

ISI POMPALI BİR KURUTUCUDA KERESTELERİN KURUTMA SÜRESİNİN BELİRLENMESİ

İlhan CEYLAN, Mustafa AKTAŞ ve Hikmet DOĞAN

Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Teknikokullar, Ankara
ilhancev@gmail.com

(Geliş/Received: 28.11.2006; Kabul/Excepted: 11.05.2007)

ÖZET

Bu çalışmada, kavak ve çam keresteleri 24 saatlik çalışma periyodunda ısı pompalı bir kurutucuda 1.28 kg su/kg kuru madde ve 0.60 kg su/kg kuru madde nem miktarlarından, 0.15 kg su/kg kuru madde nem miktarına kadar kurutulmuştur. Kerestelerin tamamındaki ağırlık değişimi fırın içerisindeyken takip edilebilmiş istenilen ağırlığa gelindiğinde kurutma sonlandırılmıştır. Başlangıç nem miktarı 1.28 kg su/kg kuru madde olan kavak keresteleri 0.15 kg su/kg kuru madde nem miktarına 70 saatte, 0.60 kg su/kg kuru madde de olan çam keresteleri ise aynı nem miktarına 50 saatte getirilmiştir. Kurutma esnasında, kurutma havası bağıl nemi, sıcaklığı ve kerestelerdeki ağırlık değişimi değerleri bilgisayarda toplanarak, daha sonra kurutma süresinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kereste, ısı pompası, kurutma, kurutucu

DETERMINING THE DRYING TIME OF TIMBERS IN A HEAT PUMP DRYER

ABSTRACT

In this study, poplar and pine timbers were dried from the moisture contents of 1.28 kg water/kg dry matter and 0.60 kg water/kg dry matter to 0.15 kg water/kg dry matter in a heat pump dryer over an operation period of 24 h. The change in weight in all of the timbers was followed in the drying chamber and the drying process was stopped when the desired weight was achieved. Initial moisture content of the poplar timbers 1.28 kg water/kg dry matter, the moisture content was reduced to 0.15 kg water/kg dry matter moisture content in 70 h, and the moisture content of the pine timbers with 0.60 kg water/kg dry matter was reduced to the same amount in 50 h. All data collected while drying were saved on computer and afterwards, the drying time was calculated and analyzed.

Keywords: Timber, heat pump, drying, dryer

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayinin bir çok dalında yaygın olarak (gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) uygulanmaktadır. Kurutmanın uygulandığı en yaygın alanlar; Gıda sanayi, deri sanayi, tarım sektörü, kimya sanayi, silah sanayi, orman ürünleri sanayi olarak özetlenebilir. Bu alanlara kurutma işlemi uygulanarak ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesi yanında, nemden korunması, hacimlerinin ve ağırlıklarının azaltılması taşıma, kullanım ve işleme kolaylığı vb avantajlar kazandırılması da eklenebilir. Orman ürünleri sanayinde kullanılan ağaç malzeme higroskopik, diğer bir ifade ile bünyesine su alıp verebilen bir

malzemedir. Çevresiyle higroskopik bir denge oluşturması, çevre havasının bağıl nemi ve sıcaklığı ile değişebilmektedir. Ağaç malzeme üzerinde oluşabilecek kusurların önlenmesi için çevre havasıyla yada kullanılacağı yerdeki nem miktarı ile higroskopik dengede olmalıdır. Çevre havası sıcaklığı ve bağıl nemi ile ağaç malzemenin nemi arasında oluşan bu dengeye “denge rutubeti” yada “higroskopik denge” denir. Higroskopik denge ağaç malzemenin uygun nem miktarına kadar kurutulması sonucu sağlanabilir. Kurutma işlemi ağaç malzemenin teknik özelliklerinin geliştirilmesi açısından da gereklidir. Ağaç malzemenin kurutulması ile; Boyuttaki değişiklikler en aza indirgenir, dayanıklılık özelliği kazandırılır, renk değişimi ve çürümesi

önlenir, kullanım özellikleri (işleme, tutkallama, yapışma kabiliyeti artar), koruyucu maddelerle boyanmasında daha etkili sonuç verir, ürün ağırlığının azalması nedeniyle nakliye giderleri azalır.

Daha önce yapılan çalışmalar içerisinde ısı pompası destekli kurutma sistemlerine bakıldığında, aşağıdakiler elde edilir:

