının arttığını deneysel olarak göstermişlerdir.

Dinçer (2002), "Katı maddelerin kurutulmasında nem iletiminin modellemesi" isimli çalışmasında, uygulamada en çok kullanılan Biot katsayısının 0<Bi<100 aralığı referansına göre düzlem ve silindirik yapılar için nem difüzyon ve nem iletim katsayılarını teorik olarak hesaplamıştır. Yapmış olduğu bu teorik çalışmayı, Akiyama'nın silindirik yapılar ve Lewicki'nin düzlem yapılar (düz doğranmış soğan dilimleri) için yapmış olduğu deneysel çalışmalarla karşılaştırarak, kurutma süresi ile boyutsuz nem içeriği arasındaki korelasyon sayısını (r^2>0.99) bulmuştur. Ayrıca Biot sayısını düz kesilmiş soğan için 3.73, silindirik yapıda nişasta tozu için ise 0.035 bulmuştur. Difüzyon katsayılarını ise sırasıyla 5.45×10^{-10} m^2/s ve 3.04×10^{-7} m^2/s hesaplamıştır.

Youcef-Ali ve ark., (2001), yaptıkları cebri taşınımlı ve düzlem yüzeyli bir kurutucuda, güneş kollektörü ile ısıtılan havayı, kurutma bölümüne konulan 3, 6 ve 9 mm boyutlarında dilimlenmiş patatesleri kurutmak amacı ile kullanmışlardır. Başlangıçtaki ilk iki saat için yarım saatte bir, daha sonraki saatlerde ise saatte bir ağırlık ölçümü alarak kuru madde elde edinceye kadar ağırlık ölçümü yapmışlardır. Sonuç olarak, kurutma esnasında patates dilimlerindeki nem difüzyon katsayılarının nemin içeriğine bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Kurutma sıcaklığı ve nem içeriğinin nem transfer katsayılarına etkisi oldukça fazla iken kurutma havası hızının nem transfer katsayıları üzerindeki etkisinin çok az olduğunu belirtmişlerdir.

Simal ve ark., (1998), çalışmalarında silindirik yapılar için kurutma esnasında sıcaklık dağılımına göre matematik model geliştirmişlerdir. Brokoli yaklaşık olarak 0.0070±0.0014 mm çapında 0.020 m. uzunluğunda silindirik şekilde kesilmiştir. Daha sonra numuneler 100 ^{o}C sıcaklıkta NaOH çözeltisinde 15 saniye bekletilmiştir. Kurutma sıcaklığı 50 ve 90 ^{o}C arasında hava kütlesel akışı 3 kg/m^2s olan bir sıcak havalı kurutucuda kurutma işlemi yapmışlardır. Kurutma sıcaklığı otomatik termostatla sabit tutulmaya çalışılmıştır. Hava hızı 2.7 m/s ve kurutma sıcaklığı sırası ile 50, 60, 70, 80 ve 90 ^{o}C değerlerinde deneyler yapılmıştır. Kurutma esnasında büzülme göz önüne alınarak Fick'in II. kanununa göre matematik model geliştirilmiştir. Model çözümü için Runge-Kutta-Merson yöntemi kullanılmıştır. Etken difüzyon katsayısı nemin ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tespit edilmiştir. Kurutma sıcaklığı 90 ^{o}C için efektif difüzyon hesaplamaları yapmışlardır.

Pangavhane ve ark., (2000), çalışmalarında Thompson çekirdeksiz üzümünü sabit tip ticarî kurutucuda sırası ile 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.0 m/s hızlarda, 50, 60, 70, ve 80 ^{o}C sıcaklıklarda ve %13, %18 ve %23 bağıl nem değerlerindeki kurutma havasında deneyler yapmışlardır. Üzümdeki nem içeriği %17.18 oluncaya kadar her yarım saatte bir ağırlık ölçümü yapmışlardır. Deneysel ve teorik çalışmalar sonunda ince kabuklu çekirdeksiz Thompson üzümünün kurutma kinetikleri Page eşitliği ile çözülmüştür. Deneysel sonuçlarla teorik sonuçlar birbirlerine yakın değerler vermiştir. Kurutma sabitinin hız ve mutlak neme göre sıcaklıktan daha fazla etkilendiği belirtilmiştir. Yapılan teorik çözümlerde Arrhenius Modeli'nin Pover Modeli'ne göre daha uygun sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. 70 ^{o}C kurutma sıcaklığı üzerinde üzümün yapısında ani değişimlerin olduğu, ve kabuğunun büzüşerek çatladığı gözlemlenmiştir. En uygun kurutma sıcaklığının 50-70 ^{o}C arasında olduğunu belirtmişlerdir.

