

Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients during Drying by Using High Velocity Multiplier Air Jets

Ahmet Erhan Akan (Corresponding author)
Namik Kemal University, Corlu Vocational School
59870, Tekirdag, Turkey
aeakan@nku.edu.tr

Derya Burcu Ozkan
Yildiz Technical University, Mechanical Engineering Department
34100, Istanbul, Turkey
tumer@yildiz.edu.tr

Abstract

High velocity impact air jets are widely used in industrial heating, cooling and drying processes. In this study, the drying behaviour of a textile dryer, the ram machine, in which multiplier air jets were used was experimentally investigated. Experiments were carried out in a 10-cabinet ram machine using a fabric with 95% Cotton + 5% lycra contents at three different drying air temperatures (110-130-150 °C) and at a fabric feed rate of 0.500 m/s. The fabric that is dried in the calculations is regarded as a flat plate. For each drying condition, it has been found that the flow type on the flat plate is turbulent throughout the boundary layer between the fabric surface and the drying air, taking advantage of the thermodynamic properties of moist air. Heat transport and mass transport coefficients have been reached with mean Nusselt and Sherwood numbers developed for turbulent flow in forced convection on a flat plate. Accordingly, for each of the above-mentioned drying conditions, it is determined that the average heat transfer coefficients varied respectively between 69.53-74.07-92.96 W/m²K and mass transport coefficients 0.064-0.071-0.093 m/s.

Keywords: Drying, Ram machine, Chilton-Colburn analogy, Heat and mass transfer with convection.

Yüksek Hızlı Çarpan Hava Jetleri ile Kurutmada Isı ve Kütle Transfer Katsayılarının Belirlenmesi

Özet

Yüksek hızlı çarpan hava jetleri, endüstride ısıtma, soğutma ve kurutma proseslerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada; çarpan hava jetlerinin kullanıldığı, bir tekstil kurutucusu olan ram makinesinin kuruma davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler 10 kabinli bir ram makinesinde üç farklı kurutma havası sıcaklığında (110-130-150°C) ve 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında %95 Pamuk + %5 likra içerikli kumaş kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda kurutulan kumaş düz bir plaka olarak kabul edilmiştir. Her bir kurutma şartı için, kumaş yüzeyi ile kurutma havası arasındaki sınır tabaka boyunca, nemli havanın termodinamik özelliklerinden yararlanılarak, düz plaka üzerindeki akış tipinin türbülanslı olduğu bulunmuştur. Düz plaka üzerinde

zorlanmış dış taşınımında türbülanslı akış için geliştirilen ortalama Nusselt ve Sherwood sayıları ile ısı taşınım ve kütle taşınım katsayılarına ulaşılmıştır. Buna göre yukarıda belirtilen herbir kurutma şartı için, sırasıyla elde edilen ortalama ısı taşınım katsayılarının, 69,53-74,07-92,96 W/m²K ve kütle taşınım katsayılarının 0,064-0,071-0,093 m/s arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Ram makinesi, Chilton-Colburn benzeşimi, Taşınım ısı ve kütle transferi.

1. Giriş

Günümüzde enerji kaynakları hızla tüketilmektedir. Bu nedenle bilim insanları ve mühendisler enerjinin daha verimli kullanılması üzerine çalışmaktadırlar [1]. Tekstil endüstrisinde kurutma işlemi yüksek miktarlarda enerji gerektiren pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. Minimum enerji tüketimi ile malzemenin kalitesini ve yapısını bozmadan kuruma süresini en aza indirecek şekilde kurutma proseslerinin hazırlanması ve bu doğrultuda kurutma metodlarının geliştirilmesi enerjiyi daha verimli kullanan proseslere ulaşılması için büyük önem taşımaktadır [2].

