soğutma dünyası

ISI GERİ KAZANIMLI MEYVE-SEBZE KURUTUCU TASARIMI

Doç. Dr. Hüseyin BULGURCU
Önder Fan Ltd. Şti.
AR-GE Danışmanı

ÖZET

Meyve ve sebzelerin kurutulması bu ürünlerin kullanım ömrünü uzattığı gibi, kullanımını ve nakliyesini pratik hale getirir, üretici ve tüketici açısından fiyat avantajı sağlar. Ürünlerin kurutulması için çok farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de sıcak hava akımına yerleştirilen tepsi kurutmadır. Bu yöntemdeki büyük handikap birçok yöntemde olduğu gibi yükselen enerji maliyetleridir. Bu enerji maliyetini azaltmak için ısı geri kazanımlı kurutucular geliştirilmiştir. Bu yöntem ile enerji maliyetleri %75 oranında azaltılabilir. Bu çalışmada ısı geri kazanımlı kurutucuların ilke ve tasarım esasları üzerinde durulmuş olup bu amaçla bir hesaplama yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım kullanılarak bilinen birçok meyve ve sebze için dilimleme kalınlığına ve hava hızına bağlı olarak kurutma zamanı hesaplanabilmektedir.

1. GİRİŞ VE KURUTMA TEORİSİ

1.1 Giriş

Dünyada artan gıda fiyatları meyve ve sebzeleri ucuz olduğu hasat döneminde çeşitli yöntemlerle koruyarak daha uzun süre tüketebilme yöntemlerini özendirmektedir. Bu yöntemlerden en geleneksel olanı "kurutma" işlemidir. Yazın çatıda çeşitli yiyecekleri kuruttuklarını büyüklerimizden duyduk. Bu nedenle meyve ve sebzelerin kurutularak muhafazası yüzyıllar öncesine dayanır ve güneşte ve güneşte kurutma tekniklerine dayanır. Dünyadaki bozulabilir ürünlerin %20'den fazlası raf ömrünü artırmak ve gıda güvenliğini desteklemek için kurutulur ve gıda tedarik zincirinde önemli bir rol oynarlar. Geleneksel yöntemlerdeki kalite düşüklüğü ve ürün kirliliği, alternatif kurutma teknolojisinin gelişmesine yol açmaktadır.

Gıda kurutma, bakteri ve enzimlerin büyümesini engelleyen ve onu uzun süre koruyan, sıcak hava sirkülasyonu ile gıdalardan suyun uzaklaştırılması işlemidir. Genellikle kurutma ve nem alma (dehidrasyon) terimleri alternatif olarak kullanılır ancak bu ikisi arasında bir fark vardır. Kurutma, bileşikten serbest suyun uzaklaştırılması anlamına gelirken, nem alma (dehidrasyon) bileşikteki tüm suyun uzaklaştırılmasıdır [1].

1.2 Kurutma Yöntemleri [2]

Kurutucular, kurutma işlemine göre şu şekilde sınıflandırılır:

- **Adyabatik Kurutma:** Katılar, sıcak hava ile doğrudan temas yoluyla kurutulur.

- **Adyabatik Olmayan Kurutma:** Isıyı aktarmak için harici ortam kullanılır.

Yukarıdaki iki işleme dayalı olarak farklı kurutma türleri şunlardır:

▪**Güneşte Kurutma:** Güneşte ve güneşte kurutma antik çağlardan beri yaygın olarak uygulanmaktadır. Taneler asfalt zemine ince tabakalar halinde serilir ve kuruması için güneşe ve rüzgâra maruz bırakılır. Tahıllara ek olarak, meyveler, baharatlar, yağlı tohumlar, sebzeler ve balıklar gibi diğer ürünler, güneşte yayılarak doğal olarak kurutulur. Yavaş ve ucuz bir süreçtir ancak çevresel kirlilik, böcek istilası ve mikrobiyal bozulma düşük kaliteli gıdaya neden olur.

▪**Tepsi Kurutma:** Gıda malzemesi, sığ ağ veya delikli tepsilerde ince bir tabaka halinde düzenlenir. Sıcak hava, homojen hava dağılımını desteklemek için bir kanal ve bölme sisteminden üflenir. Genel olarak, düşük sermaye ve bakım maliyeti gerektirir. Ancak ısı kaynağına yakın yiyeceklerin daha hızlı kuruması kaliteyi etkiler.

▪**Tambur Kurutma:** Bu gıdada ısıtılmış tambur yüzeyine yayılır. Tambur döndüğünde, dönüşün büyük bir kısmı için tambur yüzeyinde yiyecek kalırken, bu süre zarfında kurutma, kurumuş malzeme sıyrıldıktan sonra gerçekleşir.

▪**Akışkan Yataklı Kurutma:** Bu kurutmada ısı, konveksiyon yoluyla gıda malzemesine aktarılır. Sıcak hava, doğrudan yiyeceğin altından yukarı doğru üflenir, bu da gıdanın akmasına ve yerçekimine karşı asılı kalmasına neden olur. Yiyecekleri kurutucudan geçirmeye yardımcı olan yatay bir hava akışı da olabilir.

▪**Dondurarak Kurutma:** Liyofilizasyon olarak da adlandırılır. Süblimasyon ilkesine dayanır. Önce malzemeyi dondurur, ardından basıncı düşürür ve gıdadaki donmuş suyun süblimleşmesi için ısı ekler.

Bunun dört aşaması vardır: Ön arıtma, dondurma, birincil kurutma ve ikincil kurutma. Isıya duyarlı gıda maddelerinin korunması için mükemmel bir yöntemdir. Dondurularak kurutulmuş ürünün sulandırılması da kolaydır. Tek dezavantajı maliyetidir.

▪**Püskürterek Kurutma:** Sıvı veya ince katı malzemeden oluşan bulamaç, haznedeki bir sıcak hava akımına enjekte edilir, su buharlaşır ve ürünün katı kısmı toz halinde kalır. Hava ve katılar paralel veya karşı akım akışında hareket edebilir. İşlem çok hızlı gerçekleştiği için uzun süre ısıya maruz kalması sonucu zarar gören ürünler için mükemmel bir yöntemdir.

▪**Vakumla Kurutma:** Burada nem, vakum yaratılarak uzaklaştırılır. Ürünü çevreleyen suyun buhar basıncının altındaki basıncı düşürmeyi ve kuruma hızını artırmayı içerir. Higroskopik, ısıya duyarlı malzemeler için geniş uygulama alanıdır.

▪**Ozmotik Kurutma:** Meyve ve sebzelerin korunması için basit ve etkili bir yöntemdir. Bu yöntemde genellikle meyvelerde çözünen olarak şeker şurubu, sebzelerde ise salamura olarak kullanılır. Meyve ve sebzelerden suyun ozmoaktif bir çözeltiye alınması ve gıda materyalindeki çözünenin aktarılması işlemidir. Renkleri, aromaları, besin bileşenleri ve aroma maddesi tutma değerleri nedeniyle tercih edilen yöntemdir.

▪**Mikrodalga ile Kurutma:** 915 ve 2450 MHz frekanslı bu elektromanyetik radyasyonda doğrudan gıda ile etkileşime girer ve ısı üretir. Basınç gradyanı ve konsantrasyon gradyanı, nem transferinde önemli bir rol oynar. Çoğunlukla daha iyi kalite için diğer kurutma yöntemleriyle birlikte kullanılır. Bu teknik sorunlardan dolayı gıda endüstrilerinde yaygın değildir.

1.3 Meyve ve Sebze Kurutmanın Avantajları [2]

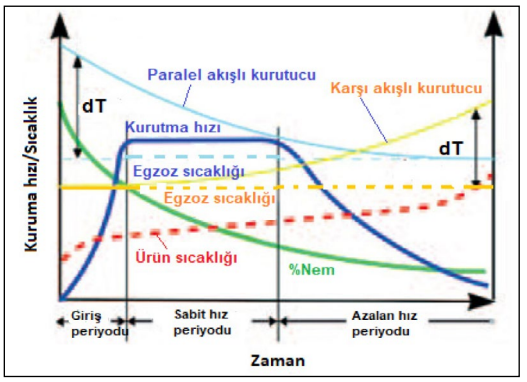
▪Nemi uzaklaştırmak bakteri, maya ve küf oluşumunu durdurur.
▪Enzim faaliyetlerini yavaşlatır
▪Paketleme gereksinimini en aza indirir
▪Taşıma ağırlığını azaltır

1.4 Hangi Yiyecekleri Kurutabiliriz?

Dehidrasyon, gıdaların korunması için mükemmel bir yoldur. Elma, üzüm, incir, çilek, erik, muz, mango gibi meyveler ve soğan, patates, domates, mısır, pancar, havuç gibi sebzeler bütün veya ince dilimler halinde kurutulabilir veya püresi kurutulabilir. Kurutma için saklamadan önce ön işlemlere ihtiyaç duyarlar. Yemeklere lezzet katan farklı otlar uzun süreli kullanım için kurutulur [2].