Mahmudoğlu ve ark., (1996), çalışmalarında farklı şekillerde ön işleme tabi tutulan kayısıdaki nem kaybını ısı ve kütle açısından ele alıp matematik modelini ortaya koymuşlardır. Kurutma esnasında sıcaklık, hacim ve nem değişikliklerini göz önüne alarak Fick'in II. Kanununa göre küresel koordinatlarda çözüm yapmışlardır. Hutchinson-Otten ve Page eşitliklerinden faydalanmışlardır. Sonlu elemanlar çözüm yöntemini kullanmışlardır. Kurutma havası sıcaklığı 60 ^{o}C ve hava hızı 0.43 m/s'de sabit tip bir kurutucuda deneyleri yapmışlardır.

MATERYAL ve METOT

Materyal

Kurutma için gerekli ısıl girdi yansıtıcı destekli güneş kollektöründen ve rezistanstan hissedilir ısı ilavesi olmak üzere, iki ısı kaynağından temin edilmektedir. Dış hava bir kanal yardımı ile sisteme alınırken rezistans yardımı ile sıcaklığı yükseltilip hareketli bant üzerine üfleme fanı ile gönderilmektedir. Kurutma havası, kurutulan biberler üzerinden karşıt akımla geçirilerek emiş havası fanı yardımı ile PCM (Phase Change Materials) ısı depolaması yapılan ısı dönüştürücü üzerinden tahliye edilmektedir. Bu şekilde, tahliye edilen sıcak hava PCM ve giriş havası üzerinden tahliye edilerek ısı geri kazanımı sağlanmaktadır. Cihaz bant hızı, bantın bir kayış-kasnak mekanizması ile bağlı

olduğu motor-redüktör grubuna bağlı inverter (hız kontrol cihazı) ile 0 m/s ile 0.05 m/s arasında değiştirilebilmektedir. Buna bağlı olarak da bantın üzerindeki bir noktanın bant giriş ve çıkış süresi 1.27 dakikaya kadar düşürülebilmektedir. Bu şekilde sabit tünel boyunda hızların değiştirilmesi ile ürün kurutma süresi de değiştirilebilmekte, dolayısıyla farklı ürünlerin kurutulması olanağı da sağlanmış olmaktadır. Basma ve emme olmak üzere 2 adet fan kullanılmıştır. Basma fanı, radyal ve hız devir kontrollü olup kollektör içerisine farklı hızlarda hava gönderilmektedir. Kollektör içerisindeki sıcaklık kontrolü PC bağlantılı PLC ile sağlanmıştır. Bilgisayarda yazılan program ile farklı ürünlerin kurutulması, girilen farklı sıcaklıktaki kurutma değerlerine göre ek ısıtıcı ile sağlanmıştır. Şekil 1'de güneş enerjili-gizli ısı depolamalı kurutucu görülmektedir.



Şekil 1. Güneş enerjili ve ısı depolamalı (PCM) çok amaçlı kurutucunun geri kazanımlı dış hava kanal bağlantılı görünüşü.

Kuru madde Miktarı Tayini

Bir kurutma sisteminin tasarımında, temel girdilerden biri, kurutulacak maddedeki uzaklaştırılması gereken nem miktarıdır. Etüv fırını kullanılarak yapılan nem ölçme tekniğinde direkt olarak ağırlık ölçümü yapılmaktadır. Bu Yöntem, 105-110°C'de ürün üzerindeki nemin tamamen alınmasıyla, nem ve kuru madde miktarının belirlenmesine dayanmakta ve ürünün özelliğine göre yaklaşık 72 saat sürmektedir. Etüv yöntemi bilimsel ve uzun süreli çalışmalarda kullanılmaktadır (Loewer ve ark., 1994). Molnar'da (1987), direkt yöntemle katı maddedeki nem miktarını belirlemek için fanlı veya fansız etüv fırınının kullanılabileceğini belirtmektedir. Kurutulacak ürün 1-2 mm^3 hacminde ve yaklaşık olarak 4-5 g ağırlığında hazırlanarak 102-105°C sıcaklıktaki etüv fırınında kurutulmasını önermiştir. İki ağırlık ölçümü arasındaki fark ±% 0.05 oluncaya kadar kurutma işleminin devam ettirmişlerdir. Literatür çalışmalarına göre 130-150°C'deki etüv fırınlarında, katı maddelerin nem miktarının tayini daha hızlı bir sürede belirlenmesine rağmen %0.5-1.0 arasında hata payı oluştuğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada biberlerdeki yaş ve kuru madde tayini için etüv yöntemi kullanılmıştır. Kuru madde ve nem miktarının belirlenmesi için 110°C'de fanlı ve dijital göstergeli etüvde her iki saatte bir ağırlık değeri ölçülmüştür. Deneylerde ölçümler, iki ölçüm arasındaki değişim % 0.04 g oluncaya kadar devam etmiştir. Bu süre ortalama olarak yaklaşık 70 saat sürmüştür. Toplam 100 g ağırlığındaki biberler kesilerek ortalama 3 g ağırlığındaki numuneler haline getirilmiştir. 250 g kapasiteli ve 1/1000 hassasiyetli terazi ile tartılarak sonuçlar elde edilmiştir. Kuru madde ve nem oranındaki değişiklikler biberin cinsine, farklı yetişme şekline, ölçüm hatalarına, farklı şekillerde doğranan biberdeki tohum kaybına ve ölçüm esnasındaki hava hızına bağlı olarak bazı farklılıklar göstermiştir. Kuru madde miktarı %18, yaş madde miktarı ise %82 olarak tespit edilmiştir. Havadaki nem miktarının belirlenmesi için kuru ve yaş termometre sıcaklıkları dijital termometre ile ölçülmüştür.

