



Isı Pompalı Kurutucular Üzerine Bir Araştırma

Gizem BATTAL, Ali Kemal YAKUT*¹, Arzu ŞENCAN ŞAHİN

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Isparta

(Alınış Tarihi: 15.10.2018, Kabul Tarihi: 19.04.2019)

* İlgili yazar: kemalyakut@sdu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Isı pompası
Kurutma
Soğutucu akışkan
COP

Özet: Günümüzde ısı pompalı sistemlerin kullanımı ve kurutmada uygulanması günden güne artmaktadır. Bu nedenle ısı pompası tipi, ısı pompası seçimi ve ısı pompasında kullanılacak soğutucu akışkan cinsi oldukça önemlidir. Çalışmada, hava kaynaklı (HAD), yer kaynaklı (GSHPD), kimyasal kaynaklı (CSHPD) ve hibrit kaynaklı ısı pompalı kurutuculara yer verilmektedir. Güneş enerjisi destekli hava kaynaklı ısı pompalı kurutucular (SAHPD) diğer kurutuculara göre, geliştirilmiş kalite kontrolü, daha az enerji tüketimi, yüksek katsayı performansı ve yüksek ısı verimliliği gibi birçok avantaj sağlamaktadır.

A Review On Heat Pump Dryers

Keywords

Heat pump
Drying
Refrigerant
COP

Abstract: Today, the use of heat pump systems and their application in drying is increasing day by day. For this reason, the type of heat pump, the choice of heat pump and the type of refrigerant to be used in the heat pump are very important. In study, air source (HAD), ground source (GSHPD), chemical source (CSHPD) and hybrid source heat pump dryer are included. Solar assisted air source heat pump dryers (SAHPD), such as improved quality control, lower energy consumption, high coefficient performance and high thermal efficiency have been provide many advantages than the other heat pump dryers.

1. Giriş

Kurutma için ısı pompalarının kullanılması ilgi çekici ve çok pratiktir. Isı pompalı kurutucular yüksek performans katsayısına sahiptir ve ısı pompasının düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi nedeniyle büyük avantaj sağlar. Düşük sıcaklıktaki uygun kurutma işlemleri, kurutulmuş ürünlerin kalitesini arttırmaktadır. Isı pompalı kurutucular, ekonomik şekilde kurutmayı sağlamak ve geleneksel hava ısıtmalı kurutucuların verimliliği arttırmak için kullanılmaktadır. Isı pompalarında kullanılan ve kurutma ekipmanlarından biri olan nem giderici cihazlar; düşük sıcaklıklardaki gizli ısı kazanımı sağlaması ve kurutma havasını aktarabilmesi, düşük maliyetli olması, nemli koşullar altında çalışabilmesi ve minimum çevre kirliliğine neden olması gibi olumlu özelliklerinden dolayı daha fazla dikkate alınmaktadır (Vijaya vd., 2006). Kurutucu verimli bir şekilde çalışıyor ise çıkış havası, ıslak hazne sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ve yüksek nemde olması gerekmektedir. Bu yüzden, kurutma havasında bulunan nem içeriği ve buna bağlı olan gaz entalpisinin çoğu, nem buharındaki gizli ısı ve ısı geri kazanımından oluşmaktadır. Bu yöntemde, ısı pompalı nem gidericileri uygulanmaktadır (Strumitto vd., 2006).

Isı pompalı kurutucuların üç büyük avantajı vardır (Britnell vd., 1994):

1. Düşük sıcaklıklarda kurutma, kaliteyi arttırabilmektedir.
2. Yüksek enerji verimliliği sağlamak için, duyulur ısı ve buharlaşmadaki gizli ısının eldesi gerekmektedir.
3. Kurutma koşulları ve dolayısıyla kuruma hızı, kurutma koşullarından etkilenmemektedir.

Isı pompasının prensibi, soğutma işlem çevrimi ile ilişkili olduğu 100 yıldan daha fazla zamandan beri bilinmektedir. Son otuz yılda, ısı pompası uygulamaları sadece ekonomik nedenlerden dolayı sınırlandırılmıştır (Strumitto vd., 2006). Isı pompaları için gerekli olan elektrik enerjisinin kullanımı diğer enerji türleri kullanımına göre daha pahalıdır. 1970'lerin başındaki enerji krizinin ortaya çıkışı ile endüstriyel uygulamada elektrik kullanımı yerine alternatif enerji kaynaklarını bulmakla ilgili çalışmalara yön verilmiş ve böylece ısı pompalı kurutma uygulamaları sınırlandırılmıştır.