Kurutma, herhangi bir materyalden istenilen miktarda nemin uzaklaştırılması işlemidir. Materyaldeki nemin uzaklaştırılması değişik şekil ve yöntemlerle yapılmaktadır. Kurutma proseslerinde, materyalin cinsi, yapısı, ortam şartları, havanın niteliği ve hızı gibi faktörler etkili olmaktadır [3]. Tekstil kurutma eş zamanlı ısı, kütle ve momentum transferi içeren karmaşık bir olaydır [4]. Bu bağlamda deneysel verilere bağlı olarak kurutma şartlarında elde edilen ısı ve kütle transfer katsayılarının bilinmesi, çok fazla miktarda enerjiye ihtiyaç duyan kurutma makinelerinin optimizasyonu için önemli parametreler arasındadır.

Literatürde tekstil kurutma işlemlerinin üzerine yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ghali ve ark. [5], kumaşlarda kurutma işlemi sırasında ısı ve kütle transferini simüle etmek için sayısal bir model ortaya koymuşlardır. Model, pamuk ve polyester olmak üzere iki farklı tip kumaş üzerine uygulanmıştır. Geliştirdikleri model, suyun kumaş numuneleri arasından geçerken iki farklı sıcaklık bölgesi oluşturduğunu göstermektedir. Sousa ve ark. [6], ham pamuk kumaş kurutma prosesinin, iki farklı bakış açısı ile kuruma karakteristiğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Kurutma işleminde ısı ve kütle transferini kontrol ederek kurutma sıcaklığının artmasını sağlamışlar böylece daha yüksek buharlaşma oranına ulaşıldığını ve kuruma zamanının azaldığını kanıtlamışlardır. Park ve Baik [7], Ram makinesinde kurutulan bir kumaşın ısı ve kütle transferini analiz etmişlerdir. Sıcaklık ve nem içeriği dağılımını sonlu elemanlar metodu ile çözmüşler ve ramöz (ram makinesi) içerisindeki nem, sıcaklık, kumaşın başlangıç nemi gibi operasyon parametrelerinin etkileri ile ısı-kütle transfer katsayılarını modeli kullanılarak açıklamışlardır. Seçilen bir kumaşın kurutma özelliklerine uyan modelin, diğer kumaş türleri için de kullanılabilir olduğunu, model tahminleri ile kurutma koşullarının optimize edilmesi ile enerji tüketiminin azaltılabileceği sonucuna varmışlardır. Prabhu ve Parajia [8], kontakt ve konveksiyon kurutucuların performanslarını karşılaştırmışlardır. Kumaş yüzeyine sıcak hava püskürterek 10-20 W/m²K olan konveksiyonel ısı transfer katsayısının 100-200 W/m²K seviyelerine yükseltilebileceğini, konveksiyon kurutucularda özgül buhar tüketiminin, düze (lüle dizisi) verimliliği ve atık hava miktarından önemli ölçüde etkilendiğini ifade etmişlerdir. Ramaswamy ve Cui [9], kurutma havasının kumaş eksenine dik olarak üflendiği durumdaki konveksiyon kurutma işlemini teorik olarak araştırmışlar ve bu durumda ısı-kütle transferi için üç model geliştirmişler ve bu modellerin gerçek işletme verileriyle karşılaştırılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Lee ve ark. [10], halı gibi kalın ve tüylü tekstil malzemelerinin sıcak hava ile kurutulmasını geçici rejimde tanımlayacak bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Gözenekli ortamda gerçekleşen eş zamanlı ısı ve kütle transferini inceleyebilmek için, ısı ve kütle dirençleri elektrik direncine benzeterek, kuruyan ürün için kütle ve enerjinin korunumu denklemlerini yazmışlardır. Bu sayede üç adet non-lineer diferansiyel denklemin oluşturduğu sonuç denklemini, sonlu farklar metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Geliştirdikleri model ile deneysel verilerin büyük oranda örtüştüğünü tespit etmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, tekstil endüstrisinde en çok kullanılan kurutma makineleri, ramözlerde kurumayı etkileyen çeşitli parametrelerin bir arada göz önünde bulundurulduğu, kuruma davranışı üzerine çok sınırlı sayıda çalışma yapılmış olması, diğer çalışmalardan farkı ise gerçek işletim koşulları altında, üretimde kullanılan kumaşlar üzerinde yapılan deney verileri kullanılarak yapılmış olmasıdır. Bu

bağlamda, literatürde çok az çalışılmış olan bir konuda bilgi ve veri eksikliğinin giderilmesi, amaçlanmaktadır.