Metot

Katı Maddelerin Kurutulmasının Modellenmesi

Katı maddelerin kurutmasındaki nem difüzyonu; hidrodinamik, knudsen akışı, kılcal akış, moleküler difüzyon ve yüzey difüzyonu ile belirlenebilen karmaşık bir işlemdir. Bütün bu işlemler Fick'in II. kanununda aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilmiştir (Marinos-Kouris ve Maroulis, 1995).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D\nabla^2 X \qquad (1)$$

Burada;

D (m^2/s), difuzyon katsayısını,

X (kg/kg, kb), malzemenin nem içeriğini,

t (s), zamanı,

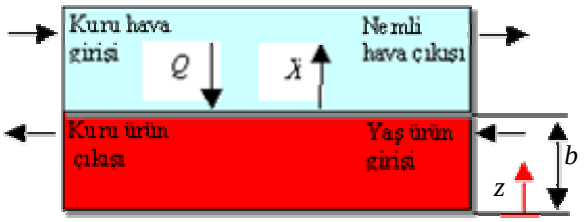
∇^2, Laplace operatörünü

ifade etmektedir. Tek boyutlu koordinatlar için ∇^2 ifadesi şu şekilde yazılır:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \qquad (2)$$

Matematiksel Model

Kartezyen koordinat sistemine göre, alt kısım taşıyıcı bantla temas halinde olduğu için izoleli kabul edilerek b kalınlığındaki biber yığınlarından z ekseni boyunca meydana gelen nem kaybının matematik modeli oluşturulmaktadır. Şekil 2'de kurutma işlemi gösterilmektedir.



Şekil 2. Kurutma işleminin şematik gösterimi.

O zaman (1) nolu denklem şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial X_f}{\partial t} = D\frac{\partial^2 X_f}{\partial z^2} \qquad (3)$$

Bu denklem ve başlangıç sınır şartları, "Başlangıçtaki sıcaklığı T_0, ve kalınlığı $2L$ olan sonsuz büyüklükte bir levhanın her iki yüzeyin aniden T_∞ sıcaklığındaki bir akışkan ile temas etmesi halinde geçici rejimde ısı geçişinin kütle transferindeki karşılığı gibi düşünülerek çözüm yapılmıştır (Genceli, 2000). X_∞ , referans havadaki nem miktarı alınmak üzere $\overline{X} = X_f - X_\infty$ olarak tanımlanıp, 3 nolu denklem yeniden yazılırsa;

$$\frac{\partial \overline{X}}{\partial t} = D\frac{\partial^2 \overline{X}}{\partial z^2} \qquad (4)$$

olur. Sistem için başlangıç ve sınır şartlarını yazarsak:

I. Başlangıç şartından,

$t = 0$ 'da, $\quad 0 \le z \le b \quad \overline{X} = \overline{X}_b = X_b - X_\infty$

II. Sınır şartından,

$t > 0$ ' da $z = b$ ' de $\; -D\left.\frac{\partial \overline{X}}{\partial z}\right|_{z=b} = h'\left.\overline{X}\right|_{z=b}$