Güneş destekli ısı pompalı kurutucular, endüstriyel kurutmada karşılaşılan zorlukların üstesinden gelebilmekle birlikte enerji tüketimi ve çevresel etkiyi en aza indirerek ürün kalite kontrolünü sağlamaktadırlar. Isı pompalı sistemlerin çalışma esnasında ortaya çıkan gizli ısı için düşük kuruma sıcaklıkları ve dış ortam hava bağımsızlığı nedeniyle kalite kontrollü malzemeler geliştirilmiştir. Daha az enerji tüketimi, ısı pompasının yüksek performans katsayısı ve kurutucunun yüksek ısıl verimlilik sağlayan dizaynı ile sağlanabilmektedir (Strømnen vd., 2004).

2. Isı pompası

Isıl enerji, yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğru akan doğal bir olaydır. Gerçekleşen bu olayda, hiçbir makineye gereksinim duyulmadan kendiliğinden gerçekleşmektedir. Buna karşın, bu olgunun tersi, yani düşük sıcaklıktaki bir ortamdan yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi kendiliğinden oluşmamaktadır. Bu işlem soğutma makineleri ve ısı pompaları adı verilen özel makinelerin kullanımını gerektirmektedir (Çengel ve Boles, 2011). Isı pompası, ısı makinesinin tersi bir çevrime göre çalışan, iş yapılması ile ısıyı soğuk kaynaktan sıcak kaynağa ulaştıran bir makinedir. Isı pompası ve soğutma makineleri aynı termodinamik çevrime göre çalışırlar. Soğutma makinesiyle bir mahallin soğutulması, ısı pompası ile ise bir mahallin ısıtılması amaçlanır (Yamankaradeniz vd., 2009).

2.1. Isı pompası seçimi

Isı pompası seçimi yapılırken bulunduğu binanın yapısı, mimari özellikleri ve yerleşim alanıyla ilgili durumlar göz önüne alınarak karar verilir. Ardından ısıtma/soğutma yükü ve ısı dağıtım sistemi çıkış sıcaklığı ve işletim belirlenerek ısı pompası tipinin seçimi yapılmaktadır. Dört farklı tip ısı pompası mevcuttur. Bunlar; hava-hava, hava-su, su-hava ve su-su ısı pompalarıdır. Isı pompası tipinin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken temel ilkeler mevcuttur. Bu temel ilkeler şunlardır (Erdoğan vd 2006);

1. Isı pompasının enerji verimlilik oranı (EVO) ve performans katsayısı (COP) minimum değerden aşağı olmamalıdır.
2. Isı pompasının ısı değiştiricilerinde maksimum yük kayıpları maksimum ton soğutma kapasitesi için belli değeri geçmemelidir.
3. Değişken hızlı kompresörlü sistemler vb. çok hızlı ünitelerin kullanımı değerlendirilmelidir.
4. Tasarım dışı koşullarda iyi çalışmalıdır.

2.1. Isı pompası için akışkan seçimi

Soğutucular, mekanik buhar sıkıştırımlı çevrimde kullanılan akışkanlardır. Son on yıldır, CFC (kloroflorokarbonlar) ve HFCF (hidrokloroflorokarbonlar) üstün termodinamik ve kimyasal özellikleri nedeniyle soğutma, ısı pompalı kurutma ve iklimlendirme alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Park ve Jang, 2009). Molina ve Rowland 1974 yılında, CFC'lerin kullanımının stratosferik ozon tabakasının yıkımına neden olduğunu belirtti ve o zamandan beri bu durumu incelemek için çeşitli çalışmalar yaptılar (Molina ve Rowland, 1974). Sonuç olarak 1987 yılında yapılan Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nda, ozon tabakasına zarar veren maddelerin üretim ve tüketimini hakkında düzenleme yaptı ve ozon tabakasının yıkımının küresel bir çevre sorunu olduğunun farkına varılması için birçok millet Montreal Protokolü imzaladı. Bu uluslararası antlaşma sonucunda, CFC'ler gelişmekte olan ülkeler için 10 yıl daha kullanımına izin verilirken, gelişmiş ülkelerde Ocak 1996 yılında tamamen kaldırıldı. CFC'lerin boşluğunu doldurmak için; soğutma, iklimlendirme endüstri ve gıda endüstrisi kapsamlı araştırmalar yürütmüştür ve alternatif saf soğutucu akışkanlar bulmak için geliştirme faaliyetlerinde bulunmuşlardır (UNEP, 1987). Piyasada çok sayıda alternatif soğutucu akışkan bulunmaktadır. Tablo 1'de kullanılan bazı akışkanlar ve bunların özelliklerine yer verilmektedir. Bu soğutucuların molekül ağırlıkları, kritik sıcaklıkları, kritik basınç ve güvenlik sınıfları listelenmiştir. Soğutucu akışkanlar için toksisite ve yanıcılık sınıflamaları, altı güvenlik grubundan (A1, A2, A3, B1, B2 ve B3) meydana gelmektedir. Soğutucu akışkanlar için Grup A1 en az, Grup B3 en tehlikeli olarak bilinmektedir.