2. Deneysel Materyal ve Method

Konveksiyonel kurutmada, kurutma gazı (hava) hareketli fakat kurutulacak malzeme hareketli veya hareketsiz olabilir. Konveksiyon prensibine göre çalışan pek çok kurutucu olmasına rağmen, tekstil terbiye işlemlerinde en çok tercih edilen endüstriyel tip kurutucular ramözlerdir. Ramözlerin ilk yatırım maliyetleri diğerlerine göre daha yüksek olmasına rağmen, kumaşlarda kurutma, termofiksaj ve en/boy ayarı gibi işlemlerin yapılmasına imkan vermesi bu makinaların kullanım alanını ve sıklığını arttırmaktadır. Ram makineleri (Ramözler, Gergefli kurutucular), kurutulacak kumaşların iğne veya paletler tarafından kenarlarından tutturularak, makine içerisinde enine bir şekilde hareket ettirildiği, bir çift yürüyen zincir mekanizması ile kumaşa, istenilen hızda hareket sağlandığı ve bu esnada kumaşa kurutma havasının gönderildiği kurutma makinalarıdır[37]. Deneysel çalışma Has Group tarafından imal edilen RAM – X serisi olarak adlandırılan 10 kabinli bir ram makinesinde (Şekil 1), Çorlu'da kurulu Ham Boya tekstil üretim fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Makine yeni olup işletme şartlarına yeni uyarlanmıştır.



Şekil 1. Ram Makinesi Genel Görünüşü.

Ram makinesinde; Kumaşın kurutma kabinlerine girmeden önce, kumaşa banyo işleminin yaptırılarak üzerinde bulunabilecek istenmeyen maddelerden arındıran ve kumaşın ön kurutmasının gerçekleştiği fular kısmı ve hemen sonra kumaşın gerilmemiş bir şekilde kabin içerisinde hareketini sağlayan iğne ve zincir tertibatı bulunmaktadır. Her kabinde bir adet 350 kW'lık otomatik kontrollü brülör, dört adet 4kW'lık çapraz konumlandırılmış otomatik kontrollü fanlar ve sekiz adet alt ve üst konumlandırılmış düze çifti bulunmaktadır. Kabinler 3m uzunlukta olup, kurutma havası sıcaklık değerleri 100–200°C arasında ayarlanabilmektedir. Kurutma havası sıcaklığı, kumaş ilerleme hızı, fan kapasiteleri, atık hava bacası klape açıklık değeri ve kabin sıcaklık değerlerinin ayarlandığı ve anlık olarak görülebildiği kontrol ekranı mevcuttur. Hareketli ve açılır kabin kapaklarında 160 mm, sabit gövde brülör ve fan çevresinde 210 mm kalınlıkta izolasyon malzemesi kullanılmıştır. Bu nedenle deney düzeneğinin çok iyi yalıtılmış olduğu varsayımı yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kumaşlar, işletmenin üretim sürecinde kullandığı kumaşlar olup deneylerden alınan sonuçlar gerçek üretim koşullarından elde edilen verilerden oluşmaktadır. Deneyler sırasında kullanılan kumaş, %95 Pamuk ve %5 Likra içerikli, 30/1 Kompakt Süprem örgü yapısında imal edilmiş kumaştır. Deneyler sırasında ortam sıcaklığının 27,6 °C ve bağıl nemin %60 olduğu belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve hassasiyetleri, Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm Cihazları Ve Hassasiyetleri

Ölçüm cihazları	Hassasiyetleri
Testo 350M/XL, Portatif gaz analizörü (Hava hızı ölçümü)	% 5
Testo 870-2 Termal kamera	±% 2 °C
Hygro Faster Ekv (Kumaş nem ölçümü)	% 0,8
Delta Ohm HD 2301 (Hava nem ölçümü)	±% 0,1RH
Digitron ThermaPro 2 data logger (K tipi probe, kumaş yüzey sıcaklığı)	% 0,5
Desis THB 600 (Hassas terazi)	0,01 g
Siemens Ardoport İnfrared Termometre	0,1 K
Dairesel Kumaş Kesme Şablonu	100 cm ²