III. Sınır Şartından,

$t > 0$ ' da, $\quad z = 0$ ' da $\quad \left.\frac{\partial \overline{X}}{\partial z}\right|_{z=0} = 0$

olarak verilebilir. 4 nolu denklemin çözümü, birisi z koordinatına bağlı diğeri ise t zamanına bağlı iki fonksiyonun çarpımı şeklinde göz önüne alınabilir. Bu durumda,

$$\overline{X}(z,t) = Z(z)\cdot T(t) \qquad (5)$$

yazılabilir. Bu eşitliğin bir tarafının sadece t zamanına, diğer tarafın ise sadece z koordinatına bağlı olması nedeniyle, eşitliği $-\lambda^2$ ile göstererek bir sabite eşitlemek mümkündür. Bu durumda;

$$Z = C_2\, sin(\lambda z) + C_3\, cos(\lambda z) \qquad (6)$$

$$T = C_1\; e^{-D\lambda^2 t} \qquad (7)$$

olduğundan, (6) ve (7) nolu ifadelerinin çarpımı genel çözüm olarak yazılabilir.

$$\overline{X} = \left[C_2\, sin(\lambda z) + C_3\, cos(\lambda z)\right] C_1\; e^{-D\lambda^2 t} \qquad (8)$$

Bu eşitlikte C_1, C_2, C_3 ve λ başlangıç ve sınır şartlarına göre bulunarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\overline{X} = \overline{X}_b \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2\,sin(\lambda_n b)}{\lambda_n b + sin(\lambda_n b)cos(\lambda_n b)} \cdot cos(\lambda_n z)\; e^{-D\lambda_n^2 t}$$

$Fo_m = \frac{Dt}{b^2}$ şeklinde boyutsuz kütle geçişindeki Fourier sayısının tanımı kullanılırsa (9) nolu ifade şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{\overline{X}}{\overline{X}_b} = 2\sum_{n=0}^{\infty} \frac{sin(\lambda_n b)}{\lambda_n b + sin(\lambda_n b)cos(\lambda_n b)} \cdot cos(\lambda_n z)\; e^{-(\lambda_n b)^2 Fo_m} \qquad (10)$$

Sayısal Uygulama ve Kütle Geçiş Katsayısının Hesaplanması

Havanın kütle geçiş katsayısının h' (m/s) bulunması:

$b = 6\cdot 10^{-2}$ m, (biber yığını yüksekliği)

$L = 0.2$ m, (biber yığınının uzunluğu)

$d = 1$ cm $= 0.01$ m biber et kalınlığı, $\frac{b}{d} = 6$

Biberler üzerindeki akış modeli; pürüzlü yüzey üzerindeki akış modeli olarak alınabilir. (Binark, 1990).

$$Nu \cdot \Pr^{-(1/3)} = 0.04530\,\mathrm{Re}^{0.90139} \qquad (11)$$

Isı ve kütle geçişi benzeşimi uygulanırsa (11) ifadesi yerine

$$Sh \cdot Sc^{-(1/3)} = 0.04530\,\mathrm{Re}^{0.90139} \qquad (12)$$

eşitliği yazılabilir. Reynold sayısı;

$$\mathrm{Re} = \frac{u_k \cdot d}{\nu} \qquad (13)$$

$u =$ ortalama hava hızı d = 0.01 m, ν = 18.910^{-6} m^2/s (60°C için havanın kinematik viskozitesi)

$u_k = 0.5$ m/s için:

$$\mathrm{Re} = \frac{0.5 \cdot 0{,}01}{18.9 \cdot 10^{-6}} = 264.55 \quad \text{bulunur.}$$

Shmidt sayısı; $\quad Sc = \frac{\nu}{D_{hava}} \qquad (14)$

tanımında D_{hava}, 60°C sıcaklık ve 100 kPa için havanın difüzyon katsayısıdır ve

$$D_{hava} = \frac{9.25\cdot 10^{-4}}{P_t} \cdot \frac{T^{2,5}}{(T+245)} \quad (\mathrm{m^2/s}) \qquad (15)$$

bağlantısından bulunmaktadır (Genceli, 1984).

$P_t = 100000\ Pa$

$T = 60 + 273.15 = 333.15\ \text{K}$

$D_{hava} = 3.24 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$ ve $Sc = 0.5833\overline{3}$

bulunur. Sherwood Sayısı:

$$Sh = 0.04530 \cdot (264.55)^{0,90139} \cdot (0.58333)^{(1/3)} \quad (16)$$

$$Sh = \frac{h' \cdot d}{D_{hava}} \quad (17)$$

olarak tanımlanır. Kütle geçiş katsayısı ise;