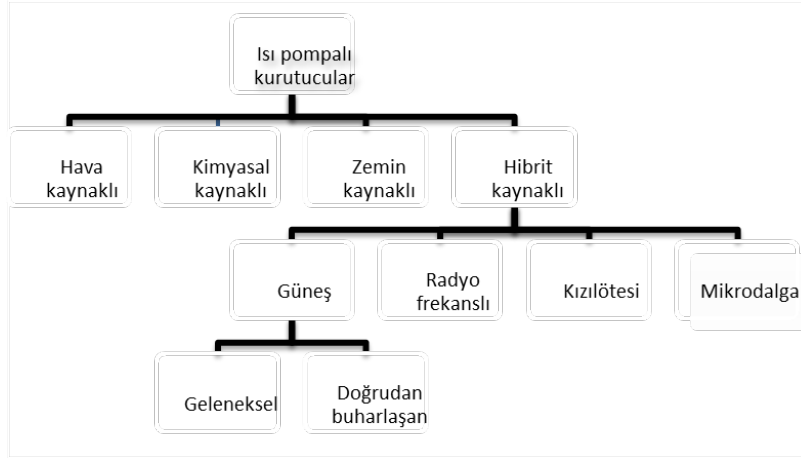
Tablo 1. Bazı soğutucu akışkanlar ve özellikleri (ASHRAE, 2004)

Soğutucular	Kimyasal adı	Kimyasal formülü/Karışım (% kütle)	Molekül ağırlığı	Kritik sıcaklık (°C)	Kritik basınç (bar)	Güvenlik sınıfı
R134a	Etan	CH ₂ FCF ₃	102.0	101.1	40.7	A1
R409a	Karışım	R-22/124/142b (60.0/25.0/15.0)	97.5	109.0	46	A1
R22	Metan	CHClF ₂	86.48	96.1	49.9	A1
R404A	Karışım	R-125/143a/134a (44.0/52.0/4.0)	97.6	72.0	36.9	A1
R500	Karışım	R-12/152a (73.8/26.2)	99.3	215.8	60.5	A1
R502	Karışım	R-22/115 (48.8/51.2)	112.0	177.3	58.2	A1
R407A	Karışım	R-32/125/134a (20.0/40.0/40.0)	90.1	181	65.8	A1
R507	Karışım	R-125/143a (50.0/50.0)	98.9	76.1	37.9	A1
R12	Metan	CCl ₂ F ₂	120.9	117.9	41.3	A1
R717	Amonyak	NH ₃	17.03	132.4	111.5	B2
R290	Propen	CH ₃ CH ₂ CH ₃	44.10	96.8	42.4	A3
R600	Bütan	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	58.1	151.9	37.9	A3
R600A	İzobütan	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	58.1	134.6	36.2	A3
R1270	Propen	H ₃ CH	42.0	91.0	45.5	A3

3. Isı pompasının kurutmada uygulanması

Isı pompası teknolojisinden faydalanamayan birkaç ısıtma ve soğutma sistemi vardır ve bu uygulamaları yaparken önemli ölçüde enerji tüketimine neden olmaktadır. Isı pompaları; ortam havası, yeraltı suyu, yerin kendisi ve ticari uygulamalardan elde edilen serbest veya atık ısıyı, istenmeyen ısı olarak kabul edip geri çevirebilmektir. Isı pompası teknolojisi; ofis, ev, su ısıtma ve her türlü konut tesisatında rahatlığı sağlamak için ısıtma veya soğutma uygulamalarında, yerli ve ticari olarak kullanılmaktadır. Bunlar kurutma, yüzme havuzları ve fabrika üretimi gibi açık alanlarda kullanılırken ticari alanda da kullanımı mevcuttur (Banks, 2012).

Kurutma uygulamaları için yaygın ısı kaynakları; hava, toprak ve kimyasal kaynaklı ısı pompalarıdır. Bunların arasında hava kaynaklı ısı pompaları, kurutma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı pompalı kurutucuların sınıflandırılmasına aşağıda yer verilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Isı pompalı kurutucuların sınıflandırması (Daghigh vd., 2010)

Isı pompalarında performans değerlendirmesi yapılırken verim yerine ısı pompası etkinlik katsayısı (COP) ile belirlenmektedir. Isı pompası etkinlik katsayısı elde edilmek için istenilen ısıtma etkisinin harcanması gereken işe oranı olarak ifade edilmektedir.

