

AKIŞKAN YATAKTA KURUTMA PROSESİNİN ENERJİ ve EKSERJİ ANALİZİ

İskender KARAGÜZEL¹, Adnan TOPUZ², Erdal TEKİN³
Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 67100, İncivez, Zonguldak
¹iskender_karaguzel@yahoo.com, ²topuz@karaelmas.edu.tr, ³erdaltekın_86@yahoo.com
Telefon: (0372) 257 40 10 / 1214

ÖZET

Kurutma işlemi günümüzde gıda ve tarım sektöründe oldukça geniş yer tutmaktadır. Ürünlerin kuru olarak tüketime sunulması veya depolanması için mutlaka bir kurutma işleminden geçirilmesi gerekir. Teknoloji ve proses tekniği bakımından çok çeşitli kurutma yöntemleri vardır. Akışkan yataklar toplam ısı ve kütle geçiş katsayılarının yüksek olmasından dolayı yanma ve kurutma işlemlerinde çokça tercih edilir. Bu çalışmada veri eldesi için akışkan yataklı deney seti kullanılmıştır. Çalışma kapsamında fasulye gibi bir tarım ürününün akışkan yatakta kurutulmasının ekserji ve enerji analizi yapılmıştır. Kurutma işlemi üç farklı hava sıcaklıklarında ve iki farklı hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma süreci boyunca ekserji kayıplarının büyüklüğünün ve tipinin belirlenmesi termodinamiğin ikinci kanununun uygulandığı ekserji analizi ile sağlanmıştır. Elde edilen verilerden ekserji veriminin hangi parametrelerden etkilendiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ekserji ve Enerji Analizi, Akışkan Yatak, Kurutma.

ABSTRACT

Nowadays, drying process has been taken an important role in food and agricultural production fields. Drying process is necessary to prepare the products and consumption and storage. There are various of drying process techniques, point of from the technological and process technique. Fluidized bed drying is usually preferred, because of high heat and mass transfer coefficient. In this work, fluidized bed was used in the experiments. The scope of this work is to exergy and energy analyses of fluidized bed drying of bean. Drying process was realized at different temperatures and velocities. Exergy analysis was accomplished to determine type and magnitude of exergy losses during the drying

process by applying the second law of thermodynamics. As a result, exergy efficiency was affected of which parameters was determined.

Keywords: Exergy and Energy Analyses, Fluidized Bed, Drying

1. GİRİŞ

Dünya petrol rezervinin 50 yıl, doğalgaz rezervinin 70 yıl ve kömür rezervinin ise 150 yıl sonra tükeneceği tahmin edilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak, alternatif enerji kaynakları üzerindeki araştırmalar yoğunlaşmış ve var olan klasik sistemlerin daha verimli şekilde kullanılması için yeni yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır.

1930' lu yıllar ve 1940' ların başında geniş çaplı araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda akışkan yatakların katı-gaz temasları gerektiren uygulamalardaki avantajlarının saptanması akışkan yatağın önemini artırmıştır. İlk olarak benzin ve diğer petrol bazlı ürünlerin üretimi için akışkan yataklı katalitik ayırıcının geliştirmesi sağlanmıştır. Günümüzde akışkan yataklar dünya çapında birçok endüstride çeşitli prosesler için kullanılmaktadır. Yüksek ısı transferi ve kontrol edilebilme özelliklerinden dolayı akışkan yatak sistemleri gerek yurt içi gerekse de yurt dışında daha çok yanma prosesinde kullanılmıştır. Sonraları çeşitli maddelerin kurutulması için de elverişli olduğu kanaatine varılarak bu amaçla da araştırmalar yapılmıştır.

Akışkan yatak kurutucunun prensibi; havanın, ürün materyalleri arasından ürüne etki eden yerçekimi kuvvetini yenecek kadar yüksek hızla basılarak katı tanecikleri askıda tutmasıdır. Akışkanlaştırılmış yataktaki tanecik yapısındaki maddeler arasından kurutma havası geçirilir. Gaz hızı çok dikkatli ayarlanmalıdır. Toz veya taneli yapıdaki malzeme ile akışkanlaştırma gazı arasında temas çok iyi olduğundan, kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi de etkin şekilde gerçekleşir. Bu mekanizma ile büyük sıcaklık farkları sakıncası olmaksızın malzemelerin kurutulması mümkündür.

Aşağıda akışkan yataklı kurutma proseslerine enerji ve ekserji analizlerinin uygulandığı literatürdeki bazı çalışmalardan kısaca bahsedilmektedir.