$h' = 1871.7 \times 10^{-5}$ m/s

olarak hesaplanmıştır. II. sınır şartından elde edilen $\cot(\lambda b) = \frac{\lambda D}{h'}$ eşitliğinde $Bi_m = \frac{h'b}{D}$ şeklinde boyutsuz kütle geçişindeki Biot sayısının tanımı kullanılırsa;

$$cot(\lambda b) = \frac{\lambda b}{Bi_m} \quad (18)$$

elde edilir. Kesilmemiş bütün kırmızı biberler için Bi_m sayısı; $D_t = 1 \times 10^{-10}$ m^2/s, $b = 6 \times 10^{-2}$m, $h' = 1871.7 \times 10^{-5}$ m/s değerleri konulursa,

$$Bi_m = \frac{1871.7 \cdot 10^{-5} \times 6 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-10}} = 11230290$$

bulunur. Diğer numuneler içinde bulunan bu değerler pratik açıdan, $Bi_m > 100$ olduğundan $B_{i_m} \to \infty$ alınabilir (Genceli, 1984). Denklem (18)'de verilen eşitlikten;

$$\lambda_n \cdot b = (2n+1)\frac{\pi}{2} \qquad [n = 0, \ldots\ldots\ldots\ldots, \infty] \quad (19)$$

yazılabilir. Buna göre, denklem (10)' nun katsayıları

$$\frac{2sin(\lambda_n \cdot b)}{\lambda_n \cdot b + sin(\lambda_n \cdot b)\cos(\lambda_n \cdot b)} = \frac{2 \cdot sin\left[(2n+1)\frac{\pi}{2}\right]}{(2n+1)\frac{\pi}{2} + sin\left[(2n+1)\frac{\pi}{2}\right]cos\left[(2n+1)\frac{\pi}{2}\right]}$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots = \frac{4(-1)^2}{\pi(2n+1)} \quad (20)$$

şeklindedir. Bu değerlerin genel çözüme taşınmasıyla

$$\frac{\bar{X}}{\bar{X}_b} = \frac{4}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{(2n+1)}\cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2b}z\right]exp\left[-\left(\frac{2n+1}{2}\pi\right)^2 \cdot Fo_m\right] \quad (21)$$

elde edilir. $\bar{X} = X_f - X_\infty$ ve $Fo_m = \frac{Dt}{b^2}$ dönüşümleri denklemde yerine koyup I. terim için çözüm yapılırsa b kalınlığındaki biber yığınlarında z ekseni boyunca oluşan nem kaybı (X_f) ;

$$\frac{\bar{X}_f - \bar{X}_\infty}{\bar{X}_b - \bar{X}_\infty} = \left[\cos\left[\frac{\pi}{2b}z\right]\exp\left[-\frac{\pi^2}{4}\frac{Dt}{b^2}\right]\right] \quad (22)$$

eşitliğinden elde edilir..

BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'de verilen 4 farklı geometrik yapıdaki kırmızı biberler karşıt akışlı taşınım tipli kurutucuda hava hızı 0.5 m/s, bağıl nem oranı %10-15 ve kurutma sıcaklığı 55-60°C'de deneyler yapılmıştır. 250 g kapasiteli ve 1/1000 hassasiyetli terazide 2 saatte bir alınan ölçümlere göre biberlerdeki ağırlık kaybı Tablo 1'de, ağırlık kaybına göre hesaplanan % nem kaybı ise Tablo 2'de verilmiştir. Teorik analiz sonucunda elde edilen denklem 22'deki değerler yerine konularak b kalınlığındaki biber yığınlarında t zamanına bağlı ve z ekseni boyunca olan nem kaybı (X_f) ile karşıt akışlı taşınım tipli kurutucuda yapılan ölçümlerde elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak aynı grafikte her bir farklı numune için verilmiştir. Şekil 4'de kesilmemiş bütün kırmızı biber, Şekil 5'de delikli kırmızı biber, Şekil 6'da enine kesilmiş kırmızı biber ve Şekil 7'de ise boyuna kesilmiş kırmızı biberler için teorik ve deneysel sonuçlara göre karşılaştırmalı olarak kurutma eğrileri verilmiştir.

İlk 2 saat içerisinde kesilmemiş ve delikli kırmızı biberlerde nem kaybı dikkate alınmayacak kadar az olmuş, verilen enerji ürünün ısınmasına ve ısının yüzeyden iç katmanlarına doğru ilerlemesini sağlamıştır. Kırmızı biberler üzerindeki zar kabuğu ısının ürün içerisine işlemesini geciktirmiştir. Fakat enine ve boyuna kesilmiş kırmızı biberlerdeki zar kabuğu yırtıldığı için ısınma daha kısa sürede olmuş ve nem kaybı hemen başlamıştır.