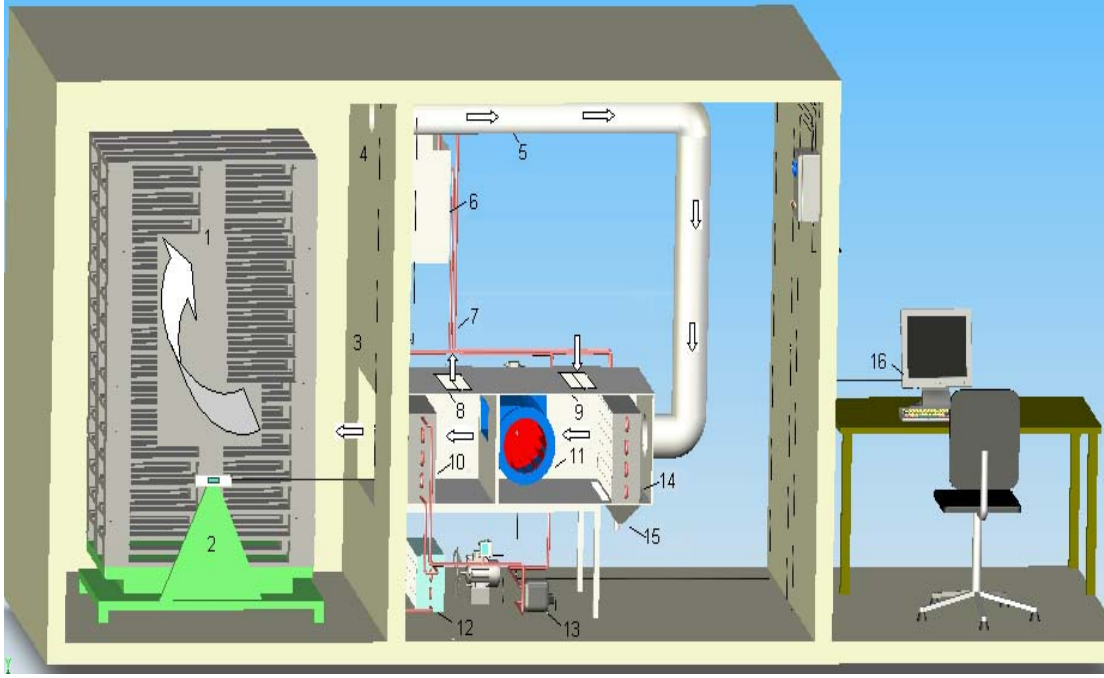
Hawlader [1], güneş enerjili, ısı pompalı kurutma fırını ve sıcak su ısıtıcısı yapmıştır. Coşkun (1993), kurutma işlemlerinde ısı pompası ile enerji tasarrufu sağlanmasını deneysel olarak incelemiştir. Kurutma havasının ısı pompasının yoğunlaştırıcısında ısıtılmasının fuel-oil ile ısıtılmasının yanında %25 daha verimli olduğunu saptamıştır [2]. Coşkun [3], ısı pompası yardımıyla sürekli kurutma sisteminin simülasyon programını oluşturmuştur. Oktay (1997), ısı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırması. By-pass hava oranı, toplam hava debisi ve egzoz debisinin sistemin performansını etkileyen anahtar parametreler olduğunu belirtmiştir [4]. Rahman ve diğerleri [5], bezelyenin ısı pompalı kurutucuda kuruma kinetiğini ve desorpsiyon izotermini oluşturmuştur. Hawlader ve Jahangeer [6], güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutucunun ve su ısıtıcısının performansını araştırmıştır. Teeboonma ve diğerleri [7], ısı pompalı meyve kurutucularının optimizasyonunu yapmıştır. Braun ve diğerleri [8], ısı pompalı hava çevrimli kurutucuların enerji verimliliği analizini yapmıştır. Oktay ve Hepbaşlı [9], mekanik ısı pompalı bir kurutucunun performans değerlendirmesini yapmıştır. Chua ve diğerleri [10], ısı pompalı kurutucularda son gelişmeleri ve gelecekteki eğilimleri incelemiştir. Chua ve diğerleri [11-13], ısı pompalı kurutucuda tarımsal ve deniz ürünlerini (mantar, meyveler ve istiridye) kurutmuştur. Prasertsan ve diğerleri (1997, 1998a), ısı pompalı kurutucuda tarımsal gıdaları kurutmuştur. Isı pompalı kurutucuların yüksek nem miktarına sahip materyaller için daha uygun olduğunu ifade etmişler [14,15]. Strommen ve diğerleri [16], ısı pompalı kurutucuda deniz ürünlerini (balık) kurutmuştur.

Bu çalışmada ise, orman ürünlerinden kavak ve çam keresteleri ısı pompası destekli bir kurutucuda kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Isı pompalı kurutucu hiçbir ek kaynağa gereksinim duymadan 40 °C'lik kurutma havası sıcaklığını sağlamıştır. Literatüre bakıldığında ısı pompalı kurutucuların en azından 40 °C'lik kurutma havası sıcaklığını sağlamak için ek bir enerji kaynağına gereksinim duyduğu görülecektir. Bu kurutucularda nem alma ile birlikte yapılan sürekli soğutma işlemi kurutma havası sıcaklığını önemli ölçüde düşürmektedir. Kerestelerdeki toplam ağırlık değişimi oluşturulan düzenek ile bilgisayar ekranından takip edilebilmiştir. Bu şekilde ulaşılmak istenen son nem miktarına ± 1 (%)'lik bir hata ile ulaşılmıştır. Teorik olarak

hesaplanan kurutma süresi ile deneysel olarak bulunan kurutma süreleri karşılaştırılarak, teorik hesaplamada iyileştirme yapılmıştır.