2.1. Hesaplamalarda yapılan kabuller

- İncelenen sistem gerçek üretim şartları altında çalışan bir sistemdir.
- Sürekli akışlı açık sistem koşulları geçerlidir.
- Akışkan özellikleri sabittir.
- Kurutucu kararlı haldedir, kimyasal reaksiyonlar yoktur.
- Gözenekli ortamda nem üretimi ve tüketimi yoktur.
- Kumaşla temas eden kurutma havası sürekli yenilediğinden kurutma havasının nem ve sıcaklığı, kumaşın ısı ve nem değişiminden etkilenmemiştir.
- Kumaşın ihmal edilebilir kalınlığı nedeniyle kumaş düzlemine dik yönde difüzyon direnci dikkate alınmamıştır.
- Gözenekli ortam (kumaş) doymuş haldedir.
- Kurutucu adyabatik kabul edilmiştir.
- Gözenekli malzemenin homojen ve rijit olduğu kabul edilmiştir.
- Kurutucuda ilerleyen kumaşın düz plaka olduğu kabul edilmiştir.

2.2 Isı ve kütle transferi

Kurutma işlemi eş zamanlı ısı ve kütle transferi içeren bir olaydır ve bu tür problemlerin çözümü, eş zamanlı ısı ve kütle transferinin dikkate alınıp çözümlenmesini gerektirir [11]. Bu çalışmada yüksek hızlı çarpan hava jetleri altında kurutma söz konusu olduğundan Chilton – Colburn benzeşimi Eş (1), ($Pr \neq Sc \neq 1$) kullanılmıştır.

$$h = \rho c_p h_m Le^{2/3} \quad (1)$$

Kurutuma işlemi sırasında kurutma havası ile kumaş arasında oluşan ara yüzeydeki film sıcaklığı Eş (2) kullanılarak tespit edilmiş ve bu sıcaklıktaki havanın termodinamiksel özellikleri (ρ , C_p , k , α , DAB , μ , ν , Pr) kullanılarak boyutsuz sayılara ulaşılmıştır.

2.3 Akış tipinin belirlenmesi

Düz plaka üzerinde Reynolds sayısı araştırılmıştır Eş (3). Düz plaka üzerinde kritik Reynolds Sayısı 5×10^5 olduğundan bulunan Reynolds sayısına göre akışın tüm plaka üzerinde türbülanslı olduğu anlaşılmıştır.

$$Re = (VL_c)/\nu > 5 \times 10^5 \quad (3)$$

2.4 Isı ve kütle taşınım katsayılarının belirlenmesi

Düz plaka üzerinde zorlanmış dış taşınımında türbülanslı akış için ($5 \times 10^5 < Re < 10^7$) geliştirilen ortalama Nusselt ve Sherwood sayıları ile ısı ve kütle taşınım katsayıları tespit edilmiştir Eş (4-5).

$$Nu = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} = (hL)/k \quad (4)$$

$$Sh = 0.037 Re_L^{0.8} Sc^{1/3} = (h_m L)/D_{AB} \quad (5)$$

3. Bulgular

Kurutma işlemi sırasında kumaşın, kabin giriş ve çıkış noktalarındaki yüzey sıcaklıkları ve sınır tabakası civarındaki havanın bağıl nemi ile sıcaklık değerleri, 0,500 m/s kumaş ilerleme hızında ölçülerek, elde edilen değerler Tablo 2'de verilmiştir. Kurutma işlemi sonunda kurutucudan çıkan kumaşın bağıl nem değerleri ölçülmüş ve elde edilen veriler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. 0,500 m/s (30 m/dak) Kumaş İlerleme Hızında Elde Edilen Deneysel Veriler