Midilli ve Küçük (2001) güneş enerjili kurutma kabini kullanarak kabuklu ve kabuksuz antep fıstıklarının kurutma prosesinin enerji ve ekserji analizini incelemiştir. Termodinamiğin 1. kanununu kullanarak, enerji kullanma oranını ve güneş kolektörlerinden kazanılan enerjinin miktarlarını hesaplamışlar, 2. kanun ile güneş enerjisi ile kurutma prosesi boyunca ekserji kayıplarının büyüklüğünü belirlemiştir.

Syahrul vd. (2002) nemli parçacıkların akışkan yatakta kurutulmasının termodinamik modellemesi üzerinde çalışmışlardır. Akışkanlaşma hızı, hava giriş sıcaklığındaki hidrodinamik ve termodinamik koşulların etkileri ve ilk nem miktarındaki enerji ve ekserji verimlilikleri analiz edilmiştir. Deneylerde mısır ve buğday kullanılmıştır. Buğday için hava giriş sıcaklığının termodinamik verimde güçlü bir etkiye sahip olduğu fakat mısırdaki, hava sıcaklığındaki artışın verimlilikte artışla sonuçlanmadığını belirlemiştir.

Çolak ve Hepbaşlı (2007) ekserji analizini kullanarak tepsisi kurutucu içindeki yeşil zeytinlerin tek katmanlı kurutucudaki performansını değerlendirmişlerdir. Kurutma prosesi dört farklı hava sıcaklıklarında (40, 50, 60, 70 °C) ve %15 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Maksimum ekserji verimini 70 °C'de, kurutma havası kütleli debisi 0,015 kg/s ve 0,0004 kg/s arasında iken elde etmişlerdir.

Martin vd. (2008) çalışmalarında ekserji metodunu uygulayarak ve biomass ile düşük kalitede kömür karışımını kullanarak baloncuklu akışkan yataktaki

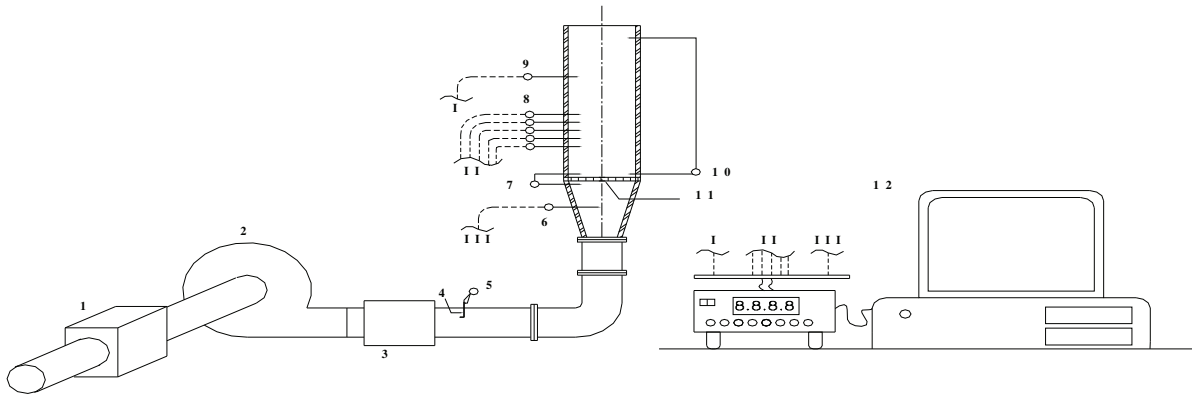
yanmanın teknik uygulanabilirliğini kanıtlamaya çalışmışlardır. Kütle dengesi, enerji dengesi, ve ekserji dengesini dokuz farklı koşullardaki deneylerle fabrikaya uygulamışlardır. Ekserji analizi, bu deneylerde fabrikadaki ekserji yıkımını ve ekserji verimini belirlemeyi sağlamış ve tersinmezliğin tahmini bedeli hesaplanmıştır.

Bu çalışmada akışkan yataklı deney setinde fasulye özelinde tarım ürünleri kurutulmuştur. Kurutma işleminin gerçekleştiği kurutma odasına enerji ve ekserji denklemleri uygulanarak giren, çıkan, kütle transferine harcanan ve yok olan ekserjiler teorik olarak hesaplanmış ve bunların ekserji verimini hangi yönde ve nasıl etkilediğinin tespiti sağlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Akışkan yatakta tahıl ürünü kurutulması için laboratuvar ölçülerinde bir deney seti kurulmuştur. Bu setin şematik resmi şekil 1'de gösterilmiştir. Set; iki adet ısıtıcı (trifaz), fan, frekans invertörü, hava borusu, dağıtıcı elek, akışkan yatak gövdesi, 5 adet sıcaklık ölçer, 2 adet hem sıcaklık hem de nem ölçer, bir adet pitot-statik tüpü, 3 adet basınç farkı ölçer, elektrik panosu, diğer bağlama elemanları ve yalıtım malzemelerinden oluşmuştur.