2. DENEY DÜZENİĞİNİN AÇIKLANMASI (THE EXPLAIN OF EXPERIMENTAL SYSTEM)

Yazarlar tarafından tasarlanan ısı pompalı kurutma sistemi, şematik olarak Şekil 1' de gösterilmiştir. Kurutucu enerji kaynağı olarak ısı pompasının yoğunlaştırıcısından "10" faydalanacaktır. Kurutma havası sıcaklığının artması ile birlikte yoğunlaştırıcı "10" ısı atmakta zorlanacağından dışarıya bir de yardımcı yoğunlaştırıcı "12" konulmuştur. Sistemde sıcaklık kontrolü yoğunlaştırıcı çıkışına (kurutma fırını girişi) monte edilen bir termostat vasıtası ile yapılacaktır. Kurutma için uygun görülen sıcaklığa ulaşıldığında termostat kompresörü ve yardımcı yoğunlaştırıcıya ait fanı devreden çıkartacaktır. Yoğunlaştırıcıdan "10" kurutma havasına atılan ısı, depo içerisine "6" konulan ısı pompası sisteminin buharlaştırıcısında "6" sudan çekilecektir. Isı pompası sistemi bu ısı denge şekliyle "hava- su ısı pompası" sistemi olarak adlandırılabilir. Kompresör "13" çalıştığı sürece kurutma havasına yoğunlaştırıcıdan ısı atımı ve depo içerisinde bulunan buharlaştırıcı vasıtasıyla sudan ısı çekimi devam edecektir. Depo içerisine bir de düşük sıcaklık termostatu monte edilmiştir. Isı pompası sisteminin buharlaştırıcısı vasıtasıyla sudan çekilen ısı belirli bir seviyeye ulaştığında termostatin pompayı çalıştıracığı, düşük sıcaklıktaki depo "6" suyunu santral içerisindeki ısı değiştiricilerinden geçireceği düşünülmüştür. Kurutma havası içerisindeki keresteden alınan nem, çiy noktası altındaki ısı değiştiricisi yüzeyinde yoğunlaşacaktır. Nem alma yöntemi bu şekliyle "havanın çiy noktası altındaki bir yüzeyde neminin alınması" ifadesiyle adlandırılabilir. Fakat sistem santral girişinde bağıl ve özgül nemi düşük olan dış havadan dış hava klapesi "9" yardımı ile bir miktar hava alarak bunu iç hava ile karıştıracaktır. Dolayısı ile sıcak ve nemli olan iç havanın özgül ve bağıl nemi düşecek sıcaklığı bir miktar azalacaktır. Sıcaklıktaki azalma tekrar yoğunlaştırıcıda telafi edilebilecek düzeylerde olacaktır. Yoğunlaştırıcı girişinde dışarıdan alınan hava miktarı kadar hava ise yine dışarıya karışım havasından iç hava klapesi "8" ile atılacaktır. Sistem bu şekliyle "dış hava karışım, ısı pompası destekli kurutma fırını" olarak adlandırılır. Kurutucuda kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyeti ve belirsizlikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Kurutma fırını 4 temel kısım ve 3 çevrimden oluşmaktadır. Bunlar kurutma odası, ısı pompası sistemi, duyarğa (sensör) bağlantıları, kanallar ve bağlantı borularıdır. Çevrimler ise soğutucu akışkan, hava ve su çevrimleridir.



1. Kereste istifi 2. Load cell 3. Kurutma odasına giriş havası 4. Kurutma havası dönüş havası 5. Dönüş havası kanalı 6. Soğuk su deposu 7. Isı pompası sisteminin boruları 8. İç hava çıkış klapesi 9. Dış hava giriş klapesi 10. Yoğuşturucu 11. Fan 12. Yardımcı yoğuşturucu 13. Kompresör 14. Soğuk yüzeyli ısı değiştiricisi 15. Yoğuşma kabı 16. Bilgisayar ve kontrol kartları

Şekil 1. Isı pompalı kurutma sisteminin şematik görünüşü (The schematic appearance of heat pump dryer)

Çizelge 1. Ölçü aletlerinin hassasiyeti ve belirsizliği (Sensitivity of the measurement equipments and uncertainty)

Cihaz	Marka	Hassasiyet	Belirsizlik
Sıcaklık sensörü	Elimko	0-40 °C ± 0.5 °C	± 0.49 °C
Bağıl nem sensörü	Elimko	10-90 RH ± 2 RH (%)	± 1.87 RH (%)
Ağırlık ölçer	Hbm	± 0.2 kg	± 0.60 kg

3. BELİRSİZLİK ANALİZİ (UNCERTAINTY ANALYSIS)

Belirsizlik analizi verilen bilgilerin doğruluk sınırlarını belirler. Kurutucuda kullanılan 3 ölçüm cihazının standart sapmaları göz önünde bulundurularak belirsizlikleri Eşitlik 1-5'den hesaplanmış ve Çizelge 1'de verilmiştir.

$$X_M = \frac{1}{N} \sum X_i \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{(N-1)} \sum (X_i^2 - X_M^2) \quad (2)$$

$$s = \sqrt{v} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R a_i^2 \cdot S_i^2} \quad (5)$$

Eşitliklerde “ X_M ” gözlemlerin aritmetik ortalaması, “ X_i ” yapılan gözlemler, “ N ” gözlem sayısı, “ a ” hassasiyet, “ S ” standart sapma, “ V ” varyans “ U ” belirsizliktir [17,18].

4. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Ağaç malzemenin tam kuru kütlelerinin başka bir ifadeyle, içerisindeki nem miktarının bulunmasında değişik yöntemler olmasına karşın, en doğru ve kesin sonuç veren metot, fırında kurutma metodudur. Ağaç malzeme (103 ± 2) °C’ de kurutma fırınında kurutulur ve kurutma numune parçaları 4 veya 6 saatlik aralarla tartılır birbirini izleyen iki ağırlık ölçümü arasında kütle

farkının her bir deney parçası için % 1' den az olması halinde tam kuru ağırlığa gelmiş kabul edilir. Bu metot ile tam kuru ağırlığın bulunmasında kullanılan tartının en az 0.01 gr hassasiyette olması gerekir.

Tam kuru madde miktarına göre (kg su/kg kuru madde) ağaç malzeme içerisindeki nem miktarı (M) aşağıdaki bağıntıdan hesaplandı:

$$M = \frac{YA - KA}{KA} \quad (6)$$

Burada "YA" kerestelerin kurutma işlemine başlanmadan önceki ağırlığı, "KA" kerestelerin tam kuru ağırlığıdır.

Ağaç malzemenin kurutma süresi aşağıdaki bağıntıdan hesaplandı :

$$S_k = \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln U_a - \ln U_e) \cdot \left(\frac{d}{25}\right)^{1.5} \cdot \frac{65}{T} \cdot \left(\frac{1.5}{v}\right)^{0.6} \quad (7)$$

Ağaç malzemenin kurutma süresi tam olarak hesaplanamayan çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar, ağacın başlangıç nemi, kerestenin kalınlığı, kurutma havası sıcaklığı, hava hızı, kerestenin biçiliş yönü, kesintiler, kurutma fırınının yapısı ve ağacın türü olarak sıralanabilir [19].

Burada , $1/\alpha$ kurutulan kerestenin özgül kütlesine bağlı bir katsayıdır ve Çizelge 2'de verilmiştir. U_a ve U_e kerestenin başlangıç ve sonuç nem (%) miktarlarıdır. "d", mm olarak kerestenin kalınlığıdır. Eşitlik 7'de verilen "65/T" ifadesindeki "65" sabit bir sayı olup, "T", °C olarak kurutma havası sıcaklığıdır. " v_{ist} ", (m/s) olarak istif üzerindeki hava hızıdır. $(d/25)^{1.5}$ değeri için Çizelge 3'den faydalanılır. " $1.5/v_{ist}^{0.6}$ " değerleri için ise Çizelge 4'den faydalanılabilir.

Bu bilgiler kullanılarak toplam kurutma süresinin hesaplanmasında Eşitlik 8'den faydalanılmıştır.

$$S_t = S_l + S_k \quad (8)$$

Çizelge 2. " $1/\alpha$ " değerleri (" $1/\alpha$ " values) [19].

Özgül kütle (kg/m ³)	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625
$\frac{1}{\alpha}$	14.70	16.80	18.90	21.00	23.05	25.10	27.20	29.35	31.45	33.50	35.55
Özgül kütle (kg/m ³)	650	675	700	725	750	775	800	825	850	875	900
$\frac{1}{\alpha}$	37.70	39.80	42.00	43.85	46.05	48.15	50.25	52.40	54.30	56.40	58.60

Çizelge 3. " $d/25^{1.5}$ " değerleri (" $d/25^{1.5}$ " values) [19].

Kerestenin kalınlığı (mm)	10	12	15	18	20	22	24	26	28	30	35	40
$\left(\frac{d}{25}\right)^{1.5}$	0.253	0.332	0.465	0.611	0.716	0.826	0.941	1.061	1.185	1.315	1.656	2.024

Çizelge 4. " $1.5/v^{0.6}$ " değerleri (" $1.5/v^{0.6}$ " values) [19].

İstif üzerindeki hava hızı (m/s)	0.6	0.8	1.00	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80
$\left(\frac{1.5}{v_{ist}}\right)^{0.6}$	1.733	1.460	1.276	1.144	1.088	1.041	1.00	0.960	0.927	0.896

Eşitlik 8’de verilen “ S_k ” Eşitlik 7.’den bulunmuştur. “ S_1 ” ısıtma süresi olup;

$$S_1 = d \cdot f_1 \quad (9)$$

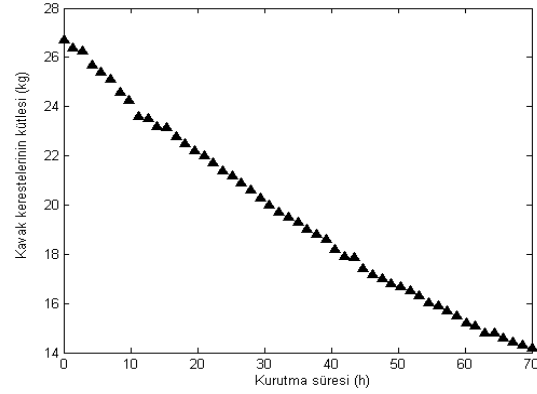
eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada, “d” kereste kalınlığı “mm” ve “ f_1 ” çarpım katsayısıdır. “ f_1 ” çarpım katsayısı, fırın duvarlarının betonarme yada metalden yapılmasına göre değişmektedir. Betonarme fırınlar için bu değer “0.1” dir [19].