Kumaş Hızı (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı		110 °C			130 °C			150 °C		
	Kabin Numarası	Zaman (s)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)	Kumaş yüzey sıcaklığı (°C)	Nemli hava bağıl nemi (%RH)	Nemli hava sıcaklığı (°C)
0.167	Giriş	-	35	-	-	35	-	-	35	-	-
	1. Kabin	6	56	56,8	78	64	58,5	77	72	62,9	72
	2. Kabin	12	65	44,1	79	72	45,7	78	76	45,6	74
	3. Kabin	18	68	30,6	83	77	32,9	80	80	34,1	75
	4. Kabin	24	72	21,3	86	88	21,6	85	87	23,1	77
	5. Kabin	30	81	14,4	90	97	14,6	88	103	16,5	80
	6. Kabin	36	86	10,2	93	105	10,9	90	118	11,5	84
	7. Kabin	42	96	6,9	99	113	8,1	93	128	9,4	85
	8. Kabin	48	102	6,1	100	118	6,5	97	140	7,4	89
	9. Kabin	54	103	5,7	101	123	5,5	100	141	6,5	91
	10. Kabin	60	94	5,5	101	115	5,1	102	132	5,2	95
	Çıkış	-	89	-	-	112	-	-	120	-	-

Tablo 3. Kurutucu Giriş Ve Çıkışında Kumaşın Bağlı Nem Değerleri

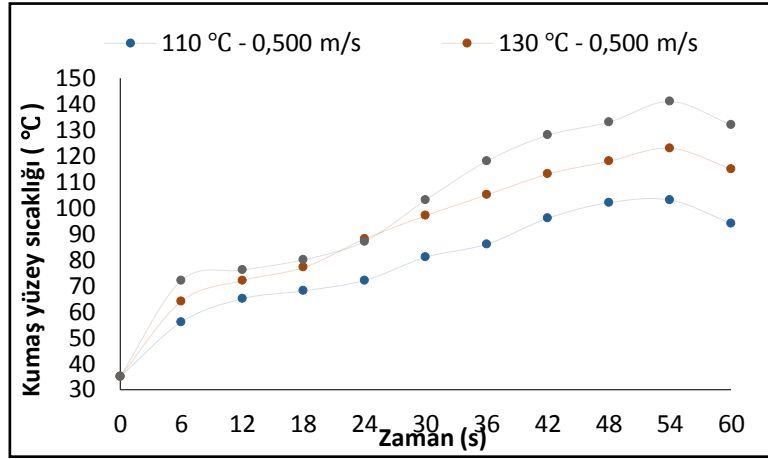
Kurutma havası sıcaklığı	Kumaş ilerleme hızı (m/s)	Kumaş giriş bağlı nemi. (%) RH	Kumaş çıkış ortalama bağlı nemi. (%) RH
110 °C	0.500	60	13,35
130 °C	0.500	60	10,95
150 °C	0.500	60	9,30

Tablo 2 ve 3 incelendiğinde, tüm kurutma şartları için, fular kısmından yıkanarak çıkan kumaşın, ortalama 35 °C'de sıcaklık ve %60 bağlı nemde kurutucuya girdiği görülmektedir. Yine aynı çizelgeler yardımı ile kumaşın yüzey sıcaklığının, tüm kurutma şartlarında, kumaş yüzeyindeki nem miktarına bağlı olarak, ilk üç kabinde 80 °C'yi aşmadığı görülmektedir. Bu değerler daha önce yapılan çalışmaları destekler niteliktedir. "Kurumanın ilk evresinde, kumaş yüzeyinde yeterli miktarda nem bulunduğu sürece, kurutma havası sıcaklık değeri ne olursa olsun tekstil malzemesinin sıcaklığı, yüzeydeki su-buharı hava karışımının yaş termometre sıcaklığında sabit kalmaktadır"[12]. Kurumanın ilerleyen zamanlarında, özellikle 6. Kabinden (I. Atık hava bacası bulunmakta) sonra azalan nem miktarının etkisi ile kumaş yüzey sıcaklığının, kurutma havası sıcaklığına yaklaşmakta olduğu görülmektedir. Ayrıca 10. Kabinde kumaş yüzey sıcaklığının düşmeye başlaması kabin çıkışında bulunan açıklıktan (kumaş çıkış alanı) olan ısı transferi nedeniyledir. Kabin sıcaklıklarına bakıldığında 9. Kabine göre 10. Kabinde 5-12 °C'lik sıcaklık düşüşü olduğu tespit edilmiştir.