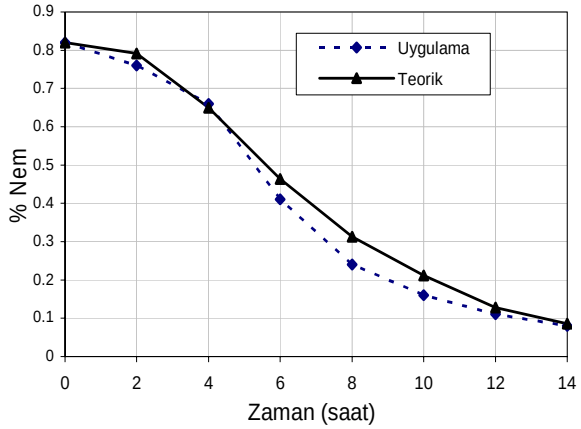
Şekil 3. Farklı geometrideki kırmızı biber numuneleri.

Tablo 1. Değişik Tipte Kırmızı Biber Numunelerinin Kurutma Makinesinde Yapılan Ağırlık Ölçümleri

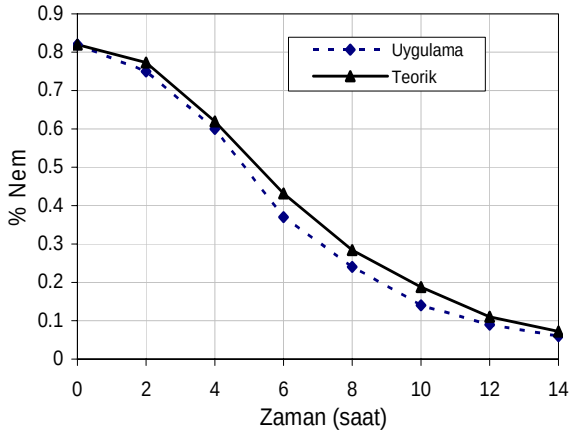
Numune Şekli	Kurutma Süreleri(saat)/ ağırlıklar (g)								KMM (g)
	0	2	4	6	8	10	12	14	
Kesilmemiş	500	375	264.7	152.5	118.4	109.5	101.1	97.8	90
Delikli	500	360	225	142.9	118.4	107	98.9	97.2	90
Enine	500	300	176.5	121.6	111.1	104.5	97.8	95.7	90
Boyuna	500	272.7	157.9	115.4	107.1	102.2	95.7	93.7	90

Tablo 2. Değişik Tipte Kırmızı Biber Numunelerinin Kurutma Makinesinde Yapılan Ağırlık Ölçümleri Sonucunda Hesaplanan % Yaş Madde Miktarları

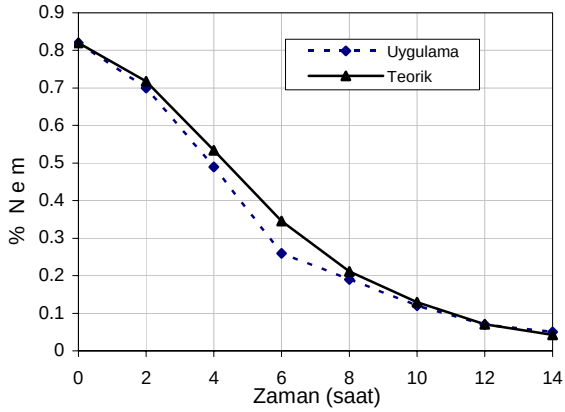
Numune Şekli	Kurutma Süreleri (saat) / % Yaş madde miktarları							
	0	2	4	6	8	10	12	14
Kesilmemiş	0.82	0.76	0.66	0.41	0.24	0.16	0.11	0.08
Delikli	0.82	0.75	0.60	0.37	0.24	0.14	0.09	0.075
Enine	0.82	0.70	0.49	0.26	0.19	0.12	0.08	0.06
Boyuna	0.82	0.67	0.43	0.22	0.16	0.10	0.06	0.04



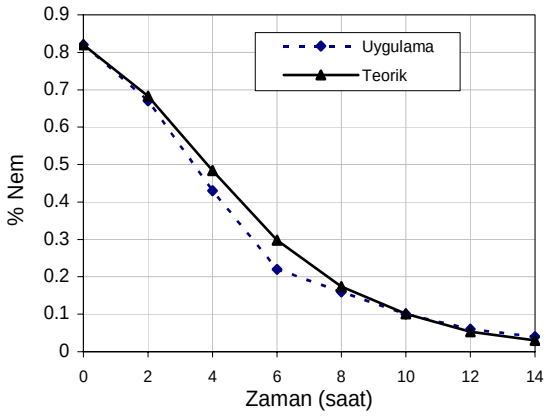
Şekil 4. Kesilmemiş bütün kırmızı biberlerin 0.5 m/s hız, 10-15 bağıl nem ve 55-60°C kurutma havası sıcaklığında zamana bağlı olarak % nem kaybının deneysel ve teorik karşılaştırılması.