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF EXPERIMENT RESULTS)

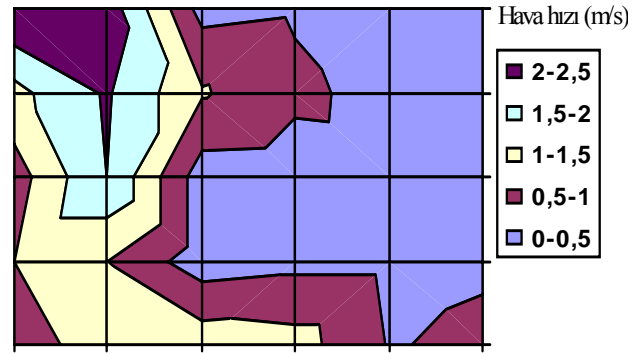
2.5 cm kalınlığında, 1 metre uzunluğunda ve 20 cm genişliğinde kesilerek kurutmaya hazır hale getirilmiş olan kavak kerestelerinin 5 farklı yerinden 2 cm genişliklerinde numuneler alınmıştır. Alınan numuneler 100 ± 3 °C’lik bir fırında 12 saat süre ile kurutulmuştur. Birbirini takip eden iki ölçüm sonunda ağırlık değişiminin % 1’den az olması durumunda numuneler tam kuru kabul edilmiştir. Kavak kerestelerindeki başlangıç nem miktarı tam kuru madde oranına göre Eşitlik 6 ’dan hesaplanmıştır.

Kavak keresteleri için alınan numunelerin ortalama başlangıç nem miktarı 1.28 kg su/ kg kuru madde olarak bulunmuştur. Kavak kerestelerinin bu nem miktarındaki ağırlığı, ağırlık ölçerden 26.7 kg olarak ölçülmüştür. Kavak kerestelerinin istiflenmesinde kullanılan kuru istif çıtalarının ağırlığı 1.5 kg’dır. 1.28 kg su/ kg kuru maddedeki kavak kerestelerinin ağırlığı 25.2 kg olarak bulunmuştur. Yaş ağırlığı ve başlangıç nem miktarı bilinen kavak kerestelerinin tam kuru ağırlığı Eşitlik 6’dan 11.05 kg olarak hesaplanmıştır. Kavak kerestelerinin kurutma sonrası olması istenen son hal nem miktarı %15 olarak belirlenmiştir. Kavak kerestelerinin 0.15 kg su / kg kuru maddedeki ağırlığı Eşitlik 6’dan 12.70 kg olarak bulunmuştur. 25.2 kg kavak kerestesi 1.28 kg su/ kg kuru madde başlangıç nem miktarından 0.15 kg su/ kg kuru madde nem miktarına kadar kurutulduğunda 12.70 kg gelmelidir. Ağırlık ölçer vasıtası ile bilgisayardan okunacak değer 1.5 kg tam kuru istif çıtaları ile birlikte 14.20 kg olacaktır. Şekil 2’deki grafikte kavak kerestelerinin zamana bağlı olarak kütle değişimi grafiği verilmiştir. Kavak kerestelerinin kurutma süresinin hesaplanmasında Çizelge 5’de belirtilen ağaç türünün özellikleri kullanılmıştır.

İstif üzerindeki hava hızı kerestelerin istiflenme şekline göre farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden istifin değişik bölümlerinden hava hızları ölçülerek istif üzerindeki hava hızının dağılım haritası çıkarılmıştır. Şekil 3’de istif üzerindeki kurutma havası hızının dağılımı görülmektedir.



Şekil 2. Kavak kerestelerinin zamana bağlı olarak kütle değişimi (Weight change of poplar versus drying time)

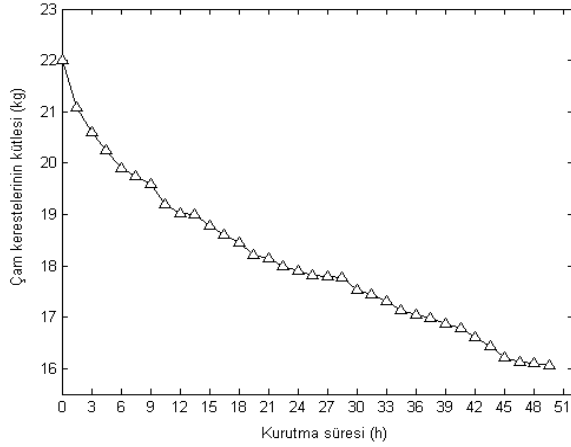


Şekil 3. Kereste istifleri üzerindeki havanın düzey haritası (Air velocity contour map on timber stack)

Verilen kavak kerestesinin özelliklerine göre Eşitlik 7’den kurutma süresi hesaplanmıştır. Eşitlik 9’da verilen “ S_1 ” ısıtma süresi olup 2 saat olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 7’den de kurutma süresi, 63.14 saat olarak bulunmuştur. Toplam kurutma süresi ise Eşitlik 8’den 65.14 saat olarak bulunmuştur. Isı pompalı kurutucu 16.09.2005 tarihinde saat 11:00’ den 19.09.2005 saat 9:00’a kadar çalıştırılmış, toplam kurutma işlemi 70 saat sürmüştür.