Akışkan yatakta kurutma deneyi yapılmadan önce bazı ön deneyler yapılmıştır. Bunlar; kullandığımız fasulye için minimum akışkanlaşma hızının belirlenmesi ve pitot tüpünün kalibrasyonu olarak özetlenebilir. Pitot tüpünün kalibrasyonu için fan motorunun devri invertör aracılığıyla değiştirilerek her defasında akışkan yataktaki hava hızı, hem harici anemometre ile ölçülmüş hem de pitot tüpü basınç farkına dayanarak hesaplanmıştır



Şekil 1. Akışkan yataklı deney seti şematik görünüm. (1: Ön ısıtıcı, 2: Fan, 3: Son ısıtıcı, 4: Pitot statik tüpü, 5-7-10: Basınç hücresi, 6-9: Nem sensörü, 8: Sıcaklık sensörleri, 11: Dağıtıcı elek, 12: Veri toplama sistemi ve bilgisayar.)

Materyallerin akışkan yatakta minimum akışkanlaşma hızının tespiti için 5 mm ort. çapta 700 gr fasulye akışkan yatağa konmuştur. Daha sonra fan motorunun devri invertör ile değiştirilerek akışkan yatağın basınç farkı basınç hücrelerinde her 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 ve 50 hertz için okunmuş ve bu devirlerdeki akışkan yatak hava hızı ile karşılaştırılmıştır. Basınç farkı, hava hızı ile beraber başlangıçta artmasına rağmen bir noktadan sonra düşme eğilimine geçer. İşte bu noktada artık akışkan yatak basınç farkı ile ürünün ağırlığı eşit demektir. Bu noktadaki hıza minimum akışkanlaşma hızı denmektedir. Fasulye için akışkanlaşma hızı 3,68 m/s civarlarında bulunmuştur. Deneyler bu minimum hızın biraz üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deney yapmak üzere, set önce 1-2 saatlik bir süre içinde yatak boş iken sistemin rejime girmesi için çalıştırılmıştır. İstenen şartlar (sabit sıcaklık) sağlandıktan sonra materyaller sisteme dahil edilmiştir. Yapay olarak suda nemlendirilen numunelerden başlangıç numunesi dahil 1,5 saatlik dilimde 5,10,20,30,40,50,60,70,80,90. dakikalarda alınan ürünler için toplam 11 adet numunelerin nemleri nem tayin cihazında belirlenmiştir. Tahıl ürünleri çeşitli sıcaklık ve nem değerlerinde deneye tabi tutulmuş ve akışkan yataktaki sıcaklık dağılımı, havanın çıkış sıcaklığı ve nemindeki değişim, materyallerin değişik şartlara göre kuruma özelliklerinin nasıl değiştiği deneyler sonucunda elde edilmiştir.

3. ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Bilim adamları ve mühendisler bir asırdan daha fazla bir sürede enerji kullanan prosesleri değerlendirirken termodinamiğin 1. yasasını kullanmışlardır. Özellikle enerji kaynaklarının fazla olması ve bu kaynaklara olan talep azlığı proseslerde meydana gelen verimsizlikleri göz önüne almamada en büyük etken olmuştur. Ancak dünya nüfusunun artması ve sanayileşme ile birlikte enerji kaynaklarına olan talepte meydana gelen artış, araştırmacıları enerji kullanan prosesleri daha etkin kullanmaya zorlamıştır.

Termodinamiğin 1. yasası enerjinin niceliği ile ilgilidir, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini vurgular. Bu yasa bir hal değişimi sırasında enerjinin bilançosunu tutmak için bir yöntem ortaya koyar. Ancak 1. yasa proseslerin değerlendirilmesinde tek başına yetersiz kalmaktadır. Termodinamiğin 1. yasasının tek başına yetersiz olması bu konuda çalışan araştırmacıları yeni arayışlara itmiştir. Bu yeni arayışlar sonucunda ortaya konulan en etkin değerlendirme yöntemlerinden birisi de ekserji analizidir. Bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi ve iş yapma

olanağının değerlendirilememesi gibi 1. yasada göz önüne alınmayan kavramlar termodinamiğin 2. yasasında dikkate alınmaktadır. Ekserji analizi, termodinamik proseslerin analiz, dizayn ve geliştirilmesinde termodinamiğin 1. ve 2. yasasının birlikte alındığı etkin bir araçtır.

3.1. Termodinamiğin Birinci Kanun Analizi: Enerji Kullanımı

Bu kısımda kurutma havasının davranışının ve enerji değişiminin 1. yasa sayesinde bulunması amaçlanmıştır. Sürekli akış kabulü yapılmış ve basitçe sistemin enerji değişimi, kurutma havasının nemi ve entalpisi ile ilgili denklemlerle belirlenmeye çalışılmıştır. Çözüm esnasında kullanılan, sistemin kütle-enerji modeli şekil 2'de görülmektedir.