1.5 Kurutma Eğrisi

Her ürün için belirli bir sıcaklık, hız ve basınç koşulunda kurutma özelliklerini tanımlayan bir kurutma eğrisi vardır.



Şekil 1. Kurutma eğrisi [3]

1.6 Kurutmanın Üç Aşaması

Şekil 1, hemen hemen her ürün için tipik bir kuruma eğrisini temsil etmektedir. Kurutma, açıkça tanımlanabilecek üç farklı periyot veya aşamada gerçekleşir.

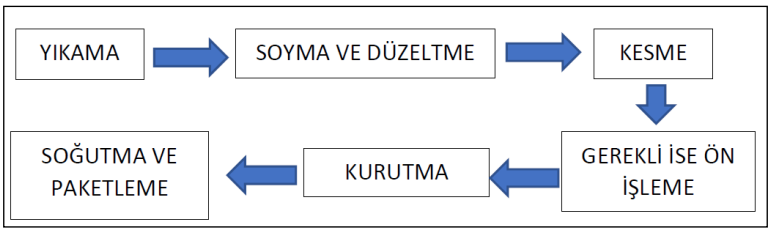
İlk aşama veya giriş periyodu, duyulur ısının ürüne ve içerdiği neme aktarıldığı yerdir. Bu, sonraki işlemlerin gerçekleşmesini sağlayan, giriş durumundan işlem durumuna kadar ürünün ısıtılmasıdır. Bazı durumlarda, ön ısıtma bu aşamayı azaltabilir veya ortadan kaldırabilir. Örneğin, besleme malzemesi bir reaktörden geliyorsa veya besleme bir atık enerji kaynağı tarafından önceden ısıtıldıysa, malzemenin giriş durumu zaten yüksek bir sıcaklıkta olacaktır. Çoğunlukla serbest nemin uzaklaştırılmasıyla bu dönemde buharlaşma hızı önemli ölçüde artar.

İkinci aşama veya sabit hız periyodu sırasında, yüzeylerde serbest nem kalır ve nem içeriği azaldıkça buharlaşma hızı çok az değişir. Bu süre boyunca, kurutma hızları yüksektir ve sonraki kurutma aşamalarına göre daha yüksek giriş havası sıcaklıkları, ürüne zarar vermeden kullanılabilir. Bu süre zarfında ürün sıcaklığında kademeli ve nispeten küçük bir artış vardır.

İlginç bir şekilde, yaygın bir durum, sabit hız periyodunun zaman ölçeğinin bir sonraki aşamadaki kuruma hızını belirleyebilmesi ve etkileyebilmesidir.

Üçüncü faz veya azalan hız periyodu, nemin her bir parçacığın iç boşluklarından dış yüzeye göçünün, kuruma hızını azaltan sınırlayıcı faktör haline geldiği fazdır. Kurutma işlemi düşen hız periyoduna doğru ilerledikçe, nem içeriği kademeli olarak azalır ve nem giderme hızı belirgin şekilde azalır. Evaporatif soğutmanın etkileri azaldığı için ürün sıcaklığı daha hızlı yükselmeye başlar. Sonuç olarak, sıcaklığa duyarlı ürünler termal bozulma tehlikesiyle karşı karşıya kalır. Azalan hız periyodu, istenen son nem içeriğine bağlıdır ve tipik olarak sabit oran periyodundan daha uzundur. Higroskopik ürünler veya yüksek bağlı nem içeriğine sahip ürünler, düşük nihai nem içeriği elde etmek için uzun bir düşme hızı periyoduna sahip olacaktır.

1.7 Meyve ve Sebzelerin Kurutma İşlemi



Şekil 2. Meyve ve sebzelerin kurutulması akış şeması [4]

1.8 Kurumayı Etkileyen Faktörler

- **Sıcaklık:** İdeal sıcaklık 60-70 °C'dir, daha yüksek sıcaklık istenmez.
- **Nem:** Nem kuruma süresini etkiler.
- **Kurutucu Tipi:** Adyabatik ve adyabatik olmayan kurutucular ürünü etkiler.
- **Hava Hızı ve Hava Akış Yönü:** Hava hızı ve hava akış yönü, kuruma süresini ve ürün kalitesini etkiler.
- **Gıdanın Doğası ve Boyutu:** Malzemenin fiziksel, kimyasal bileşimi ve boyutu kaliteyi etkiler.

1.9 Rehidrasyon Oranı

Kurutulmuş ürüne su eklendiğinde taze ürüne benzer bir ürün oluşturur. Kurutulmuş ürünlerin kalite özelliği olarak kullanılır.

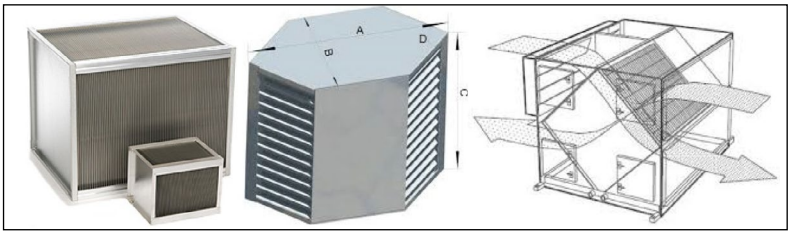
$$Rehidrasyon\ Oranı = \frac{Kuru\ ürün\ ağırlığı}{Rehidrasyon\ sonrası\ ürün\ ağırlığı} \quad (1)$$

Kurutma, gıdaların korunması için en verimli teknolojidir ve vitaminler dışındaki tüm besin maddelerini muhafaza eder. Geleneksel kurutucuların dezavantajlarının üstesinden gelmek için aşırı ısıtılmış buharlı kurutma, darbeli buharlı kurutma, temaslı sorpsiyonlu kurutma, darbeli yanmalı kurutma gibi çeşitli ileri kurutma teknolojileri geliştirilmiştir.

2. ISI GERİ KAZANIMLI TEPSİLİ KURUTUCU

2.1 Giriş

Kurutuculardaki en büyük enerji tüketimi ısıtıcılardan kaynaklanır. Isı yüklü nem havanın dış ortama atılması, giren taze havanın kurutucu iç sıcaklık şartlarına getirilmesi ciddi bir enerji açığı oluşturur. Bu olumsuz durumu azaltmak için plakalı ısı geri kazanım sistemleri kullanılabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Plakalı ısı geri kazanım cihazları [5]

Bu plakalı ısı geri kazanım sistemlerinin etkinliği minimum %38'ler civarında olup %70'lere kadar çıkabilmektedir. Bu cihazlar iki ve üç kademeli kullanılarak etkinlikleri daha da artırılabilmektedir. Ancak buradaki handikap basınç kayıplarının ve dolayısıyla fan enerji tüketiminin artmasıdır.