Benzer eşitlikler çam kerestelerinin kurutulması işleminde de uygulanmıştır. Çam kerestelerinin zamana bağlı olarak kütle değişimi oluşturularak Şekil 4’de gösterilmiştir. Çam kerestelerinin kurutma süresinin hesaplanmasında da Çizelge 5’deki bilgiler kullanılmış ve kavak kerestelerinin kurutma süresinin hesaplanmasındaki benzer işlemler tekrarlanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonrasında kurutma süresi 53.68 saat olarak bulunmuştur. Kurutma fırını 15.08.2005 tarihinde saat 14:00’de çalıştırılmış, 17.08.2005 tarihinde saat 16:00’da durdurulmuştur. Toplam çalışma süresi 50 saat olmuştur. Başlangıç nem miktarı fazla olan kavak kerestelerinin kurutma süresinin başlangıç nem miktarı daha az olan çam kerestelerine göre daha uzun sürdüğü Çizelge 5’de görülmektedir.



Şekil 4. Çam kerestelerinin zamana bağlı olarak kütle değişimi (Weight change of pine versus drying time)

Çizelge 5. Kavak ve çam kerestelerinin özellikleri (The properties of poplar and pine timbers)

Ağaç türü	Kavak	Çam
Kereste kalınlığı (mm)	20	20
Özgül kütle (kg/m ³)	420	480
Başlangıç nem miktarı (kg su/ kg kuru madde)	1.28	0.60
Son nem miktarı (kg su/ kg kuru madde)	0.15	0.15
Kurutma havası sıcaklığı (°C)	42	42
Kereste istifleri üzerindeki ortalama hava hızı (m/s)	0.8	0.8
Kurutma süresi (saat)	50	70

Kavak kerestelerinin kurutulması işleminde kurutma süresinin hesaplanmasında kullanılan Eşitlik 8 ile bulunan kurutma süresi 65.14 saat olmuştur. Bu işlem deneysel olarak ise 70 saat sürmüştür. Kurutma süresinin bulunmasında kullanılan eşitliğe bakıldığında kurutma havasının hızı ve sıcaklığı eşitlikte bulunmasına karşın kurutma havasının nemi bir etken olarak bulunmamaktadır. Kurutma süresine göre kurutma havasının nemi bir etken katsayı olarak Eşitlik 10'a eklenmiştir.

$$S_t = 112.726 - 0.03424 \cdot BN_{kavak} \cdot \left[S_t + \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln U_a - \ln U_e) \cdot \left(\frac{d}{25} \right)^{1.5} \cdot \frac{65}{T} \cdot \left(\frac{1.5}{v} \right)^{0.6} \right] \quad (10)$$

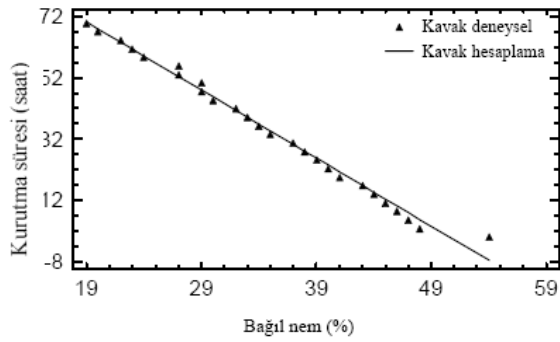
$$S_t = 72.4682 - 0.0300 \cdot BN_{çam} \cdot \left[S_t + \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln U_a - \ln U_e) \cdot \left(\frac{d}{25} \right)^{1.5} \cdot \frac{65}{T} \cdot \left(\frac{1.5}{v} \right)^{0.6} \right] \quad (11)$$

Eşitlik 10' da “ S_t ” kavak kerestelerinin kurutma süresini, “BN” ise kurutma havası bağıl nemini ifade etmektedir. Kurutma işlemi boyunca kerestelerdeki nem azaldıkça kerestelerden havaya olan nem difüzyonu da azaldığından kurutma havası bağıl nemi de azalmıştır. Kavak kerestelerinin kurutma havasının bağıl neminin kurutma süresine göre değişimi Şekil 5'de gösterilmiştir. Kurutma havası bağıl neminin kurutma süresine göre değişimi STATGRAPHIC IV.I (Windows için) programında kurutma süresinin hesaplanmasında kullanılan Eşitlik 10 ile çoklu regresyon analizi yapıldığında kurutma süresi $R^2 = 0.990$ doğrulukta model, lineer olarak bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen kurutma havası bağıl nem değeri Eşitlik 10'da yerine konularak kurutma süresi bulunabilmektedir. Hesaplanan ve deneysel verilerin değişimi Şekil 5'de gösterilmiştir. Kurutma süresinin bulunmasında kullanılan Eşitlik 8 ile ısı pompası destekli kereste kurutucusu deneylerinde elde edilen veriler ışında iyileştirme yapılarak Eşitlik 10 ve Eşitlik 11 elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen kurutma süresi ile Eşitlik 10'dan elde edilen kurutma süresinin karşılaştırılması kavak keresteleri için Şekil 6'da gösterilmiştir. Çam kerestelerinin kurutulması işleminde kullanılan Eşitlik 8 ile bulunan kurutma süresi ise 53.68 saat olarak bulunmuştur. Bu işlem deneysel olarak 50 saat sürmüştür. Kavak kerestelerinin kurutma süresinin hesaplanması işleminde olduğu gibi Eşitlik 8 kurutma süresinin kurutma havası bağıl nemi ile ilişkilendirildiğinde Eşitlik 11'e ulaşılmıştır. Denklik kurutma süresini $R^2 = 0.9769$ doğrulukla hesaplamaktadır. Çam kerestelerinin kurutulması deneylerinde kurutma havası bağıl neminin kurutma süresine göre değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Deneysel kurutma süresi ile hesaplanan kurutma süresinin karşılaştırılması ise Şekil 8'de görülmektedir.