Kuru hava için kütlelenin korunumu;

$$\sum \dot{m}_{hg} = \sum \dot{m}_{h\zeta} \quad (1)$$

Nem için kütlelenin korunumu;

$$\sum (\dot{m}_{ng} + \dot{m}_{mn}) = \sum \dot{m}_{n\zeta} \quad \text{ya da}$$

$$\sum (\dot{m}_{hg} \cdot w_g + \dot{m}_{mn}) = \sum \dot{m}_{h\zeta} \cdot w_{\zeta} \quad (2)$$

Burada \dot{m} kütleli debiyi, n, g, ζ, m alt indisleri ise sırasıyla nemi, girişi, çıkışı ve materyali ifade etmektedir.

Enerjinin korunumu;

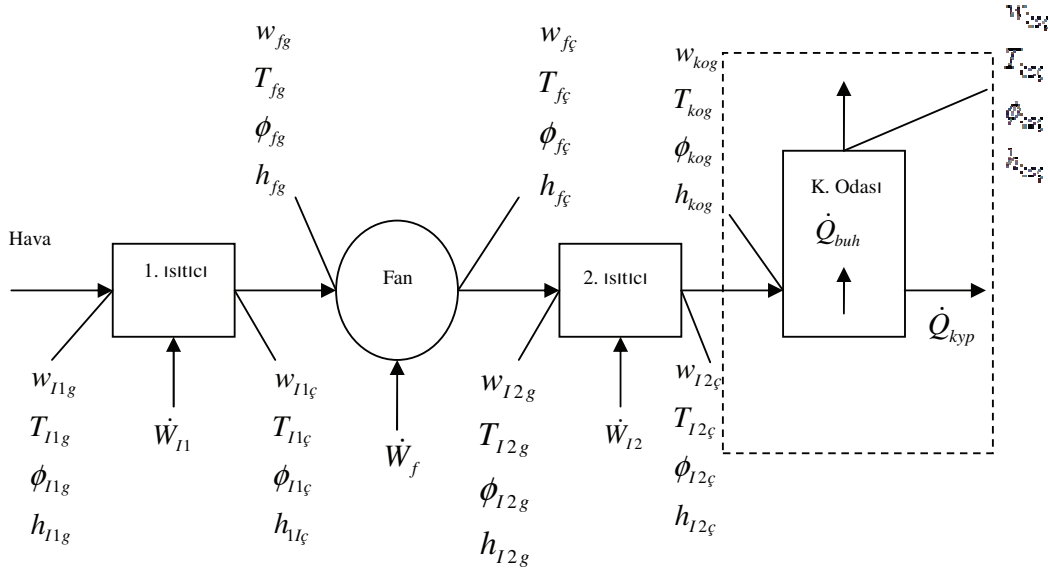
$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{\zeta} \left(h_{\zeta} + \frac{V_{\zeta}^2}{2} \right) - \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} \right) \quad (3)$$

Prosesin diğer kısımlarındaki potansiyel ve kinetik enerjiler ihmal edilirken fundaki kinetik enerji değişimleri hesaplamalarda ele alınmıştır. Tahıl ürünlerinin kurutma işleminin ekserji ve enerji analizi boyunca kuru havanın entalpisi ve bağıl nemi aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

$$\phi = \frac{w \cdot P}{(0,622 + w) \cdot P_{doyb@T}} \quad (4)$$

Burada, w özgül nemi, P atmosfer basıncını, $P_{doyb@T}$ kuru havanın doymuş buhar basıncını göstermektedir. Kuru havanın entalpisi,

$$h = c_{p, kh} \cdot T + w \cdot h_{doyb@T} \quad (5)$$



Şekil 2. Kurutma deney seti için kütle-enerji modeli. (Burada; w , T , ϕ ve h indisleri sırasıyla havanın özgül nemini, sıcaklığını, bağıl nemini ve entalpisini ifade etmektedir. Ig ve $Iç$ alt indisleri sırasıyla ısıtıcı giriş ve çıkışı, fg ve $fç$ alt indisi fan giriş ve çıkışı, kog ve $koç$ alt indisleri ise kurutma odası giriş ve çıkışı ifade etmektedir. \dot{W} birim zamandaki işi, \dot{Q}_{buh} buharlaşmadan dolayı ısı gücü ve \dot{Q}_{kyp} da ısı transferinden dolayı oluşan ısı gücü ifade etmektedir.)

$c_{p, kh}$ kuru havanın özgül ısısını, T kuru havanın sıcaklığını, $h_{doyb@T}$ doymuş buharın entalpisini göstermektedir.