2.2 Isıl Verimi

Isıl verim anlık olarak ne kadar ısı geri kazanılabileceğinin bir ölçüsüdür. Isıl verim alınan sıcaklık farkının toplam sıcaklık farkına bölümü olarak tanımlanır. İki ayrı hava akımının geçtiği ısı değiştiricide iki ayrı ısıl verim hesaplanabilir:

$$\eta_t = \frac{t_{th2} - t_{th1}}{t_{eh1} - t_{th1}} \tag{2}$$

t_{th1}: Cihaza giren taze hava sıcaklığı [°C]

t_{th2}: Cihazdan çıkan taze hava sıcaklığı [°C]

t_{eh1}: Cihaza giren egzoz havası sıcaklığı [°C]

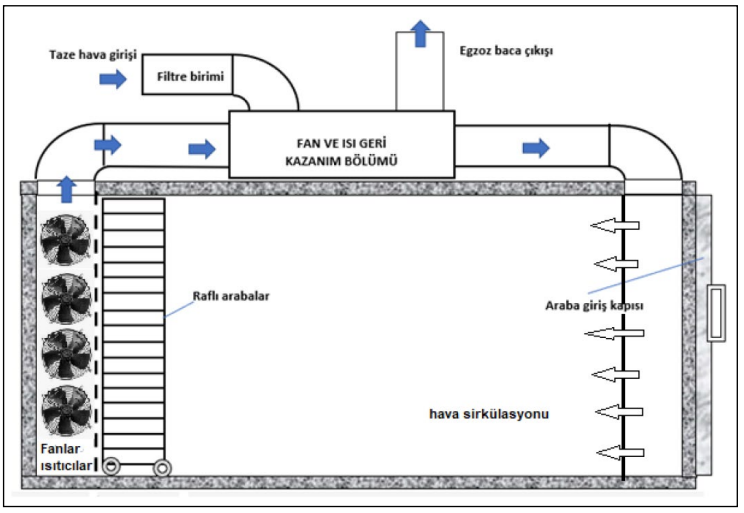
t_{eh2}: Cihazdan çıkan egzoz havası sıcaklığı [°C]

2.3 Prensip Şeması

Isı geri kazanımlı meyve-sebze kurutucunun şematik gösterimi aşağıdaki Şekil 4'te açıklanmıştır.

Bu sistemde raflar üzerinden geçen ana hava akımı eksenel fanlar ile sağlanmakta, fanları üflediği bölme içinde ısıtıcı rezistanslar bulunmaktadır. Hava akımı raflar üzerinde 1 ila 1,5 m/s arasında olacak şekilde ayarlanmaktadır.

Sıcaklık ise 50°C /70°C aralığında seçilebilir. Ortamda oluşan nemi atmak ve taze kuru hava girişi sağlamak için ısı geri kazanımlı havalandırma cihazı kullanılmaktadır.

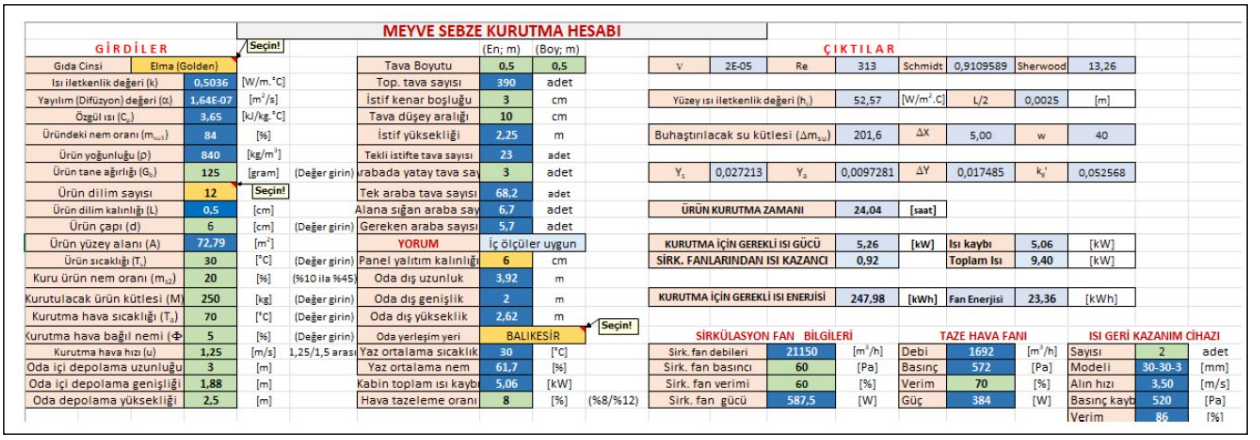


Şekil 4. Isı geri kazanımlı meyve sebze kurutucu şeması

2.4 Kapasite Hesaplamaları

Meyve-sebze kurutucu kapasite hesaplamaları bu ürünlerin dilim kalınlığına bağlı olarak değişmekle birlikte, uygulamada 12/24 saatlik sürelere göre yapılır.

Kurutma işlemleri ürün üzerindeki nemin kütle transferi (difüzyon) ile gerçekleştiğinden psikrometri ve entalpi potansiyelinin çok iyi analiz edilmesi gereklidir. Hesaplamalarda kolaylık sağlayacak şekilde hesaplama sayfaları (Excel) kullanılmaktadır (Şekil 5).



MEYVE SEBZE KURUTMA HESABI

GİRDİLER																		
		Seçin!			(En; m)	(Boy; m)												
Gıda Cinsi	Elma (Golden)			Tava Boyutu	0,5	0,5												
Isı iletkenlik değeri (k)	0,5036	[W/m.°C]		Top. tava sayısı	390	adet												
Yayılım (Difüzyon) değeri (α)	1,64E-07	[m²/s]		İstif kenar boşluğu	3	cm												
Özgül ısı (C_p)	3,65	[kJ/kg.°C]		Tava düşey aralığı	10	cm												
Üründeki nem oranı (m_{ust})	84	[%]		İstif yüksekliği	2,25	m												
Ürün yoğunluğu (ρ)	840	[kg/m³]		Tekli istifte tava sayısı	23	adet												
Ürün tane ağırlığı (G_b)	125	[gram]	(Değer girin)	rabada yatay tava say	3	adet												
Ürün dilim sayısı	12	Seçin!		Tek araba tava sayısı	68,2	adet												
Ürün dilim kalınlığı (L)	0,5	[cm]		Alana sığan araba say	6,7	adet												
Ürün çapı (d)	6	[cm]	(Değer girin)	Gereken araba sayısı	5,7	adet												
Ürün yüzey alanı (A)	72,79	[m²]		YORUM	İç ölçüler uygun													
Ürün sıcaklığı (T_o)	30	[°C]	(Değer girin)	Panel yalıtım kalınlığı	6	cm												
Kuru ürün nem oranı (m_{kr})	20	[%]	(%10 ila %45)	Oda dış uzunluk	3,92	m												
Kurutulacak ürün kütlesi (M)	250	[kg]	(Değer girin)	Oda dış genişlik	2	m												
Kurutma hava sıcaklığı (T_k)	70	[°C]	(Değer girin)	Oda dış yükseklik	2,62	m												
Kurutma hava bağıl nemi (Φ	5	[%]	(Değer girin)	Oda yerleşim yeri	BALIKESİR		Seçin!											
Kurutma hava hızı (u)	1,25	[m/s]	1,25/1,5 arası	Yaz ortalama sıcaklık	30	[°C]												
Oda içi depolama uzunluğu	3	[m]		Yaz ortalama nem	61,7	[%]												
Oda içi depolama genişliği	1,88	[m]		Kabin toplam ısı kaybı	5,06	[kW]												
Oda depolama yüksekliği	2,5	[m]		Hava tazeleme oranı	8	[%]	(%8/%12)											

ÇIKTILAR							
V	2E-05	Re	313	Schmidt	0,9109589	Sherwood	13,26
Yüzey ısı iletkenlik değeri (h_c)			52,57	[W/m².C]	L/2	0,0025	[m]
Buhaştırılacak su kütlesi (Δm_{su})			201,6	ΔX	5,00	w	40
Y_s	0,027213	Y_a	0,0097281	ΔY	0,017485	k_y'	0,052568
ÜRÜN KURUTMA ZAMANI			24,04	[saat]			
KURUTMA İÇİN GEREKLİ ISI GÜCÜ			5,26	[kW]	Isı kaybı	5,06	[kW]
SİRK. FANLARINDAN ISI KAZANCI			0,92		Toplam Isı	9,40	[kW]
KURUTMA İÇİN GEREKLİ ISI ENERJİSİ			247,98	[kWh]	Fan Enerjisi	23,36	[kWh]

SİRKÜLASYON FAN BİLGİLERİ			TAZE HAVA FANI			ISI GERİ KAZANIM CİHAZI		
Sirk. fan debileri	21150	[m³/h]	Debi	1692	[m³/h]	Sayısı	2	adet
Sirk. fan basıncı	60	[Pa]	Basınç	572	[Pa]	Modeli	30-30-3	[mm]
Sirk. fan verimi	60	[%]	Verim	70	[%]	Alın hızı	3,50	[m/s]
Sirk. fan gücü	587,5	[W]	Güç	384	[W]	Basınç kayb	520	[Pa]
						Verim	86	[%]

Şekil 5. Meyve-sebze kurutucu için hesaplama sayfası arayüzü [6]