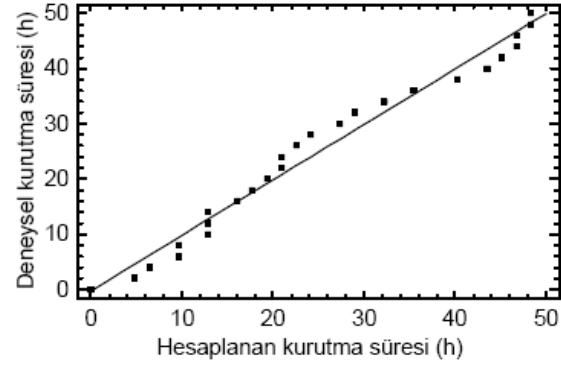
Kurutma süresinin bulunmasında kullanılan eşitlikler ve sürenin hesaplanmasındaki belirsizlik Çizelge 6'da verilmiştir. İyileştirme yapılmadığı durumdaki eşitlik ile yapıldıktan sonraki eşitliklerin belirsizlikleri karşılaştırıldığında, iyileştirme yapıldıktan sonra belirsizliğin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Ayrıca iyileştirme yapılan eşitliklerdeki hata değeri azaldıkça belirsizlikte azalmaktadır.

Çizelge 6. Kurutma süresinin bulunmasında kullanılan eşitlikler ve belirsizlikleri
(Equations used in determining of drying time and uncertainty)

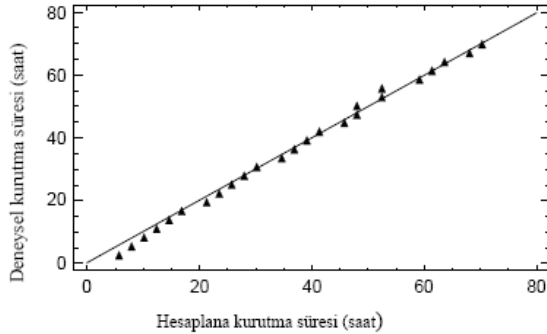
Eşitlik	Belirsizlik	R ²
$S_k = \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln U_a - \ln U_e) \cdot \left(\frac{d}{25}\right)^{1.5} \cdot \frac{65}{T} \cdot \left(\frac{1.5}{v}\right)^{0.6}$	± 3.999 h	0.4446
$S_t = 112.726 - 0.03424 \cdot BN_{kavak} \cdot \left[S_I + \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln U_a - \ln U_e) \cdot \left(\frac{d}{25}\right)^{1.5} \cdot \frac{65}{T} \cdot \left(\frac{1.5}{v}\right)^{0.6} \right]$	± 0.750 h	0.9900
$S_t = 72.4682 - 0.0300 \cdot BN_{çam} \cdot \left[S_I + \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln U_a - \ln U_e) \cdot \left(\frac{d}{25}\right)^{1.5} \cdot \frac{65}{T} \cdot \left(\frac{1.5}{v}\right)^{0.6} \right]$	± 1.1950 h	0.9769



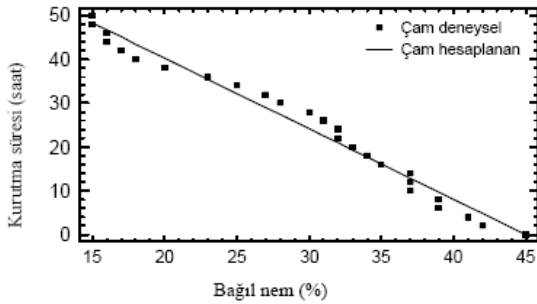
Şekil 5. Deneysel kurutma süresi ve hesaplanan kurutma süresinin kurutma havası bağıl nemine göre değişimi (Variation of experimental drying time and predicted drying time versus relative humidity of drying air)



Şekil 8. Çam keresteleri için deneysel kurutma süresi ve hesaplanan kurutma süresinin karşılaştırılması (Comparison of experimental drying time and predicted drying time for pine)



Şekil 6. Kavak keresteleri için deneysel kurutma süresi ve hesaplanan kurutma süresinin karşılaştırılması (Comparison of experimental drying time and predicted drying time for poplar)