3.2. Fan çıkış koşullarının belirlenmesi

Fan çıkış entalpi için eşitlik 3 enerji denklemi kullanılmıştır.

$$\dot{Q} + \dot{W}_f = \sum \dot{m}_{kh} \left[(h_{fç} - h_{fg}) + \left(\frac{V_{fç}^2 - V_{fg}^2}{2 * 1000} \right) \right] \quad (6)$$

Eşitlik 6'da ısı giriş çıkışı olmadığından $\dot{Q}=0$ alınır ve V_{fg} 'nin ihmal edilmesiyle aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$h_{fç} = \left[\left(\dot{W}_f - \frac{V_{fç}^2}{2 * 1000} \right) \left(\frac{1}{\dot{m}_{kh}} \right) \right] + h_{fg} \quad (7)$$

h_{fg} fanın girişindeki havanın entalpisini, $h_{fç}$ fanın çıkışındaki havanın entalpisini, $V_{fç}$ fanın çıkışındaki havanın hızını, V_{fg} fanın girişindeki

havanın hızını, \dot{W}_f fanın gücünü, \dot{m}_{kh} kuru havanın kütleli debisini ifade etmektedir.

3.3. Isıtıcı giriş ve çıkış koşullarının belirlenmesi

Isıtıcı giriş ve çıkış koşullarını hesaplamak için, fan ve ısıtıcılar arasındaki bağlantı borularında ısı kaybı olmadığı kabul edilerek aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\begin{aligned} w_{I1ç} &= w_{fg} & w_{I2g} &= w_{fç} \\ T_{I1ç} &= T_{fg} & T_{I2g} &= T_{fç} \\ \phi_{I1ç} &= \phi_{fg} & \phi_{I2g} &= \phi_{fç} \\ h_{I1ç} &= h_{fg} & h_{I2g} &= h_{fç} \end{aligned} \quad (8)$$

w , T , ϕ ve h indisleri sırasıyla havanın özgül nemini, sıcaklığını, bağıl nemini ve entalpisini ifade etmektedir. Ig ve $Iç$ alt indisleri sırasıyla ısıtıcı giriş ve çıkışı ifade etmektedir.

Isıtıcının giriş ve çıkış sıcaklıklarını kullanarak, ısıtıcıdan kazanılan faydalı enerji aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_{kh} c_{p, kh} (T_{I_g} - T_{I_c}) \quad (9)$$

3.4. Kurutma odasının giriş koşullarının belirlenmesi

Kurutma odasının giriş koşullarını hesaplamak için ilk olarak kurutma odasının girişindeki kuruyan havanın sıcaklığı ve bağıl nemi tanımlanmalıdır. Ancak sıcaklık ölçümleri ısıtıcı giriş ve çıkışı arasında küçük ısı kayıplarını olduğunu göstermiştir. Sistemdeki bu ısı kayıplarından dolayı, ısıtıcı çıkış koşullarının kurutma odası giriş koşullarına eşit olmadığı kesinlikle vurgulanmalıdır. Bundan dolayı, kurutma odası ve ısıtıcı arasındaki bağlantı borularında meydana gelen ısı kaybı aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{Kb} = \dot{m}_{kh} c_{p, kh} (T_{kog} - T_{I2c}) \quad (10)$$

Kurutma odasının çıkışındaki bağıl nem aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$w_{koç} = w_{kog} + \frac{\dot{m}_{mn}}{\dot{m}_{kh}} \quad (11)$$

$w_{koç}$ ve w_{kog} sırasıyla kurutma odası çıkışı ve girişindeki özgül nemi, \dot{m}_{mn} nemli materyalin kütleli debisini göstermektedir. Kurutma işlemindeki nem alma esnasında kullanılan ısı enerji aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{ko} = \dot{m}_{kh} (h_{kog@T} - h_{koç@T}) \quad (12)$$

3.6. Kurutma odası akış koşullarının belirlenmesi

Düzgün yüzeyli borulardaki akışta Reynolds sayısının 2300 değerinin altında akış laminar, 10^4 değerinin üzerinde ise akış türbülanslı olarak kabul edilir.

$$Re_d = \frac{V.d}{\nu} \quad (\text{Radyal sistemler}) \quad (13)$$

Boru içerisindeki taşınım katsayısının hesaplanmasında, Reynolds sayısı ve yüzeyde oluşan taşınım ısı geçişinin bir ölçüsü olan Nusselt sayısı kullanılmaktadır. Deneyler esnasında Re_d sayıları $2 \cdot 10^4 < Re_d < 2 \cdot 10^6$ arasında bulunmuştur. Bu sonuçtan ötürü akış tam gelişmiş türbülanslı akış olarak kabul edilmiştir. Dairesel kesitli borular içinde tam gelişmiş türbülanslı akışta

Nu_d şöyle hesaplanmaktadır. (Incropera and Dewitt, 1996)

$$Nu_d = \frac{\alpha.d}{\lambda} = 0,023 \cdot Re_d^{4/5} \cdot Pr^n \quad (14)$$

λ akışkanın iletim katsayısını, α havanın ısı taşınım katsayısını, d kurutma odası çapını, Pr ise havanın Prandtl sayısını ifade etmektedir. ($n = 0,4$ ısıtma için, $n = 0,3$ soğutma için alınmalıdır.)