3. ISI GERİ KAZANIMLI TEPSİLİ KURUTUCU (IGKTK) İÇİN KAPASİTE HESAPLAMALARI

3.1 Isı Kaybı Hesabı

IGKTK cihazının ısı kayıplarını hesaplamak için cihazın bulunduğu ilin hasat dönemindeki (yaz veya sonbahar) ortalama (gündüz + gece) dış sıcaklığı, panelin kalınlığı, panelin yoğunluğu ve ürün ve tepsi taşıyan arabaların kütlesi etkili olmaktadır. Isı kayıpları kabuktan transmisyon ile, servis esnasında oluşan servis (hava değişim) kayıpları, arabaların ve ürünlerin dış ortamdan taşınırken oluşan kayıplar. Özetleyecek olursak;

▪Transmisyon ısı kaybı:

$$\dot{Q}_T = K_u A\, \Delta T/1000 \qquad \text{[kW]} \tag{3}$$

Burada;

K_u: Cihaz kabuğunun ısı geçirgenlik değeri (W/m² °C)

$K_u = 0{,}3478 \frac{W}{m^2 C}$ (6 cm poliüretan panel kalınlığı, 42 kg/m³ yoğunluk için)

$K_u = 0{,}2874 \frac{W}{m^2 C}$ (8 cm poliüretan panel kalınlığı, 42 kg/m³ yoğunluk için)

$K_u = 0{,}2319 \frac{W}{m^2 C}$ (10 cm poliüretan panel kalınlığı, 42 kg/m³ yoğunluk için)

$K_u = 0{,}1943 \frac{W}{m^2 C}$ (12 cm poliüretan panel kalınlığı, 42 kg/m³ yoğunluk için)

$K_u = 0{,}1563 \frac{W}{m^2 C}$ (15 cm poliüretan panel kalınlığı, 42 kg/m³ yoğunluk için)

A: Kabuk (panel) iç yüzeyi (m²)

ΔT: Cihaz içi ve dışı sıcaklık farkı (°C)

▪Servis Isı Kaybı:

$$\dot{Q}_S = V \rho_h\, C_{ph} \Delta T / Kurutma\ Zamanı \tag{4}$$

V: Kabin iç hacmi (m³)

ρ_h: Hava yoğunluğu (kg/m³)

C_{ph}: Havanın özgül ısısı (1,002 kJ/kg. °C)

$Kurutma\ Zamanı$: (saniye)

▪Ürün Isı Kaybı:

$\dot{Q}_{ü} = \dot{m}_{ü}\, C_{pü}\, \Delta T / Kurutma\ Zamanı$ [kW] (5)

$\dot{m}_{ü}$: Cihaza yüklenen ürün kütlesi (kg)

$C_{pü}$: Ürün özgül ısısı (kJ/kg °C)

▪Tepsi ve Araba Isı Kaybı:

$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ara}\, C_{p.ara}\, \Delta T / Kurutma\ Zamanı$ [kW] (6)

$\dot{m}_{ara}$: Boş arabaların toplam kütlesi (kg)

$C_{p.ara}$: Arabaların özgül ısısı (kJ/kg °C)

$\dot{Q}_{tepsi} = \dot{m}_{tepsi}\, C_{p.tepsi}\, \Delta T / Kurutma\ Zamanı$ [kW]

▪Taze Hava Yükü ile Isı Kaybı:

$\dot{Q}_{th} = \dot{V}_{th} \rho_h\, C_{ph} \Delta T$ (7)

$\dot{V}_h$: Taze hava oranı (m³/h) (Kurutucu raf hızına bağlı olarak oluşan sirkülasyon hava debisinin %8 ila %12 arasında seçilebilir.)

▪Toplam Isı Kaybı:

$\dot{Q}_{Top} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_S + \dot{Q}_{ü} + \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{th}$ (8)

Örnek 1. Balıkesir'de yaz mevsiminde çalışacak bir golden elma kurutucunun iç sıcaklığı 70 °C, elma kütlesi 1500 kg, kurutma süresi 24 saat, panel kalınlığı 6 cm, kabin iç uzunluğu 4,88 m, iç genişlik 3 m, iç yükseklik 2,6 m'dir. Ürün %84 nemden %20 neme düşürülecektir. Elmanın özgül ısısı 3,65 kJ/kg C, Araba imalatı için kullanılan 310 paslanmaz çeliğin özgül ısısı 0,5 kJ/kg C, toplam kütlesi 900 kg, alüminyum tepsilerin ölçüleri 50 x 50 cm, sayısı 948 adet, tepsi birim kütlesi 0,35 kg, özgül ısısı 0,95 kJ/kg C, tepsiler üzerinden geçen hava hızı 1,5 m/s olarak kabul edilecektir.

Çözüm

Balıkesir için dış sıcaklık ortalaması (gece ve gündüz): 30°C

Transmisyon ısı kazancı:

$\dot{Q}_T = K_u A\, \Delta T / 1000$=0,3478 x [2x(4,88x3+3x2,6+4,88x2,6)]x(70-30)/1000=0,977 kW

Servis ısı kaybı:

$\dot{Q}_S = V \rho_h\, C_{ph} \Delta T / Kurutma\ Zamanı$ =(4,88 x 3 x 2,6) x 1,164 x 1,002 x (70-30)/(24 x 3600)=0,02 kW

Ürün ısı kaybı:

$\dot{Q}_{ü} = \dot{m}_{ü}\, C_{pü}\, \Delta T / Kurutma\ Zamanı$ =1500 x 3,65 x (70-30)/(24x3600)=2,53 kW

Tepsi ve araba ısı kaybı:

$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ara}\, C_{p.ara}\, \Delta T / Kurutma\ Zamanı$ =900 x 0,5 x (70-30) / (24 x 3600)=0,2 kW

$\dot{Q}_{tepsi} = \dot{m}_{tepsi}\, C_{p.tepsi}\, \Delta T / Kurutma\ Zamanı$ =948 x0,35 x0,95 x (70-30) / (24x 3600)=0,146 kW

Taze hava yükü ile ısı kaybı:

Taze hava yükünün hesaplanabilmesi için sirkülasyon hava debisinin hesaplanması gereklidir:

Sirkülasyon debisi için havanın uzunlamasına hareket ettiği kabul edilir. Bu durumda kısa kenar yüzeyi A=3 x 2,6 =7,8 m², bu yüzeydeki 1,5 m/s hız ile hareket etmesi halinde hava debisi;

$$\dot{V}_h = A.u = 7{,}8\ x\ 1{,}5 = 11{,}7\frac{m^3}{s}$$

Taze hava debisini, sirkülasyon debisinin %10'u olarak seçersek,

$$\dot{V}_{th} = 11{,}7\ x0{,}1 = 1{,}17\frac{m^3}{s}$$

$\dot{Q}_{th} = \dot{V}_{th}\rho_h\ C_{ph}\Delta T$ =1,17 x 1,164 x 1,002 x (70-30) =54,58 kW

Toplam ısı kaybı:

$\dot{Q}_{Top} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_S + \dot{Q}_{ü} + \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{th}$ =0,977+0,02+2,53+0,2+0,146+54,58=58,45 kW

3.2 Hava ile Ürün Kurutma Gizli Isı Yükü Hesabı

%84 su içeren bir yiyecek 70°C'de %20 nem içeriğine kadar kurutulmalıdır. Gıdanın başlangıç sıcaklığı 30°C ise, atmosferik basınç altında kurutma için orijinal malzemenin birim ağırlığı başına gereken ısı enerjisi 2334 kJ/kg'dir.

Ayrıca buharlaştırılacak su için gerekli enerjiyi hesaplayalım:
Örnek 1'deki 1500 kg elma için hesaplama:
İlk nem =%84
1500 x 0,84 =1260 kg nem, 1500-1260=240 kg kuru madde ile ilişkilidir.

Son nem =%20,
1500 x 0,20=300 kg nem 1200 kg kuru madde ile ilişkilidir.

Bu nedenle (300 x 240) / 1200 kg = 60 kg nem, 240 g kuru madde ile ilişkilidir.
1500 kg elma (1260 - 60) kg nem = 1200 kg nem kaybetmelidir.