Tablolar yardımı ile kurutma işlemleri arasında kurutma havası sıcaklığının artması durumunda, kumaş yüzey sıcaklıklarının ve kuruma havasının (nemli hava) bağlı nem değerlerinin arttığı görülmektedir. Kurumanın ilerleyen zamanlarında, kurutma havası sıcaklık değeri fazla olan kurutma şartı için kuruma havası bağlı nem değerlerinin azalmaya başlaması, kumaş bünyesinde bulunan nem miktarının azalması ve kurumanın difüzyon yolu ile meydana gelmesi ile açıklanabilmektedir. Kumaş yüzey sıcaklıklarının değişiminin daha rahat anlaşılabilmesi için Tablo 2'de verilen deneysel verilerin grafiği Şekil 2'de gösterilmiştir. Tablo 4'de kumaş yüzeyi ve kurutma havası arasında oluşan sınır tabaka sıcaklığındaki havanın termodinamiksel özellikleri ile ısı ve kütle transferi katsayılarının hesaplanmasında kullanılan boyutsuz sayılar gösterilmiştir.

Tablo 4. Film Sıcaklığında Havanın Termodinamiksel Özellikleri Ve Boyutsuz Sayılar

Boyutsuz Sayılar																			
Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Film Sıcaklığı (Th+Ty)/2 (K)	Ara yüzeyde su buharı yoğunluğu ρ (kg/m ³)	Sabit basınçta özgül ısı cp (kJ/kgK)	Isıl yayılım katsayısı α (m ² /s) x10 ⁻⁷	Kütle yayılım katsayısı D _{AB} (m ² /s) x10 ⁻⁶	Lewis sayısı Le (α / D _{AB})	Isıl iletim katsayısı k (W/mK) x10 ⁻³	Dinamik viskozite μ (kg/ms) x10 ⁻⁶	Kinematik viskozite ν (m ² /s) x10 ⁻⁶	Prandtl sayısı Pr	Hava hızı (m/sn)	Reynolds sayısı Re	Akış tipi	Nusselt sayısı Nu	Schmidt sayısı Sc	Sherwood sayısı Sh
(110 °C)	GİRİŞ	383	308	345,5	1,020	1,011	286,230	34,104	0,839	29,518	20,704	20,294	0,709	21,850	1072380	Türb.	2201,386	0,595	2076,502
	6	383	329	356	0,992	1,012	300,973	36,178	0,832	30,214	21,129	21,309	0,708	21,850	1021291	Türb.	2116,082	0,589	1990,184
	12	383	338	360,5	0,978	1,013	308,451	37,239	0,828	30,560	21,354	21,838	0,708	21,850	1037555	Türb.	2142,997	0,586	2012,572
	18	383	341	362	0,975	1,013	309,956	37,453	0,828	30,629	21,399	21,945	0,708	21,850	1071346	Türb.	2198,653	0,586	2064,247
	24	383	345	364	0,970	1,014	312,977	37,883	0,826	30,767	21,458	22,128	0,707	21,850	1062506	Türb.	2183,098	0,584	2048,470
	30	383	354	368,5	0,957	1,015	320,588	38,969	0,823	31,113	21,682	22,666	0,707	21,850	1106690	Türb.	2255,429	0,582	2113,351
	36	383	359	371	0,951	1,015	323,656	39,408	0,821	31,252	21,771	22,882	0,707	21,850	1116254	Türb.	2271,007	0,581	2126,759
	42	383	369	376	0,939	1,016	331,314	40,516	0,818	31,591	21,990	23,424	0,707	21,850	1087292	Türb.	2223,745	0,578	2078,862
	48	383	375	379	0,931	1,016	335,919	41,189	0,816	31,792	22,088	23,716	0,706	21,850	1078869	Türb.	2208,912	0,576	2063,776
	54	383	376	379,5	0,929	1,016	337,461	41,415	0,815	31,859	22,131	23,825	0,706	21,850	1073941	Türb.	2200,836	0,575	2055,627