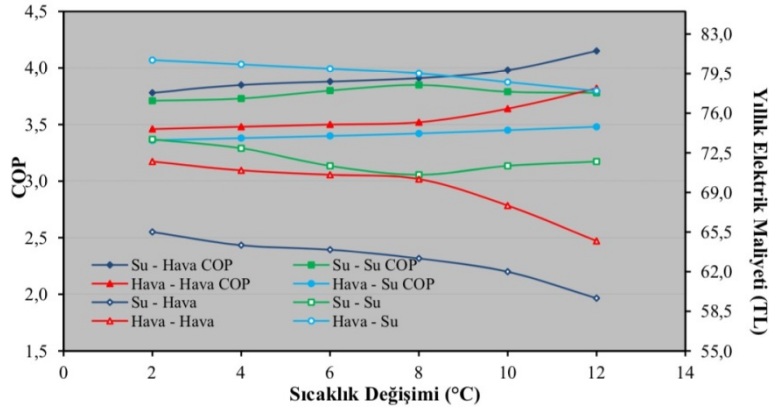
Isı pompası için maksimum teorik verim Carnot verimliliği ile elde edilmektedir. COP carnot değerine fiziksel olarak ulaşmak mümkün değildir. Fakat bu değer soğutma sisteminin ideal sistemden ne kadar uzak olduğuna dair ölçü olarak kullanılmaktadır. Pratikte ısı pompasının gerçek verimi genellikle Carnot veriminin %40 ile %50 arasındadır (Mirza, 2006).

Binaların ısıtılması için kullanılan ısı pompalı sistemlerin etkinlik katsayısı (COP), 5'e hatta daha yüksek değerlere ulaşmakla birlikte, ülkemizdeki mevcut uygulamalara bakıldığında mevsimlik ortalama değeri 2,8 olarak kabul edilmektedir. Kullanıcı açısından bu, ısı pompasının tahrikinde kullanılacak elektrik gücünün bina ısı yükünün yaklaşık 1/3'ünü karşılaması anlamına gelmektedir (Kılıç, 2008).

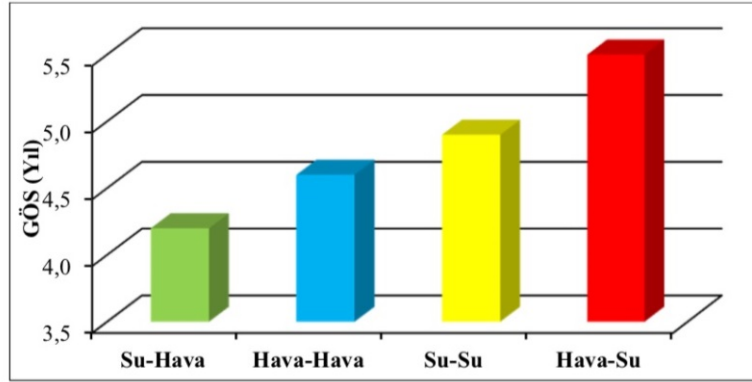
Güneş, hava ve güneş ve havanın birlikte kullanıldığı ısı pompası sistemlerini deneysel olarak incelenmiştir. Her üç sistem performans katsayıları açısından karşılaştırıldığında en düşük COP değeri, hava kaynaklı ısı pompası sistemi için elde edilmiştir. Performans katsayısı açısından en avantajlı sistemin, ısı kaynağı olarak güneş ve havanın birlikte kullanıldığı ısı pompası sistemi olduğu saptanmıştır. Yoğuşturucudan çıkan hava sıcaklığının ısı pompası sistemlerinin performans katsayılarını belirleyen diğer bir husus olduğu belirlenmiştir. Yoğuşturucudan hava çıkış sıcaklık değerlerinden, en düşük değer hava kaynaklı ısı pompası sisteminde, en yüksek değer ise güneş ve hava kaynaklı ısı pompası sisteminde elde edilmiştir. Ayrıca, güneş enerjisi destekli ısı pompaları, ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve geri ödeme sürelerinin çok uzun olması gibi dezavantajlardan dolayı karlı bir yatırım olmadığı belirtilmiştir (Dikici, 2005).

Kuş (2011), çalışmada hava-su, hava-hava, su-su ve su-hava olmak üzere dört farklı çalışma şekline sahip ısı pompası sisteminin ekonomik analizi yapmıştır. Dört farklı çalışma şekli için buharlaştırıcı kaynak akışkan sıcaklık artışı ile etkinlik katsayıları ve yıllık elektrik maliyetlerindeki değişim verilmiştir (Şekil 2). Bütün çalışma şekillerinin etkinlik katsayısı (COP), kaynak akışkan birim sıcaklığındaki artış ile artmaktadır. Etkinlik katsayısındaki (COP) en fazla artış hava-hava ve su-hava çalışma şekillerinde gerçekleşmiştir. Yıllık elektrik maliyetleri ise COP değerlerindeki artmaya paralel olarak azalmaktadır. Ancak su-su çalışma şekline sahip ısı pompası sisteminin etkinlik katsayısı (COP), hava-hava çalışma şekline sahip ısı pompası sisteminin ısıtma tesir katsayısı (COP) değerinden daha yüksek olmasına rağmen, yıllık elektrik tüketiminin de yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum sistemde kullanılan havalı yoğuşturucu ile sulu yoğuşturucu arasındaki kapasite farkıyla açıklanabilir.