1500 kg elmayı kurutmak için gerekli ısı enerjisi
= suyu uzaklaştırmak için gizli ısı
=1200 x 2334
= 466800

Tablo 1. Suyun gizli buharlama ısısı ve doyma sıcaklığı

Mutlak basınç (kPa)	Gizli buharlaşma ısısı (kJ/kg)	Doyma sıcaklığı (°C)
1	2485	7
2	2460	18
5	2424	33
10	2393	46
20	2358	60
32	2334	70
50	2305	81
101,325	2257	100
110	2251	102
120	2244	105
200	2202	120
500	2109	152

Buharlaşma gizli ısısı 466800 kJ değeri 24 saatlik süreye (86400 s) bölünürse buharlaştırma için gerekli ısıl güç;

$$\dot{Q}_{üb} = 1200\ x\ 2334/86400 = 32{,}42\ kW$$

Bu yük Örnek 1'deki diğer ısı kaybı yükleriyle toplanarak hesaplanırsa;

$$\dot{Q}_{gtop} = \dot{Q}_{top} + \dot{Q}_{üb}$$
$$= 58{,}45 + 32{,}42 = 90{,}87\ kW \quad (9)$$

Bu ısı gücü oldukça yüksektir. Bu ısıl gücü azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir. Transmisyon, ürün ve servis, tepsi ve araba ısı kayıpları genel toplam içinde %6'yı oluşturmaktadır. Taze hava yükü ise geri kalan %94'ü oluşturmaktadır. Dolayısıyla burada çok büyük bir enerji tasarruf potansiyeli bulunmaktadır.

Uygulamada taze hava yükünden levha tipi ısı geri kazanım cihazları seri olarak bağlanarak çok önemli bir tasarruf potansiyeli oluşturulabilir. Örnek olarak iki ısı geri kazanım cihazı seri bağlandığında %75 gibi verim olduğunu kabul edersek, tasarruf edilen ısıl güç;

$$\dot{Q}_{tas.} = \dot{Q}_{th}\ \eta_{ıgk}$$
$$= 54{,}58\ x0{,}75 = 40{,}935\ kW \quad (10)$$

Bu gücü 24 saatlik elektrik faturası için hesaplarsak;

$$E_{tas} = \dot{Q}_{tas.}\ x\ 24\ h$$
$$=40{,}935 \text{ x } 24 = 982{,}44 \text{ kWh} \quad (11)$$

Elektrik birim fiyatı sanayi için 1,6 TL/kWh kabul edilirse (5 Haziran 2022) günlük tasarruf;

$$M = E_{tas}\ x\ EBF$$
$$= 982{,}44\ x\ 1{,}6 = 1572 \text{ TL olacaktır.} \quad (12)$$

3.3. Kurutmada Isı Transferi Hesapları

Kurutma hızları genellikle, gizli ısınmaları sağlamak için ısı enerjisinin suya aktarılabileceği oranlarla belirlenir, ancak bazı durumlarda kütle transfer hızı (suyun uzaklaştırılması) sınırlayıcı olabilir. Isının aktarıldığı mekanizmaların üçü de - iletim, radyasyon ve konveksiyon - kurumaya girebilir. Mekanizmaların göreceli önemi, bir kurutma işleminden diğerine değişir ve çoğu zaman, bir ısı transferi modu, genel süreci yönetecek ölçüde baskın hale gelir.

Örnek olarak, hava kurutmada ısı transfer hızı şu şekilde verilmektedir:

$$q = h_s A(T_a - T_s) \quad (13)$$

Burada;
q, J/s'deki (1 W) ısı transfer hızıdır,
h_s yüzey ısı transfer katsayısı W/m^2°C'dir,
A ısı akışının gerçekleştiği alan, (m^2)
T_a hava sıcaklığıdır ve T_s kuruyan yüzeyin sıcaklığı, (°C)

Başka bir örnek vermek gerekirse, nemli malzemenin ısıtılmış bir tamburun yüzeyine yayıldığı bir merdaneli kurutucuda ısı transferi, tamburdan gıda maddesine iletim yoluyla gerçekleşir, böylece denklem;

$$q = K_u\ A(T_d - T_s) \quad (14)$$

K_u genel ısı transfer katsayısı olduğunda, T_d tambur sıcaklığıdır (genellikle buharın sıcaklığına çok yakın), T_s gıdanın yüzey sıcaklığıdır (suyun kaynama noktası veya biraz üstü) ve A, tambur üzerinde kurutma alanıdır.

K_u'nun değeri, tambur malzemesinin ve gıda maddesi tabakasının iletkenliğinden tahmin edilebilir.

K_u değerleri, çok iyi koşullar altında 1800 W/m^2°C kadar yüksek ve kötü koşullar altında yaklaşık 60 W/m^2°C'e kadar düşebilir.

Önemli miktarlarda ısının radyasyonla aktarıldığı durumlarda, yiyeceğin yüzey sıcaklığının hava sıcaklığından daha yüksek olabileceği unutulmamalıdır. Işınım ısı transferi için geliştirilen ilişkiler kullanılarak yüzey sıcaklığı tahminleri yapılabilir, ancak kombine radyasyon ve buharlaşmalı soğutmanın gerçek etkisi karmaşıktır. Konveksiyon katsayıları da standart denklemler kullanılarak tahmin edilebilir.

Dondurarak kurutma için, süblimleşmenin meydana geldiği yüzeye enerji aktarılmalıdır. Ancak kurutma yüzeyindeki sıcaklığı donma noktasının üzerine çıkarmayacak oranda temin edilmelidir. Pek çok dondurarak kurutma uygulamasında, ısı transferi esas olarak iletim yoluyla gerçekleşir.

Kurutma ilerledikçe, ısı transfer durumunun karakteri değişir. Kuru malzeme yüzey katmanlarını işgal etmeye başlar ve ısının kurutma bölgesine gittikçe daha yavaş aktarılması için zayıf ısı iletkenleri olan bu kuru yüzey katmanlarından iletim gerçekleşmelidir.

3.4 Kurutucu Verimliliği Hesabı

Kurutmada enerji verimliliği, enerji tüketimi kurutma maliyetlerinin çok büyük bir bileşeni olduğu için açık bir öneme sahiptir. Temel olarak, ihtiyaç duyulan minimum enerjinin gerçekte tüketilen enerjiye basit bir oranıdır. Ancak gıdanın, suyun ve genellikle hava olan kurutma ortamının karmaşık ilişkileri nedeniyle, her biri koşullara uygun olan ve bu nedenle belirli işlemde önemli olan özel özellikleri ortaya çıkarmak için seçilebilen bir dizi verimlilik ölçüsü gerçekleştirilebilir. Verimlilik hesaplamaları, bir kurutucunun performansını değerlendirirken, iyileştirmeler ararken ve belirli bir kurutma işlemi için alternatif olabilecek çeşitli kurutucu sınıfları arasında karşılaştırmalar yaparken faydalıdır.

Suyu yiyeceklerden ayırmak için ısıtma gerekir. Gerekli suyu giderecek minimum ısı miktarı, buharlaşmanın gizli ısısını sağlamak için gerekli olandır, bu nedenle bir verimlilik ölçüsü, bu minimumun işlem için fiilen sağlanan enerjiye oranıdır. Yiyeceklere eklenen bu ısı çoğu zaman ekonomik olarak geri kazanılamayacağından, hissedilir ısı da minimum seviyeye eklenebilir.

Sprey kurutucularda olduğu gibi havada kurutma için bir başka yararlı önlem, kurutucuyu çevreyle ısı alışverişi olmadan adyabatik olarak muamele ederek hava üzerindeki bir ısı dengesine bakmaktır. Daha sonra, kurutulması için yiyeceğe aktarılan faydalı ısı, kurutma havasındaki sıcaklık düşüşüne karşılık gelir ve sağlanması gereken ısı, hava ısıtıcıdaki havanın sıcaklığının yükselmesine karşılık gelir.

Dolayısıyla, bu adyabatik hava kurutma verimliliği, η, şu şekilde tanımlanabilir:

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_a)} \tag{15}$$

T_1:Kurutucuya giriş (yüksek) hava sıcaklığıdır,
T_2: Kurutucudan çıkan hava sıcaklığıdır ve
T_a: Ortam hava sıcaklığıdır.

T_1 ve T_2 arasındaki pay, yani boşluk, verimlilikte önemli bir faktördür.

Örnek 2. Örnek 1.'deki gibi bir kurutucuya giren hava sıcaklığı 70°C, çıkan hava sıcaklığı ısı geri kazanımı olmadan 60°C, ortam sıcaklığı 30°C olduğuna göre kurutucu verimini hesaplayınız. Ayrıca toplam verimleri %78 olan seri bağlanmış iki adet levha tipi ısı geri kazanım cihazı eklendiğinde kurutucu verim kaça yükselir?