3.7. Termodinamiğin II. Kanun Analizi: Ekserji Analizi

Ekserji analizi kapsamında, kurutma odası giriş ve çıkışındaki toplam ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Kurutma odası için ekserji analizinin temel amacı ölü durumdaki ekserji değerlerini ve prosesdeki ekserji değişimlerini belirlemektir. Açık sistem için herhangi bir T, P şartlarındaki maddenin birim kütlesi başına ekserji ifadesi eşitlik 15'de verilmiştir (Çengel ve Boles, 1999).

$$e = (h - h_\infty) - T_\infty (s - s_\infty) \quad (15)$$

∞ ölü durumu ifade etmektedir. Burada kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserji terimleri ihmal edilmiştir. Toplam ekserji ifadesi;

$$\dot{E}x = \dot{m}_{kh} [(h - h_\infty) - T_\infty (s - s_\infty)] \quad (16)$$

Havanın entalpi değişimi için;

$$\Delta h = c_{p, kh} (T - T_\infty) \quad (17)$$

c_p , sabit kabulü yapılarak; bir hal değişimi sırasındaki entropi değişimi;

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{içentr} \quad (18)$$

Kurutma havası mükemmel gaz olarak kabul edilirse;

$$s - s_\infty = c_p \ln \frac{T}{T_\infty} - R \ln \frac{P}{P_\infty} \quad (19)$$

Basınç değişimi ihmal edilip eşitlik 17 ve 19, eşitlik 16'da yerine yazıldığında ekserji denklemi aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\dot{E}x = \dot{m}_{kh} c_{p, kh} \left[(T - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (20)$$

Giriş ve çıkış ekserjileri kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır. (Burada $T_\infty = T_o$ (çevre sıcaklığı) alınmıştır) Kurutma odası girişindeki havanın ekserjisi;

$$\dot{E}x_{kog} = \dot{m}_{kh} c_{p, kh} \left[(T_{kog} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{kog}}{T_\infty} \right] \quad (21)$$

Kurutma odası çıkışındaki havanın ekserjisi;

$$\dot{E}x_{koç} = \dot{m}_{kh} c_{p, kh} \left[(T_{koç} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{koç}}{T_\infty} \right] \quad (22)$$

Sürekli akışlı sistem göz önüne alınarak incelenen sistem için ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılmıştır (Syahrul vd, 2002; Çolak ve Hepbaşlı, 2007).

$$\sum \left(1 - \frac{T_\infty}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_g \dot{E}x - \sum_\zeta \dot{E}x - \dot{E}x_Y = 0 \quad (23)$$

(23) numaralı denklemden belirtilen \dot{Q}_k sistemle ısı enerji deposu arasındaki ısı transferini, T_k ısı enerji deposunun sıcaklığını ifade etmektedir. Sisteme herhangi bir ısı enerji deposundan ısı giriş çıkışı olmadığından bu terimler de ihmal edilmiştir.

Sistemde iş olmadığından $\dot{W} = 0$ alınır ve $\dot{E}x_Y$ ise ekserji yok olumunu (tersinmezliği) belirtmektedir.

Tüm sistem için, eşitlik 23 düzenlendiğinde;

$$\sum \dot{E}x_Y = \sum \dot{E}x_{kog} - \sum \dot{E}x_{koç} \quad (24)$$

Ekserji yok olumuna (tersinmezliğe) ($\dot{E}x_Y$) sebep olan faktörlerden, çevre ortama doğru ısı transferinden dolayı ekserji kaybı ($\dot{E}x_{kyp}$) ve kurutma odası içerisindeki buharlaşan nemin kütle transferinden dolayı ekserji kaybı ($\dot{E}x_{buh}$) denklemleri aşağıda belirtilmiştir.

$$\dot{E}x_{kyp} = \left[1 - \frac{T_\infty}{T_s} \right] \dot{Q}_{\text{ısı}} \quad (25)$$

Kurutma odasından (radyal sistem) çevre ortama doğru gerçekleşen ısı transferi;

$$\dot{Q}_{\text{ısı}} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\frac{1}{2\pi r_1 L \lambda_1} + \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi k L} + \frac{1}{2\pi r_2 L \lambda_2}} \quad (26)$$