Ayrıca ısı pompası sistemi çalışma şekillerinden en karlısının su-hava çalışma şekline sahip sistem olduğu belirlenmiştir. Isı pompası sisteminin farklı çalışma şekillerindeki geri ödeme süreleri arasındaki ilişki gösterilmiştir (Şekil 3). Bu çalışma şekillerinden herhangi birinin elektrikli ısıtıcı yerine kullanılması durumunda kullanıcının karlı olduğunu belirtmiştir (Kuş, 2011).



Şekil 2. Isı pompası sisteminin dört farklı çalışma şekli için COP değerleri ve yıllık elektrik maliyetleri



Şekil 3. Isı pompası sistemi farklı çalışma şekillerinin elektrikli ısıtıcıya göre geri ödeme sürelerinin karşılaştırılması

4. Isı pompalı kurutucular üzerine yapılan çalışmalar

Kurutucudan çıkarılan ürünün kalitesi, kullanılan farklı tipteki sistemlere göre de değişiklik göstermektedir. Kurutulan ürünün fiziksel özelliklerine ilişkin beklentiler, ürünün kuruma sıcaklığının hangi değerlerde ve ısının iletim şeklinin ne şekilde olması gerektiği konusunda seçime yön vermektedir. Ayrıca kurutulan ürünün son nem içeriği, ürünün kalitesini etkileyen önemli bir faktördür çünkü ürünlerde aşırı kuruma istenmeyen bir durumdur.

Hava kaynaklı ısı pompaları kurutucuların kullanımı ile ürün kalitesini arttırmak ve enerji tüketimini azaltmak için birçok araştırmacı çalışmalar yürütürken ısı pompasının spesifik özelliklerini tespit etmişlerdir. Hava kaynaklı ısı pompaları kurutucular hakkında yapılan çalışmalar, kullanılan ürün, uygulama türü ve kurutma sıcaklıkları bakımından aşağıda listelenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Isı pompalı kurutucularla yapılan uygulamalar

Kaynak	Yer	Kullanılan ürün	Uygulama	Sıcaklık
Mason and Blarcom, 1988	Avustralya	Macadamia fıncığı	SAHPD	50°C
Best vd., 1994	Meksika	Pirinç	HPD, SAHPD	30.8-34°C
Prasertsan vd., 1997	Tayland	Muz, kesilmiş kauçuk	HPD, Modelleme	50-60°C
Rahman, 1998	Birleşik Krallık	Bezelye	Modelleme, HPD	25-65°C
Strommen vd., 1999	Norveç	-	HPD	30-80°C
Chua vd., 2000	Singapur	Guava	HPD	20-40°C
Adapa vd., 2002	Kanada	Yonca	HPD	30-45°
Dandamrongrak vd., 2003	Tayland	Muz	HPD, FD	50°C

Ogura vd., 2004	Japonya	Seramik	CSHPD	75°C
Hebbar vd., 2004	Hindistan	Küp patates, dilimlenmiş havuç	HAD, IRD ve karma	80°C
Sun vd., 2005	Singapur	Dilimlenmiş patates	HPD	45°C
Fatouh vd., 2006	Mısır	Ebegümecei-nane-maydanoz	HPD, tek geçişli SAHPD	45-50-55°C
Sunthonvit vd., 2007	Avustralya	Nektarin	SAHP, HPD	25°C
Doymaz, 2007	Türkiye	Domates	HPD, Modelleme	55-60-65-70°C
Çolak vd., 2008	Türkiye	Nane yaprakları	GSHPD	40-45-50°C
Coogan ve Wills, 2008	Avustralya	Beyaz turp	HAD, HPD ve FD	15-35-40-45-50-60-75°C
Ceylan ve Aktaş, 2008	Türkiye	Fındık	HPD, SAHPD	40-45-50°C
Kuzgunkaya ve Hepbaşlı, 2008	Türkiye	Defne yaprakları	GSHPD	40-50°C
Slim vd., 2008	Fransa	Sulu çamur	HPD, SAHPD Modelleme	35°C
Tosun, 2009	Türkiye	Dilimlenmiş elma	Modelleme, HPD	40-44-48-50°C
Kaya vd., 2009	Türkiye	Dilimlenmiş havuç	Kapalı çevrim, HAD	35-45-55°C
Punlek vd., 2009	Singapur	Silika jel	PV-T ve IRD, Kapalı çevrim	60°C
Artnaseawvd, 2010	Tayland	Kırmızı biber	VHPD, Modelleme	50-65°C
İcier vd., 2010	Türkiye	Brokoli çiçekleri	SAFBD, HPD	45°C
Artnaseaw vd., 2010	Tayland	Shiitake mantarı – Jinda kırmızı biberi	HPD	50-55-60-60°C
Castell-Palove Simal, 2011	İspanya	Peynir	HPD, Modelleme	0-12°C
Lee, 2012	Kore	Yeşil kabak, havuç	Modelleme, HPD	50-60-70°C
Hossain vd., 2013	Almanya	Kediotu kökü	Modelleme, HPD	0-50°C
Aktaş ve Kara, 2013	Türkiye	Kivi	SAHPD, HPD	35-40-45-50°C
Aktaş vd., 2013	Türkiye	Mantar	HPD, SAHP	45-55°C
Zielinska vd., 2013	Polonya	Yeşil bezelye	MVD, HACD, HPD	-5 – 55°C
Ghobadian vd., 2014	İran	Safran	PV-T, HPD	40-50-60°C
Deng vd., 2014	Çin	Parçalanmış fileto	IRAHPD	40°C