Şekil 5. Delikli kırmızı biberlerin 0.5 m/s hız, 10-15 bağıl nem ve 55-60°C kurutma havası sıcaklığında zamana bağlı olarak % nem kaybının deneysel ve teorik karşılaştırılması.



Şekil 6. Enine kesilmiş kırmızı biberlerin 0.5 m/s hız, 10-15 bağıl nem ve 55-60°C kurutma havası sıcaklığında zamana bağlı olarak % nem kaybının deneysel ve teorik karşılaştırılması.



Şekil 7. Boyuna kesilmiş kırmızı biberlerin 0.5 m/s hız, 10-15 bağıl nem ve 55-60°C kurutma havası sıcaklığında zamana bağlı olarak % nem kaybının deneysel ve teorik karşılaştırılması.

Tablo 1 ve Tablo 2'de verilere bakıldığında başlangıçta 500g numune içerinde bulunan %82'lik su (nem) miktarı 14 saat sonra boyuna kesilmiş numunelerde %4, enine kesilmiş numunelerde %6, delikli numunelerde %7.5 ve kesilmemiş tam numunelerde ise %8 düşmüştür. Nem kaybı göz önüne alındığında en kısa sürede kurutma boyuna kesilmiş numunelerde görülmektedir. Daha sonra sırasıyla en fazla nem kaybı enine kesilmiş, delikli ve kesilmemiş numunelerde gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Tasarlanıp imalatı yapılan karşıt akışlı taşınım tipli kurutucu cihazda Fick II. kanunundan yaralanılarak düzlem koordinat sistemi yaklaşımına göre, alt yüzey taşıyıcı bantla temas halinde olduğu için izoleli kabul edilerek b kalınlığındaki kırmızı biber yığınlarından z ekseni boyunca meydana gelen zamana bağlı nem kaybının matematik modeli çıkarılmıştır. Ağırlık kaybı metoduna göre yapılan deneylerden elde edilen sonuçların grafikleri ile matematiksel model sonucu elde edilen teorik grafikler, % nem kaybı ve zaman ekseninde karşılaştırılmıştır. Kesilmemiş bütün kırmızı biberler hariç diğer grafiklerde teorik sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirine çok yakın değişim gösterdiği belirlenmiş ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Kesilmemiş bütün kırmızı biberlerde teorik kurutma eğrisi ile deneysel kurutma eğrisi arasındaki değişim farklılığının diğer numunelere göre biraz daha fazla olduğu, bununda kesilmemiş bütün biber yığınları arasında kalan hava boşluklarından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Farklı geometrik yapılarda kurutulan biber numunelerinin kurutma süreleri göz önüne alındığında en kısa sürede kurutma; boyuna kesilmiş numunelerde, daha sonra ise sırasıyla enine, delikli ve tam kırmızı biber numunelerinde görülmüştür. Ancak işleme kolaylığı dikkate alındığında biber kurutma işlemlerinde kırmızı biberlerin enine kesilmesinin daha uygun olacağı görülmektedir.

Boyutsuz Sayılar

$\mathrm{Re} = \dfrac{u \cdot d}{\upsilon}$ =Reynolds $\qquad Le = \dfrac{\alpha}{D_a}$ =Lewis

$Sc = \dfrac{\upsilon}{D_a}$ = Schmidt $\qquad Bi = \dfrac{h' \cdot b}{D}$ =Biot

$Sh = \dfrac{h' \cdot d}{D_a}$ =Sherwood $\qquad Nu = \dfrac{h \cdot d}{k}$ =Nusselt