Materyaldeki nemin buharlaşmasıyla oluşan kütle transferinden dolayı gerçekleşen ekserji;

$$\dot{E}x_{buh} = \left[1 - \frac{T_\infty}{T_m} \right] \dot{Q}_{buh} \quad (27)$$

T_m materyalin ortalama sıcaklığını, \dot{Q}_{buh} buharlaşmadan dolayı gerçekleşen ısı transferini ifade etmektedir.

$$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_n h_{fg} \quad (28)$$

\dot{m}_n havadaki nemin kütleli debisini, h_{fg} buharlaşan suyun gizli ısıyı ifade etmektedir. Netice olarak, ekserji verimi, aşağıdaki eşitlik (29) ile ifade edilir.

$$\eta_{Ex} = 1 - \frac{\dot{E}x_Y}{\dot{E}x_{kog}} \quad (29)$$

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

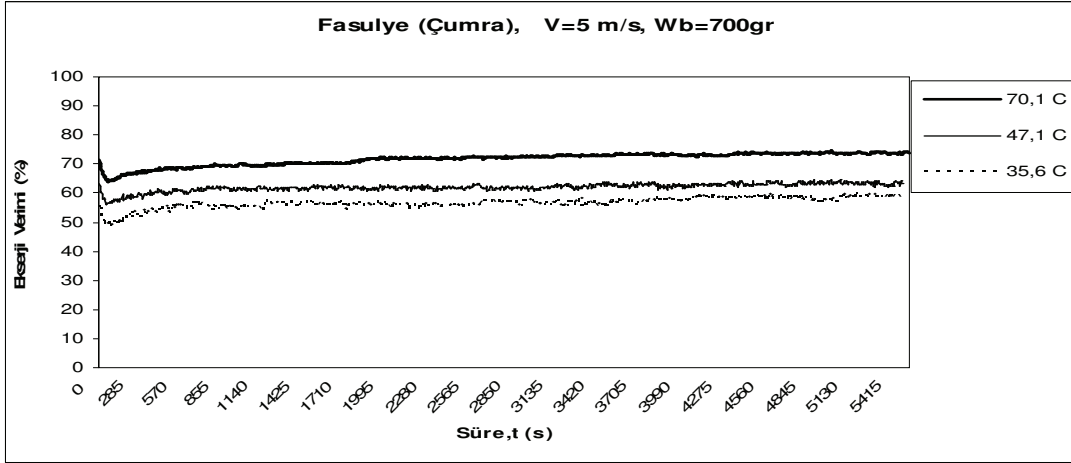
Akışkan yatakta kurutma işleminde; ortam sıcaklığının 11,9-14,98 °C ve kurutma havası sıcaklığının 35,6-70,1 °C arasında, akışkan yataktaki hava hızının 5-6,2 m/s arasında olduğu ve 700 gr sabit miktardaki Konya yöresine ait fasulye için yapılan deney verileri ve analiz sonuçları aşağıda belirtilmektedir.

Ekserji veriminin kurutma havası sıcaklığı ve hızı ile nasıl değiştiğini görmek üzere şekil 3 ve 4 incelenebilir. Şekil 3'de; ekserji veriminin sıcaklıklar arttıkça yükseldiği gözlemlenmektedir.

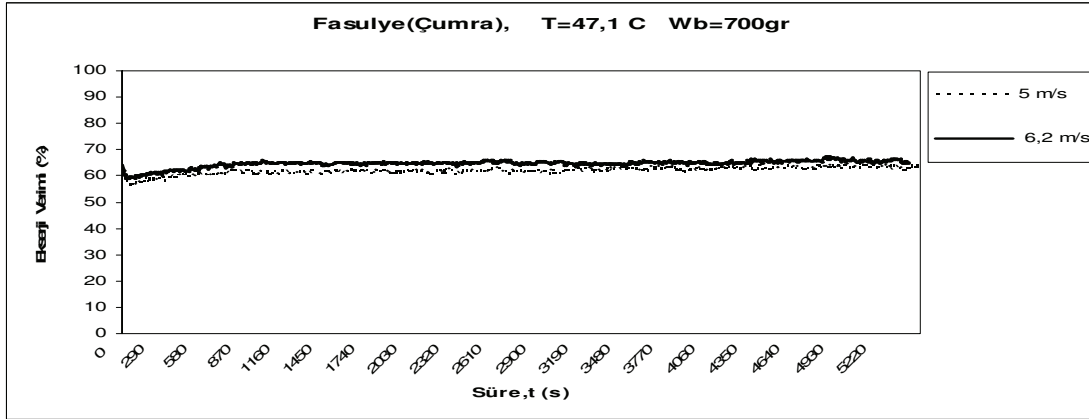
Bunun nedeni, sıcaklığın artmasıyla $\dot{E}x_{buh}$ değerinin artmasının verimi pozitif yönde etkilemesidir. Ekserji veriminin kurutma havasının hızı ile doğru orantılı olarak ancak çok az etkilendiği şekil 4'de görülmektedir.