Wang vd., 2014	Çin	Parçalanmış kalamar	IRD, HAD ve MwVD	50°C
Şevik, 2014	Türkiye	Çilek, domates, maydanoz, nane	DPSAC, HPD	50°C
Ayaz, 2015	Türkiye	Fesleğen, biberiye, dereotu, maydanoz	HPD	36-46°C
Chapchaimoh vd., 2016	Tayland	Zencefil	Kapalı çevrim, HPD	50°C
Ceylan ve Gürel, 2016	Türkiye	Nane yaprakları	SAFBD, HPD	45-50°C
Aktaş vd., 2017	Türkiye	Defne yaprağı	Kapalı çevrim, HPD	40-45-50°C
Aktaş vd., 2017	Türkiye	Rendelenmiş havuç	HPD ve IRAHPD	45-50°C
Taşeri vd., 2018	Türkiye	Üzüm posası	Açık ve kapalı çevrimli HP	45°C
Yang vd., 2018	Çin	Bezelye tohumu	IRD, HPD	30-35-40°C

5. Sonuçlar

Isı pompaları, etkin bir şekilde kurutma, alan ısıtılması ve alan soğutulması için kullanılmaktadır. Son yıllarda hibrit ısı pompalı kurutuculara yer verilmektedir. Bunlar; hava, yer ve kimyasal gibi birçok kaynak kullanılarak geliştirilmektedir. Bu sistemlerin gelişimi ile kurutma uygulaması için fosil kaynaklı elektrik üretimini ve sistem için gereken güç girişini azaltmaktadır. Isı pompası sistemi için COP'un iyileştirilmesi oldukça önemlidir fakat özgül nem alma performansı ve kurutma koşullarını bilmek yeterli değildir. Bir enerjinin gelişmesinde, tasarruf sistemi, sistem maliyeti, sistem verimliliği ve performansı, sistem talebi ve fosil yakıtın sisteme bağımlılığı oldukça önemlidir. Daha fazla hibrit teknoloji sistemlerin performansı artırılabilir ancak aynı zamanda maliyeti de büyük ölçüde arttıracaktır.

Kaynaklar

Adapa, P. K., Schoenau, G. J., Sokhansanj, S. (2002). Performance study of a heat pump dryer system for specialty crops—part 1: development of a simulation model. *International Journal of Energy Research*, 26(11), 1001-1019.

Aktaş, M., Kara, M. Ç. (2013). Güneş enerjisi ve ısı pompalı kurutucuda dilimlenmiş kivi kurutulması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4).

Aktaş, M., Khanlari, A., Amini, A., Şevik, S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. *Energy Conversion and Management*, 132, 327-338.

Aktaş, M., Şevik, S., Özdemir, M. B., & Gönen, E. (2015). Performance analysis and modeling of a closed-loop heat pump dryer for bay leaves using artificial neural network. *Applied Thermal Engineering*, 87, 714-723.

Artnaseaw A., Theerakulpisut S., Benjapiyaporn C. (2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems engineering*, 105, 130-138.

Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., Benjapiyaporn, C. (2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems engineering*, 105(1), 130-138.

ASHRAE: Designation and Safety Classification of Refrigerants. Standard 34-2004, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA; 2004.

Banks, D. (2012). *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. John Wiley&Sons.