Sembol Listesi

b : Biber yığın kalınlığı (m)
d : Biber et kalınlığı (m)
D : Difüzyon katsayısı (m^2/s)
D_{hava} : Havanın difüzyon katsayısı (m^2/s)
h' : Kütle taşınım katsayısı (m/s)
Pr : Prandtl sayısı
t : Zaman (s)
$T(t)$: Zamana bağlı nem değişim fonksiyonu
u_k : Kollektör hava hızı (m/s)
X : Her hangi bir zamandaki kuru bazda nem miktarı (kg/kg)
X_b : Kuru bazda başlangıç nem miktarı (kg/kg)
X_d : Kuru bazda nem denge miktarı (kg/kg)
X_f : z boyunca iki ölçüm değeri arasındaki nem farkı (kg/kg)
X_∞ : Kurutma havasının nem miktarı (kg/kg)
$Z(z)$: Biber yığını yüksekliğine bağlı nem değişimi
z : Alt noktaya göre biber yığını yüksekliği değişimi (m)
ϕ : Kolektördeki kurutma havası bağıl nemi(%)
∇^2 : Laplace operatörü
α : Isısal yayılma katsayısı (m^2/s)
ν : Kinematik viskozite (m^2/s)

KAYNAKLAR

Basunia, M.A., Aba, T. 2001. Thin-Layer Solar Drying Characteristics of Rough Rice Under Naturel Convection. Journal of Food Engineering, 47: 295-301

Binark, A.K. 1990. Pimli Yüzeylerde Isı Taşınımı. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Enerji ABD, Doktora Tezi, İstanbul, 64s

Cihan, A., Ece, M.C. 2001. Liquid Diffusion Model For Intermittent Drying of Rough Rice. Journal of Food Engineering , 49: 327-331

Demirtaş, C., Karabay, H., Ayhan, B., Ayhan, T. 1996. Şartlandırılmış Hava ile Fındık Kurutma Deney Düzeneği. 4. Ulusal Soğutma ve İklimlendirme Tekniği Kongresi, Adana

Dinçer, I., Dost, S. 1996. Determination of Moisture Diffusivities and Moisture Transfer Coefficients for Wooden Slabs Subject to Drying. Wood Science and Technology, Springer-Verlag, 245-251

Dinçer, I. 2002. Moisture Transfer Models for Solid Drying. 12th International Drying Symposium

Ertekin, F.G., Sultanoğlu, M. 2001. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Peppers. Journal of Food Engineering, 47: 225-231

Genceli, O.F. 2000. Çözümlü Isı İletim Problemleri. Birsen Yayın Evi, İstanbul, 320-323s

Genceli, O.F. 1984. Momentum-Isı Transferi Ders Notları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, İstanbul

Loewer, J.O., Bridges, C.T., Bucklin, A.R. 1994. On-Farm Drying and Storage Systems. ASAE Publication 9, 31-32p

Mahmudoğlu, T., Pala, M., Ünal, M. 1996. Mathematical Modeling of Moisture Volume and Temperature Changes During Drying of Pretreated Apricots. Journal of Food Processing and Preservation, 467-490

Marinos-Kouris, D., Maroulis Z. B. 1995. Transport Properties in The Drying of Solids. Handbook of Industrial Drying, Second Edition Revised and Expanded, Marcel Dekker, New York, 115-116p

Molnar, K. 1987. Experimental Techniques in Drying, in Handbook of Industrial Drying. A. Majumdar (ed.), 1st Ed., Marcel Dekker, New York, 42-43p

Mujumdar, A.S. 1987. Handbook of Industrial Drying. Marcel Dekker Inc., New York, 28-32p

Nuriddinov, Kh. N., Zakhidov, R. A., Klychev, Sh. I. 1994. Heat Pattern in Radiation-Dryed Products. Applied Solar Energy (Translated from Russian Geliotekhnika into English), 30(2): 63-65

Özbalta, N., Güngör, A. 1998. Kurutma Sistemlerinde Isı Pompası Kullanım Potansiyeli. Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, 5-6s

Özışık, M.N., Huang, B.K., Toksoy M. 1979. Solar Grain Drying. Solar Energy, 24: 397-401

Pangavhane, D.R., Sawhney, R. L., Sarsavadıa, P.N. 2000. Drying Kinetic Studies on Singe Layer Thompson Seedless Grapes Under Controlled Heated Air Conditions. Journal of Food Processing and Preservation, 24: 335-352

Querioz, M. R., Nebra, S. A. 2001. Theoretical and Experimental Analysis of the Drying Kinetics of Bananas. Journal of Food Engineering, 47 : 127-132

Simal, S., Rossello, C., Berna, A., Mulet, A. 1998. Drying of Shrinking Cylinder-Shaped Bodies. Journal of Food Engineering, 37: 423-435

Turhan, M., Turhan, K. N., Sahbaz, F. 1997. Drying Kinetics of Red Pepper. Journal of Food Processing and Preservation, 21: 209-223

Youcef-Ali, S., Messaoudi, H., Desmons, J.Y., Abene, A., Le Ray, M. 2001. Determination of the average coefficient of the internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices. Journal of Food Engineering, 48: 95-101