Çözüm:

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_a)} = \frac{70-60}{70-30} = 0{,}25\ (\%25)\ \text{(geri kazanımı olmadan)}$$

Isı geri kazanım cihazı verimi;

$$\eta_{IGK} = \frac{(T_2 - T_3)}{(T_2 - T_a)} = 0{,}78 = \frac{60 - T_3}{60-30} \qquad T_3 = 60 - 30x0{,}78 = 36{,}6\ °C$$

Yeni durumda verim

$$\eta = \frac{70-36{,}6}{70-30} = 0{,}835\ (\%83{,}5)$$

Dolayısıyla ısı geri kazanımı ile verim artışı 83,5-25=%58,5 olmaktadır. Ancak ısı geri kazanım cihazlarındaki basınç kayıpları nedeniyle bu verim artışının bir enerji maliyeti ortaya çıkmaktadır.

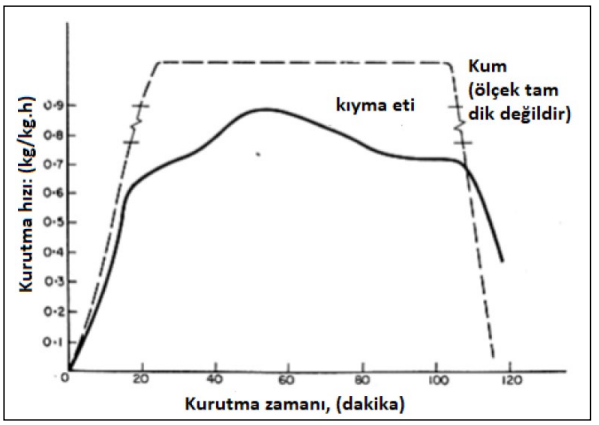
4. HAVA İLE KURUTMA

Havayla kurutmada suyun uzaklaştırılma hızı havanın koşullarına, yiyeceğin özelliklerine ve kurutucunun tasarımına bağlıdır.

Nem, çeşitli derecelerde yapıştırmada tutulabilir. Eskiden, bir yiyecekteki suyun iki kategoriden birine veya diğerine, serbest su veya bağlı su olarak girdiği düşünülüyordu. Bu şimdi aşırı basitleştirme gibi görünüyor ve bu tür net sınırlamalar artık kullanışlı olarak görülmüyor. Su, yoğunluğu yüzey nemini tutan çok zayıf kuvvetlerden çok güçlü kimyasal bağlara kadar değişen kuvvetler tarafından tutulur.

Kurutmada, gevşek tutulan suyun en kolay şekilde uzaklaştırılacağı açıktır. Bu nedenle, nem içeriği azaldıkça kurutma hızlarının düşmesi ve kalan suyun miktarı azaldıkça gittikçe daha güçlü bir şekilde bağlanması beklenir.

Çoğu durumda, suyun önemli bir kısmı gevşek bir şekilde bağlanır. Bu su, kurutma amacıyla yüzeyde serbest su olarak değerlendirilebilir. Çoğunlukla serbest su içeren bir malzeme olan kumun daha fazla bağlı su içeren et ile kuruma hızlarının karşılaştırılması, suyun bağlanmasının kuruma oranları üzerindeki etkisini göstermektedir. Bunlar Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Kurutma hızı eğrileri [8]

Kurutmanın suyun serbest bir yüzeydeymiş gibi davrandığı davranışa sabit oranlı kurutma denir. W kurutulan malzemenin kütlesi ise ve kuru bazda nem içeriği X ise, kuru malzeme kütlesi:

$$w = G\left[{}^{X}/_{(1+X)}\right] \tag{16}$$

ve ilişkili suyun kütlesi X'tir.

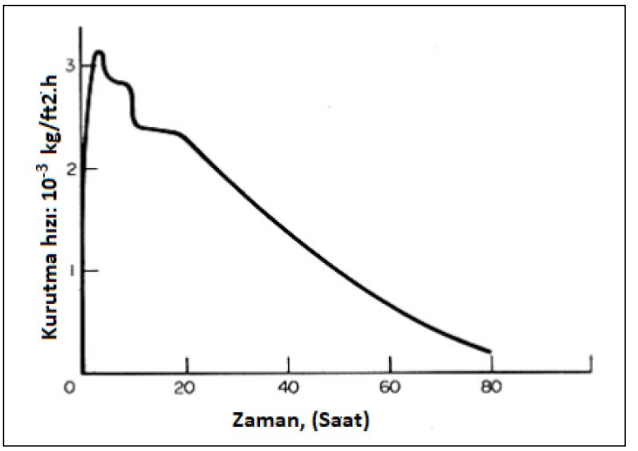
Ardından sabit oranlı kurutma için:

$$dwX\frac{dwX}{dt} = w\frac{dX}{dt} = sabit \tag{17}$$

Ancak gıdalarda, kum gibi geçirimsiz malzemelerin aksine, sabit bir oranda kuruma süresinden sonra suyun daha yavaş çıktığı görülmüştür.

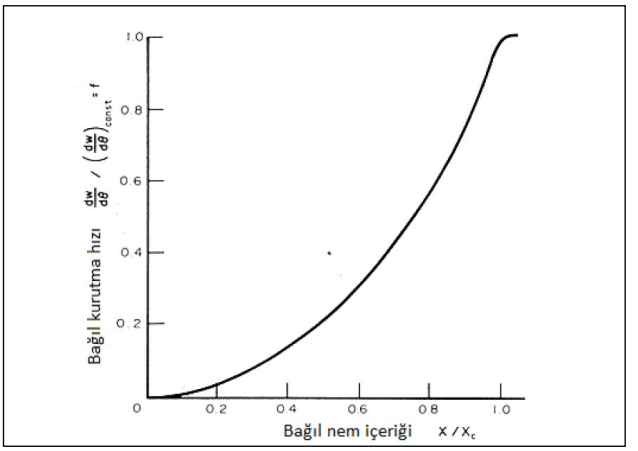
Jason'dan (1958) uyarlanan, balıklar için tam bir kurutma eğrisi Şekil 7'de gösterilmektedir.

Kurutma sıcaklığı düşüktü ve bu, uzun kuruma süresini açıklıyor.



Şekil 7. Balıklar için kuruma eğrisi [8]

Nem sabitinin kritik neme (X / X_c) oranı olarak nem içeriğine karşı sabit oran $(\frac{dw\,X}{dt})/(\frac{dw\,X}{dt})_{sabit}$ değerinin bir yüzdesi olarak kurutma oranını gösteren daha genelleştirilmiş bir kurutma eğrisi, Şekil 8'de gösterilmiş olup şekilde θ zaman için kullanılmıştır.



Şekil 8. Genelleştirilmiş kurutma eğrisi [8]

Sabit kurutma hızından daha yavaş bir hıza geçiş, farklı yiyecekler için farklı nem içeriklerinde meydana gelir. Bununla birlikte, birçok gıda için sabit kurutma oranından değişim, %58-65 bağıl neme sahip hava ile dengede bir nem içeriğinde, yani a_w = 0,58-0,65'te meydana gelir. Bu hız değişiminin meydana geldiği nem içeriği, kritik nem içeriği, X_c olarak bilinir.

Bir diğer önemli nokta da patates gibi birçok yiyeceğin gerçek bir sabit oranlı kuruma süresi göstermemesidir. Bununla birlikte, yavaş ve istikrarlı bir şekilde azalan bir kurutma hızı periyodundan sonra genellikle oldukça keskin bir kırılma gösterirler ve sabit oran kavramı hala yararlı bir yaklaşımdır. Sabit oran döneminin sonu, kurutma hızı eğrilerinin kırılma noktasında $X = X_c$ olduğunda, suyun serbest bir yüzeydeymiş gibi davranmaya son verdiğini ve buhar basıncı farkları dışındaki faktörlerin kurutma oranını etkilediğini gösterir. Daha sonra kuruma hızı düşer ve buna düşme hızı kuruma süresi denir.

Düşme hızı periyodundaki hız kontrol faktörleri, gıda boyunca difüzyona ve su moleküllerinin değişen enerji bağlama modeline bağlı olarak karmaşıktır. Bu bölgedeki gıdaların kurutulması için çok az teorik bilgi mevcuttur ve deneysel kurutma eğrileri, tasarım için tek yeterli kılavuzdur.