- Best, R., Soto, W., Pilatowsky, I., Gutierrez, L. J. (1994). Evaluation of a rice drying system using a solar assisted heat pump. *Renewable energy*, 5(1-4), 465-468.
- Britnell, P., Birchall, S., Fitz-Paine, S., Young, G., Mason, R., Wood, A. (1994). The application of heat pump dryers in the Australian food industry. *Drying*, 94, 897-903.
- Castell-Palou, Á., Simal, S. (2011). Heat pump drying kinetics of a pressed type cheese. *LWT-Food Science and Technology*, 44(2), 489-494.
- Ceylan, İ., Aktaş, M. (2008). Energy analysis of hazelnut drying system-assisted heat pump. *International Journal of Energy Research*, 32(11), 971-979.
- Ceylan, İ., Gürel, A. E. (2016). Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves. *Applied Thermal Engineering*, 106, 899-905.
- Ceylan, İ., Aktaş, M. and Doğan, H., 2007. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. *Applied Thermal Engineering* 27, 216-222p.
- Chapchaimoh, K., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Morris, J. (2016). Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. *Applied Thermal Engineering*, 95, 491-498.
- Chua, K. J., Mujumdar, A. S., Chou, S. K., Hawlader, M. N. A., Ho, J. C. (2000). Convective drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. *Drying technology*, 18(4-5), 907-936.
- Coogan RC, Wills RBH. Flavor changes in Asian White radish (*Raphanussativus*) produced by different methods of drying and salting. *International Journal of Food Properties* 2008;11(2):253-7.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A. (2011). *Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla*. Pınarbaşı, A., Güven Bilimsel, 437.
- Çolak, N., Kuzgunkaya, E., Hepbaslı, A. (2008). Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 31(3), 281-298.
- Daghigh, R., Ruslan, M. H., Sulaiman, M. Y., Sopian, K. (2010). Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2564-2579.
- Dandamrongrak, R., Mason, R., Young, G. (2003). The effect of pretreatments on the drying rate and quality of dried bananas. *International Journal of Food Science & Technology*, 38(8), 877-882.
- Deng, Y., Wang, Y., Yue, J., Liu, Z., Zheng, Y., Qian, B., Zhao, Y. (2014). Thermal behavior, microstructure and protein quality of squid fillets dried by far-infrared assisted heat pump drying. *Food Control*, 36(1), 102-110.
- Doymaz, I. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1291-1297.
- Erdoğan, S., Yılmaz, M., Sahan, B., Ozyurt, O. (2006). Isı Pompası Sistemlerinin Seçimi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 92, 40-49.
- Fatouh, M., Metwally, M. N., Helali, A. B., Shedid, M. H. (2006). Herbs drying using a heat pump dryer. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2629-2643.
- Hebbbar, H. U., Vishwanathan, K. H., Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of food engineering*, 65(4), 557-563.
- Hossain, M. A., Gottschalk, K., Hassan, M. S. (2013). Mathematical model for a heat pump dryer for aromatic plant. *Procedia Engineering*, 56, 510-520.
- Icier, F., Colak, N., Erbay, Z., Kuzgunkaya, E. H., Hepbaslı, A. (2010). A comparative study on exergetic performance assessment for drying of broccoliflorets in three different drying systems. *Drying Technology*, 28(2), 193-204.
- Kaya, A., Aydın, O., Demirtaş, C. (2009). Experimental and theoretical analysis of drying carrots. *Desalination*, 237(1-3), 285-295.