Şekil 5'de ekserji yok olumunun (tersinmezliğin) kurutma havası sıcaklığına göre nasıl değiştiği gösterilmektedir. Sıcaklığın artmasının, ekserji yok olumu sebeplerinden olan kütle transferi, ısı transferi, sürtünmeler vb. gibi faktörleri artırdığı tespit edilmiştir.

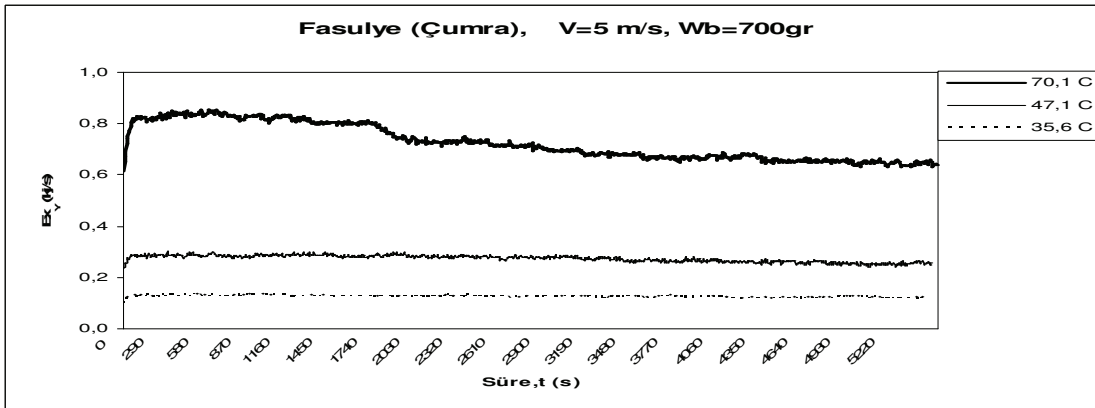
Fasulyenin kurutma deneyinde kurutma havası sıcaklığının artmasıyla kurutma hızının arttığı, fakat kurutma havası hızının artmasının prosesi pek fazla etkilemediği tespit edilmiştir



Şekil 3. Kurutma havası hızının 5 m/s olduğu deney şartları için ekserji veriminin zamanın bir fonksiyonu olarak sıcaklığa bağlı değişimi.



Şekil 4. Kurutma havası sıcaklığının 47,1°C olduğu deney şartları için ekserji veriminin zamanın bir fonksiyonu olarak hıza bağlı değişimi.



Şekil 5. Kurutma havası hızının 5 m/s olduğu deney şartları için ekserji yok olumu (tersinmezliğin) (\dot{X}_y) zamanın bir fonksiyonu olarak sıcaklığa bağlı değişimi.

Kurutma odasında materyalin neminin buharlaşmasıyla oluşan kütle transferinden ötürü ekserji kaybı değerinin ($\dot{E}x_{buh}$) kurutma havası sıcaklığı ve hızı ile doğru orantılı olduğu görölmüştür.

Ekserji verimi incelendiğinde ise; bu değerin yine kurutma havası sıcaklığı ve hızı ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan, verim değerinin aynı kurutma havası sıcaklığında (47,1°C) fasulye deneyleri için %56-65 arasında deđiştđi analiz edilmiştir.

Ekserji analizi bütünüyle incelendiğinde, sürtünmeler ve diğer kayıpların neden olduğu ekserji yok olumunun (tersinmezlik) buharlaşmaya harcanan ve ısı kaybına giden ekserji değerlerinden yüksek olduğu görölmektedir.

Kurutma odasına giren ekserji miktarının kurutma odasından çıkışta fasulye için %43 azaldığı ekserji analizi sonucunda belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

Çengel Y.A., Boles M.A., Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, McGraw Hill-Literatür, İstanbul, Türkiye, 1999.

Çolak N., Hepbaşlı A., Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer, *Journal of Food Engineering*, 80 1188-1193, 2007.

Incropera F.P., Dewitt D.P., Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri (çeviri), Literatür Yayınları, 4. baskı, İstanbul, Türkiye, 1996.

Martin C., Miguel A., Villamanan C. R., Chamorro J. O., Cabanillas A., Segovia J.J., Low-grade and biomass co-combustion on fluidized bed: exergy analysis, *Energy*, 31 330-344, 2008.

Midilli A., Küçük H., Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio, *Energy*, 28 (2003), 539-556, 2001.

Syahrul S., Dinçer I., Hamdullahpur F., Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles, *International Journal of Thermal Sciences*, 42, 691-701, 2002.