4.1 Sabit Kurutma Oranlarının Hesaplanması

Sabit oran periyodunda, su, etkin bir serbest su yüzeyinden buharlaşmaktadır. Malzemenin sıcaklığında herhangi bir değişiklik yoksa ve bu nedenle ona aktarılan tüm ısı enerjisinin suyun buharlaşmasıyla sonuçlanması gerekiyorsa, suyun uzaklaştırılma hızı, ısı transfer hızıyla ilişkilendirilebilir.

Suyun uzaklaştırılma hızı aynı zamanda katıdan ortam havasına kütle aktarım hızıdır. Bu iki - kütle ve ısı transferi - belirli bir dizi koşul için aynı kurutma oranını tahmin etmelidir.

Kurutmanın temelini oluşturan kütle aktarımına bakıldığında, itici güç, yiyecek ile hava arasındaki kısmi su buharı basıncının farkıdır. Bu farkın boyutu, tablolar veya psikrometrik çizelge referans alınarak sıcaklıklar ve koşullar bilinerek elde edilebilir. Alternatif olarak, tahrik kuvveti nem itici kuvvetler cinsinden ifade edilebilir ve bu durumda kütle transfer katsayılarının sayısal değerleri, denklemler gibi kısmi basınç / nem ilişkileri yoluyla diğerlerine bağlanır.

Örnek 3. Kurutma sırasında buharlaşma oranı

Serbest bir su yüzeyinden bitişikteki hareketli hava akımına kütle aktarım katsayısı 0,015 kg/m^{2}s olarak bulunmuştur. Kuru termometre sıcaklığı 40°C ve bağıl nem %40 olan bir hava akımına 28°C sıcaklıkta 1 m^2 yüzeyden buharlaşma oranını ve bu buharlaşmayı etkilemek için gerekli ısı enerjisi besleme oranını tahmin edin.

Grafiklerden, 40°C'de doymuş havanın nemi 0,0495 kg/kg'dir.
40°C ve %40 bağıl nemde havanın nemi = 0,0495 x 0,4
= 0,0198kg/kg
= Y_a

Grafiklerden 28°C'de doymuş havanın nemi 0,0244 kg/kg = Y_s'dir.

İtici kuvvet = $(Y_s - Y_a)$ (18)
= (0,0244 - 0,0198) kg/kg
= 0,0046 kg/kg

Buharlaşma hızı = $k_g' A (Y_s - Y_a)$ (19)
= 0,015 x 1 x 0,0046
= 6,9 x 10^{-5} kg/s

28°C'de suyun gizli buharlaşma ısısı = 2,435 x 10^3 kJ/kg

Metrekare başına ısı enerjisi besleme oranı = 6,9 x 10^{-5} x 2,435 x 10^3 kJ/s
= 0,168 kJ/s
= 0,168 kW.

Kurutma için gerekli oran bilgisini sağlamak için bu tür görünüşte basit ilişkilerin uygulanmasındaki problem, kütle transfer katsayılarının tahmininde yatmaktadır. Isı transferi ile ilgili bölümde ısı transfer katsayılarının tahmini için yöntemler ve korelasyonlar verilmiştir. Bu, kurutma durumuna ve nem giderme oranlarını tahmin etmek için kullanılan ısı aktarım hızlarına uygulanabilir. Tersi de uygulanabilir.

Örnek 4. Hava ile kurutmada ısı transferi

Örnek 3'teki verileri kullanarak, hava akımından su yüzeyine ihtiyaç duyulan ısı transfer katsayısını tahmin edin.

Örnek 3'ten ısı akış hızı = q = 168 W

Sıcaklık farkı = havanın kuru termometre sıcaklığı - yaş termometre sıcaklığı (gıda yüzeyinde)
= (40-28)
= 12°C = $(T_a - T_s)$

Denklem 7.1'den $q = h_c A (T_a - T_s)$ olduğundan
$168 = h_c$ x 1 x 12
h_c = 14 W/m^2°C

Kütle dengeleri de uygulanabilir ve kurutma ve ilgili hesaplamalarda kullanılabilir.

Örnek 5. Havuçların havada kurutulmasında sıcaklık ve bağıl nem

Düşük sıcaklıkta kurutma durumunda, 60°C ve %10 bağıl nemdeki hava, 20 kg/s hava debisinde doğranmış havuç yatağının üzerinden geçirilir. Havuç ağırlığının değişme hızı ile ölçülen havuçtaki suyun buharlaşma hızı 0,16 kg/s ise kurutucudan çıkan havanın sıcaklığını ve bağıl nemini tahmin edin.

Psikrometrik tablodan
60 °C ve %10 bağıl nemde havanın nemi
= 0,013kg/kg

Havuç kurutmadan havaya eklenen nem
= 0,16 kg/20 kg hava
= 0,008 kg/kg

Kurutucudan çıkan havanın nemi
= 0,013 + 0,008
= 0,021 kg/kg

Psikrometrik çizelgeyi takiben, 60°C ve %10 bağıl nemdeki giriş noktasından 0,021kg/kg sabit nem çizgisi ile bu hattın kesişme noktasına kadar olan yaş termometre çizgisi, ortaya çıkan sıcaklık 41°C ve BN %42'dir.

Yaygın olarak karşılaşılan durumlar için ısı transfer katsayılarını tahmin etmek için denklemler kapsamlı olduğundan ve kütle transfer katsayılarından çok daha yaygın olduğundan, ısı transfer hızları Lewis sayısı aracılığıyla kurutma oranlarını tahmin etmek için kullanılabilir. Hava / su sistemi için Le = $(h_c/c_s k_g')$ = 1 olmaktadır.

Kesin olarak, gaz difüzyon teorisinde ortaya çıkan Lewis sayısı $(h_c/c_p k_g')'$ dır, ancak sıradan uygulamada karşılaşılan nem havası için $c_s=c_p$=1,02 kJ/kg°C . Bu nedenle sayısal olarak, h_c (W/m²°C) ve k_g', (kg/m²s), $k_g'= h_c/1000$ ise, hc değerleri, ısı transfer katsayıları için standart ilişkiler kullanılarak tahmin edilebilir.

4.2 Kurutma Azalma Oranı

En yüksek kurutma oranı normalde sabit oran durumudur, daha sonra kurutma ilerledikçe nem içeriği düşer ve suyun gıdanın içinden yüzeye erişimi oranı etkiler ve düşürür. Bu durumda durum, gözlemlenen kuruma oranlarını kontrol eden nem gradyanlarıyla karmaşıktır. Gerçek oranlar, idealleştirilmiş durumda, kritik nem içeriğine kadar devam eden sabit bir oran ve ardından sürekli kurutmada gıda, gıda için denge nem içeriğine yaklaştıkça düşen bir oran gösterilerek ölçülebilir. Bu, Şekil 8'deki kurutma eğrisi ile açıkça gösterilmektedir ve düşük nem içeriklerinde kurutma oranları çok düşük hale gelmektedir. Bu tür eğrilerin gerçek detayı, elbette, kurutma işleminin özel malzemesi ve koşullarına bağlıdır.

4.3 Kuruma Sürelerinin Hesaplanması

Kurutma hızları, deneysel olarak belirlendikten veya teoriden tahmin edildikten sonra, kurutma ekipmanlarının ve operasyonlarının tasarlanabilmesi için kurutma sürelerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Çoğu genel durumda, kurutma hızları, kurutma ilerledikçe zamanla ve malzemenin değişen nem içeriğiyle birlikte kurutucu boyunca değişir. Yani durum karmaşık. Bununla birlikte, çoğu durumda basitleştirilmiş bir yaklaşım faydalı sonuçlar sağlayabilir. Bir basitleştirme, kurutma havasının sıcaklığının ve bağıl neminin sabit olduğunu varsaymaktır.

Bu durumda, sabit oran dönemi için, gıda maddesini kritik nem içeriğine (X_c) (sabit oran döneminin sonuna karşılık gelen ve kurutma hızının altına düştüğü) indirgeyecek olan su miktarını uzaklaştırmak için gereken süre bu nem miktarını orana bölerek hesaplanabilir.