- Kılış, B. İ., 2008. Isı pompalı birleşik ısı ve güç sistemlerinin parametrik değerlendirmesi. Türk Tesisat Mühendisleri Dergisi, 53, 22-25.
- Kuş, A., (2011) Farklı Kaynaklı Isı Pompalarının Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Kuzgunkaya, E. H., Hepbasli, A. (2007). Exergetic evaluation of drying of laurelleaves in a vertical ground-source heat pump drying cabinet. International Journal of Energy Research, 31(3), 245-258.
- Lee, G. H. (2012). Drying Characteristics of Carrot and Green Pumpkin Slices in Waste Heat Dryer. Journal of Biosystems Engineering, 37(1), 36-43.
- Mirza, M., (2006) Isı Pompalı Kurutucun Isıl Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Molina, M. J., Rowland, F. S. (1974). Stratosphericsinkforchlorofluoromethanes- Chlorine atom catalyzed destruction of ozone. In International Conference on the Environmental Impact of Aerospace Operations in the High Atmosphere, 2 nd, San Diego, Calif(pp. 99-104).
- Mortezapour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S. (2014). Drying kinetics and quality characteristics of saffron dried with a heat pump assisted hybridphotovoltaic-thermal solar dryer. Journal of Agricultural Science and Technology, 16(1), 33-45.
- Ogura, H., Hamaguchi, N., Kage, H., Mujumdar, A. S. (2004). Energy and cost estimation for application of chemical heat pump dryer to industrial ceramics drying. Drying technology, 22(1-2), 307-323.
- Park, K. J., Jung, D. (2009). Performance of heat pumps charged with R170/R290 mixture. Applied energy, 86(12), 2598-2603.
- Prasertsan S. ve Saen-saby P. (1998). Heat Pump Drying of Agricultural Materials Drying Technology, 16(1&2), 235-250.
- Prasertsan, S., Saen-Saby, P., Ngamsritrakul, P., Prateepchaikul, G. (1997). Heat pump dryer part 3: Experimental verification of the simulation. International journal of energy research, 21(8), 707-722.
- Punlek C, Pairintra R, Chindaraksa S, Maneewan S. Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). Food BioprodProcess 2009; 87:77-86.
- Rahman M. S., Perera C. O. ve Thebaudb C. (1998). Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. Food Research International, 30 (7), 485-491.
- Rossi, S. J., Neues, L. C., Kicokbusch, T. G. (1992). Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to the drying of vegetables. Drying, 92, 475-8.
- Slim, R., Zoughaib, A., Clodic, D. (2008). Modeling of a solar and heat pump sludge drying system. International journal of refrigeration, 31(7), 1156-1168.
- Strommen I, Eikevik TM, Odilio AF. (1999). Optimum design and enhanced performance of heat pump dryers. In: Abudullah K, Tamaunan AH, Maujumdar AS, editors. Proceedings of the first Asian-Australian drying conference, vol. 68.
- Strømme, I., Eikevik, T. M., Alves-Filho, O., Syverud, K. (2004, August). Heat pump drying of sulphate and sulphitecellulose. In Proceedings of the 14th international drying symposium (IDS 2004), vol B. Sao Paulo(pp. 1225-1232).
- Strumitto C, Jones PL, Z'ytta R. Energy aspects in drying. In: Mujumdar AS, editor. Handbook of industrial drying. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Inc.; 2006. p. 1084.
- Sun, L., Islam, M. R., Ho, J. C., Mujumdar, A. S. (2005). A diffusion model for drying of a heat sensitive solid under multiple heat input modes. Bioresource Technology, 96(14), 1551-1560.
- Sunthonvit, N., Srzednicki, G., Craske, J. (2007). Effects of drying treatments on the composition of volatile compounds in dried nectarines. Drying Technology, 25(5), 877-881.

- Şevik, S. (2014). Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. *Solar Energy*, 105, 190-205.
- Şevik, S., Aktaş, M., Doğan, H., Koçak, S. (2013). Mushroom drying with solar assisted heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 72, 171-178.
- Taşeri, L., Aktaş, M., Şevik, S., Gülcü, M., Seçkin, G. U., Aktekeli, B. (2018). Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food Chemistry*, 260, 152-159.
- Tosun S. (2009). Bazı Tarımsal Ürünler İçin Isı Pompalı Bir Kurutucunun Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi. Doktora Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tsotsas E., ve Mujumdar A.S., (2012). *Modern Drying Technology, Energy Saving*, Wiley VchVerlag&Co., Weinheim, Germany.
- United Nations Environment Programme, Montreal protocol on substance shatdepletethe ozone layer, Final Act; 1987.
- Van Blarcom, A., Mason, R. L. (1988). Low humidity drying of macadamia nuts. In *Proceedings of the Fourth Australian Conference on Tree and Nut Crops* (p. 239).
- Vijaya Raghavan GS, Venkatesh S. Graindrying. In: Mujumdar AS, editor. *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Inc.; 2006. p. 571.
- Wang, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Chen, H. (2014). Drying and quality characteristics of shredded squid in an infrared-assisted convective dryer. *Drying technology*, 32(15), 1828-1839.
- Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Kaynaklı, Ö., Coşkun, S., Yamankaradeniz, N., 2009. Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları. Dora Yayınları, 690, Bursa.
- Yang, Z., Li, X., Tao, Z., Luo, N., Yu, F. (2018). Ultrasound-assisted heat pump drying of pea seed. *Drying Technology*, 1-12.
- Zielinska, M., Zapotoczny, P., Alves-Filho, O., Eikevik, T. M., Blaszcak, W. (2013). A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas. *Journal of Food Engineering*, 115(3), 347-356.

Semboller

HPD	Isı pompalı kurutucu
HAD	Hava kaynaklı kurutucu
FD	Dondurarak kurutma
MwVD	Mikrodalga destekli vakum kurutma
IRAHPD	Kızılötesi destekli ısı pompalı kurutucu
SAHPD	Güneş enerjisi destekli hava kaynaklı ısı pompalı kurutucu
IRD	Kızılötesi destekli ısı kurutucu
DPSAC	Çift geçişli hava ısıtmalı güneş kollektörü
CSHPD	Kimyasal kaynaklı ısı pompalı kurutucu
MVD	Mikrodalga vakum kurutma
HACD	Hava ısıtmalı konvektif kurutma
SAFBD	Güneş destekli akışkan yataklı kurutucu
COP	Etkinlik Katsayısı verim