Şekil 7. Deneysel kurutma süresi ve hesaplanan kurutma süresinin kurutma havası bağıl nemine göre değişimi (Variation of experimental drying time and predicted drying time versus relative humidity of drying air)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Isı pompası destekli kereste kurutucusunda kavak ve çam kerestelerinin kurutma süreleri deneysel olarak analiz edilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Yapılan deneyler sonucunda bulunan kurutma süreleri teorik hesaplar ile karşılaştırılarak hata ve belirsizlik analizleri yapılmıştır.
- Deneysel kurutma süresi ile teorik hesaplamalar arasındaki fark Eşitlikte 7'de kullanılan kurutma havası hızının istifin farklı bölümlerinde değişiklikler göstermesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.
- Eşitlik 7'de kullanılan hava hızı istif üzerindeki ortalama hava hızıdır. Kereste istifleri üzerindeki hava hızının homojen olması ile kurutulan kerestelerin kuruma oranları arasındaki farkta azalmış olacaktır.
- Eşitlik 7 ve 8 STATGRAPHIC IV.I bilgisayar programı ile çoklu regresyon analizi yapılarak iyileştirilmiştir, böylece Eşitlik 10 ve 11 lineer bir değişim olarak bulunmuştur.
- Isı pompası destekli kereste kurutucusunda kurutma havası şartlarının aynı olması durumunda Eşitlik 10 ve 11 kavak kerestelerinin kurutulmasında $R^2 = 0.990$, çam kerestelerinin kurutulmasında ise $R^2 = 0.976$ doğrulukta kurutma süresini vermektedir.

- Isı pompası destekli kurutucuda kurutma işlemine başlanmadan önce hesaplanan kurutma süresi ile birlikte, kurutma işleminin ne zaman sonlandırılacağı yaklaşık olarak hesap edilebilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne 07/2003-19 kodlu projeye vermiş oldukları destekten ötürü teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Hawlader, M., N., A., 9, Engineering Drive, Department of Mechanical Engineering, National of Singapore, 185-193, 2003.
2. Coşkun, S., **Kurutma İşlemlerinde Isı Pompası İle Enerji Tasarrufu Sağlanmasının İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1993.
3. Coşkun, S., **Isı Pompası Yardımıyla Sürekli Kurutma Sisteminin Simülasyonu**, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
4. Oktay, Z., "Isı Pompası Destekli Bir Kurutucunun Performansına Etkiyen Etkenlerin Araştırılması", **Tesisat Kongresi**, 1997.
5. Rahman, M., S., Perera, C., O., Thebaud, C., "Desorption Isotherm and Heat Pump Drying Kinetics of Peas", **Food Research International**, Cilt 30, No 7, 485-491, 1998.
6. Hawlader, M., N., A., Jahangeer, K., A., "Solar Heat Pump Drying and Water Heating in the Tropics", **Solar Energy**, Cilt 80, Issue, 5, 492-499, 2006.
7. Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S., "Optimization of Heat Pump Fruit Dryers", **Journal of Food Engineering**, 59, 369-377, 2002.
8. Braun, J., E., Bansal, P., K., Groll, E., A., "Energy Efficiency Analysis of Air Cycle Heat Pump Dryers", **International Journal of Refrigeration**, 25, 954-965, 2002.
9. Oktay Z., Hepbaşı A., "Performance Evaluation of a Heat Pump Assisted Mechanical Opener Dryer", **Energy Conversion and Management**, 44, 1193-1207, 2003.
10. Chua, K., J., Chou, S., K., Ho, J., C., Hawlader, M., N., A., "Heat Pump Drying: Recent Developments and Future Trends", **Drying Technology**, Cilt 20, No 8, 1579-1610, 2002.
11. Chou S.K., Hawlader M.N.A., Ho J.C. and Chua K.J.. 1998a. On the Study of a Two-Stage Heat Pump Cycle for Drying of Agricultural Products. Proceedings of the ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology Phitsanulok Thailand. June 3-5, 1998.
12. Chua K.J., Chou S.K., Hawlader M.N.A. and Ho J.C..(1998b) A Two-Stage Heat Pump Dryer for Better Heat Recovery and Product Quality, **Journal of the Institute of Engineers**, Singapore, 38(6), 8-14, 1998.
13. Chua K.J., Mujumdar A.S., Chou S.K., Hawlader M.N.A. and Ho J.C. Heat Pump Drying of Banana, Guava and Potato Pieces: Effect of Cyclical Variations of Air Temperature on Convective Drying Kinetics and Colour Change, **Drying Technology**, 18(5), 2000.
14. Prasertsan S., Saen-saby P., Prateepchaikul G. and Ngamsritrakul P. Heat Pump Dryer Part 3: Experiment Verification of the Simulation, **International Journal of Energy Research**, 21 pp 1-20., 1997.
15. Prasertsan S. and Saen-saby P.. Heat Pump Drying of Agricultural Materials, **Drying Technology**, 16, 235-250, 1998.
16. Strommen I. and Kramer K. New Applications of Heat Pumps in Drying Process, **Drying Technology**, 12, 889-901, 1994.
17. Adapa, K.P. and Schoenau, J.G., "Re-circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis", **International journal of Energy research**, Cilt.29, pp.961-972, 2005.
18. Çelebioğlu, H.E., **Developing a computer program for evaluating uncertainty of some typical dimensional measuring and gauging device**, Middle East Technical University, Master Thesis, 2005.
19. Ceylan, İ., **Güneş Enerjili Kurutma Fırınında Kurutma Havası Neminin Kontrolü**, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.