Yani;

$$t = \frac{w(X_0 - X_c)}{(\frac{dw}{dt})_{sabit}} \quad (20)$$

Burada $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{sabit} = k'_g A(Y_s - Y_a)$

ve X_o başlangıç nem içeriği ve X_r hem kuru bazda nihai nem içeriği (bu durumda kritik nem içeriği), w gıdalardaki kuru malzeme miktarı ve $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{sabit}$ sabit kuruma hızıdır . Kurutma oranının çeşitli nem seviyelerinde bir f faktörü kadar azaltıldığı durumlarda, bu aşağıdakileri sağlamak için dahil edilebilir:

$$t = \frac{w\ (X_0 - X_f)}{f.\left(w\frac{dx}{dt}\right)_{sabit}}$$

$$t = \frac{w(X_0 - X_f)}{f\ k'_g\ A(Y_s - Y_a)} \quad (21)$$

ve bu, alt simge f'nin nihai su içeriğini gösterdiği ve f gerçek kurutma hızının serbest yüzey nem durumuna karşılık gelen maksimum kurutma oranına oranını ifade ettiği X_f'ye kadar parça parça entegre edilmelidir.

Örnek 6. Sabit hızda hava ile kurutma süresi

100 kg gıda maddesi, ıslak olarak %80'lik başlangıç su içeriğinden ve 12 m² yüzey alanıyla kurutulur. 120°C kuru termometre ve 50°C ıslak termometre sıcaklıklarında havada sabit oranlı kurutma varsayarak, ıslak esasa göre %50 nem içeriğine kadar kuruması için gereken süreyi tahmin edin.

Kurutucudaki koşullarda yapılan ölçümler havadan gıda yüzeyine ısı transfer katsayısının 18 W/m²°C olduğunu göstermektedir.

Verilerden kuru bazda nem hesaplaması:

X_o = 0,8 / (1 – 0,8) = 4 kg/kg
X_f = 0,5 / (1 - 0,5) = 1 kg/kg

Psikrometrik çizelgeden, Y_s = 0,087 ve Y_a = 0,054kg/kg
Lewis ilişkisinden k_g'= 18 g/m²s = 0,018 kg/m²s
w = 100 (1 – 0,8) = 20 kg

(21) eşitliği kullanılarak

$$t = \frac{w(X_0 - X_c)}{(\frac{dw}{dt})_{sabit}} = \frac{w(X_0 - X_f)}{k'_g\ A(Y_s - Y_a)}$$

= 20 (4 - 1) / [0,018 x 12 x (0,087 - 0,054)]
= 60 / 7,128 x 10^{-3}
= 8417 s
= 2,3 saat (60 kg suyu çıkarmak için).

Düşme hızı periyodu sırasında, yukarıda ana hatları verilen prosedür, belirli malzeme ve kurutucunun koşulları için kurutma eğrisi kullanılarak uzatılabilir. Toplam sürenin doğru bir değerini vermek için, üzerinde kurutma oranının etkin bir şekilde sabit olduğu, çıkarılacak yeterince küçük farklı nem içeriği miktarları seçilmelidir. Denge seviyesinin üzerindeki nem içeriği azaldıkça kurutma hızları azalır ve kuruma süreleri uzar.

Örnek 7. Düşme hızı sırasında kuruma süresi

Devam eden Örnek 7, belirli bir gıda maddesi için, ıslak esasa göre %50 nem içeriğinden, ıslak esasa göre %16'ya kadar toplam kuruma süresini tahmin edin. Kurutma eğrisi, Şekil 8'de gösterilmektedir.

Denklem (21), küçük nem içeriği aralıkları üzerinde uygulanabilir ve sabit oranı Şekil 8'den okunan uygun azaltma faktörü (f) ile çarparak uygulanabilir.

$$\Delta t = w\,(\Delta X) / f\,(dw/dt)_{sabit}$$

$$w = 20\ kg \qquad (dw/dt)_{sabit} = 7{,}128 \times 10^{-3}$$

Bu bir tabloda gösterilebilir. Kurutma boyunca havanın sıcaklığının ve neminin sabit olduğu varsayıldı.

Ayrıca (21) eşitliğinden;

$$t = w\,(X_o - X_f) / f\,k_g'\,A\,(Y_s - Y_a)$$

Tablo 2. Örnek 8 için kuruma zamanının hesaplanması [8]

Nem içeriği X 1.0	0,8	0,6	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,16
w (X_1 - X_2)	4	4	4	2	1	1	0,4	0,2
f (Şekil 8'den)	0,85	0,47	0,24	0,12	0,07	0,05	0,03	0,02
f kg' A (Y_s -Y_a)x10^{-3}	6,06	3,35	1,71	0,86	0,50	0,36	0,21	0,14
t	660	1194	2352	2325	2000	2778	1904	1428
	Σt = 14641 s = 4,65 h							

Bu nedenle toplam kuruma süresi = (2,3 + 4,65) h = 6,95 h $\cong$ 7h

Örnek, nem seviyesinin denge değerine doğru düştüğü için kurutma hızının nasıl yavaşladığını göstermektedir.

Kütle aktarımı denklemleri açısından, nem veya kısmi basınç tahrik kuvveti, denge nem içeriğine yaklaşıldıkça sıfıra meyillidir. Isı transfer denklemleri açısından, yüzey ıslak bir yüzey gibi davranmayı bıraktıktan sonra yüzey sıcaklığı yaş termometre sıcaklığının üzerine çıkar.

Nem seviyesi düşmeye devam ettikçe yüzey sıcaklığı havanın kuru termometre sıcaklığına doğru yükselir, bu da yüzey ısı transferi için sürekli olarak azalan bir sıcaklık itici kuvvetine yol açar.

Bu hesaplama prosedürü, daha karmaşık kurutuculara, bölümlere ayrıldıklarını düşünerek ve kurutma hızı denklemlerini ve bu bölümlere giriş ve çıkış koşullarını sırayla uygulayarak, kurutucudaki tüm durumu oluşturmak için uygulanabilir.▪

KAYNAKLAR

[1]https://discoverfoodtech.com/drying-of-fruits-and-vegetables/
[2]ÇINAR, İnci, Meyve ve sebzelerin kurutulması, https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1189574 (5.05.2022 tarihinde erişildi)
[3]https://www.process-heating.com/articles/86586-the-drying-curve-part-1
[4]https://www.fao.org/3/au111e/au111e.pdf (12.05.2022 tarihinde erişildi)
[5]BULGURCU, H, Havalandırma Tesisatı, 670 Sayfa, Makine Mühendisleri Odası Yayını No:650, Aralık, İstanbul 2015
[6]https://www.huseyinbulgurcu.com/yazilimlar (01.07.2022 tarihinde erişildi)
[7]Richard L. EARLE, 2003, Unit Operations of Food Processing, Chapter 7 Drying

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin BULGURCU

1962 yılında İzmir Kınık'ta doğdu. 1984 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makina Enerji Dalı'ndan Lisans, 1989 yılında M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nden Yüksek Lisans, 1994 yılında aynı Enstitüden Doktora dereceleri aldı. 1995 yılında Y. Doçent, 2013 yılında Doçent oldu. 1994 yılında İngiltere'de mesleki araştırmalarda bulundu. 1995-2012 yılları arasında Balıkesir Meslek Yüksekokulu İklimlendirme ve Soğutma Programı'nda, Ağustos 2012 ila Eylül 2016 tarihleri arasında Balıkesir Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nde çalıştı. Sektörde faaliyet gösteren bazı firmalara danışmanlık yapmaktadır.

soğutma dünyası

ENDÜSTRİYEL HAVALANDIRMA, İKLİMLENDİRME VE SOĞUTMA SEKTÖRÜ PORTALI YAYINDA!

İklimlendirme, Soğutma, Isıtma, Otomasyon, Yalıtım ve Enerji ana başlıkları altında hizmet sunan **Soğutma Dünyası Portalı,** ziyaretçilerin **portal ve sosyal medya hesapları** aracılığıyla sektör paydaşlarının ve firmalarının faaliyetlerine ve haberlerine ulaşmasını, **etkin şekilde iletişim kurulmasını ve güncel bilgiyi hızlı bir şekilde paylaşmayı** hedeflemektedir.
Sektördeki haber, etkinlik ve gelişmeleri **www.sogutmadunyasi.com** adresinden takip edebilir, reklam çalışmaları ile markanıza değer katabilirsiniz.

/sogutmadunyasi /sogutmadunyasi /sogutmadunyasiportali /sogutmadunyasiportali info@sogutmadunyasi.com