(130 °C)	GİRİŞ	403	308	355,5	0,992	1,012	300,973	36,178	0,832	30,214	21,129	21,309	0,708	24,450	1142818	Türb.	2315,232	0,589	2177,485
	6	403	337	370	0,954	1,015	322,121	39,188	0,822	31,182	21,727	22,774	0,707	24,450	1069302	Türb.	2194,262	0,581	2055,462
	12	403	345	374	0,944	1,015	328,259	40,071	0,819	31,457	21,904	23,208	0,707	24,450	1092500	Türb.	2232,262	0,579	2088,688
	18	403	350	376,5	0,936	1,016	332,846	40,740	0,817	31,658	22,033	23,532	0,707	24,450	1117967	Türb.	2273,795	0,578	2125,651
	24	403	361	382	0,924	1,017	340,553	41,867	0,813	31,993	22,217	24,043	0,706	24,450	1127770	Türb.	2288,652	0,574	2136,400
	30	403	370	386,5	0,912	1,017	348,340	43,011	0,810	32,328	22,431	24,593	0,706	24,450	1141333	Türb.	2310,644	0,572	2153,814
	36	403	378	390,5	0,903	1,018	354,627	43,937	0,807	32,596	22,603	25,037	0,706	24,450	1141608	Türb.	2311,090	0,570	2151,775
	42	403	386	394,5	0,894	1,019	360,964	44,874	0,804	32,864	22,774	25,484	0,706	24,450	1123485	Türb.	2281,693	0,568	2122,014
	48	403	391	397	0,889	1,019	364,151	45,346	0,803	32,998	22,859	25,709	0,706	24,450	1113652	Türb.	2265,702	0,567	2105,967
	54	403	396	399,5	0,882	1,020	368,956	46,059	0,801	33,199	22,987	26,048	0,706	24,450	1099150	Türb.	2242,068	0,566	2082,269
(150 °C)	GİRİŞ	423	308	365,5	0,964	1,014	316,012	38,315	0,825	30,906	21,548	22,342	0,707	33,400	1488960	Türb.	2859,661	0,583	2681,787
	6	423	345	384	0,919	1,017	343,659	42,323	0,812	32,127	22,303	24,262	0,706	33,400	1371115	Türb.	2675,854	0,573	2496,392
	12	423	349	386	0,914	1,017	346,777	42,781	0,811	32,261	22,389	24,482	0,706	33,400	1414721	Türb.	2743,721	0,572	2558,230
	18	423	353	388	0,910	1,018	349,907	43,242	0,809	32,395	22,474	24,703	0,706	33,400	1454793	Türb.	2805,719	0,571	2614,537
	24	423	360	391,5	0,900	1,018	356,206	44,170	0,806	32,663	22,645	25,148	0,706	33,400	1472894	Türb.	2833,613	0,569	2637,532
	30	423	376	399,5	0,882	1,020	368,956	46,059	0,801	33,199	22,987	26,048	0,706	33,400	1472005	Türb.	2832,245	0,566	2630,383
	36	423	391	407	0,867	1,021	380,276	47,744	0,796	33,668	23,252	26,809	0,705	33,400	1456374	Türb.	2806,832	0,562	2601,811
	42	423	401	412	0,857	1,022	388,455	48,968	0,793	34,003	23,463	27,386	0,705	33,400	1428148	Türb.	2763,227	0,559	2557,962
	48	423	413	418	0,844	1,023	398,373	50,457	0,790	34,405	23,717	28,085	0,705	33,400	1392593	Türb.	2708,054	0,557	2502,925
	54	423	414	418,5	0,842	1,023	400,037	50,707	0,789	34,472	23,759	28,203	0,705	33,400	1386801	Türb.	2699,040	0,556	2493,942
(150 °C)	60	423	405	414	0,853	1,022	391,749	49,461	0,792	34,137	23,548	27,618	0,705	33,400	1416141	Türb.	2744,626	0,558	2539,396
	ÇIKIŞ	423	393	408	0,865	1,021	381,906	47,988	0,796	33,735	23,294	26,924	0,705	33,400	1452641	Türb.	2801,074	0,561	2595,774

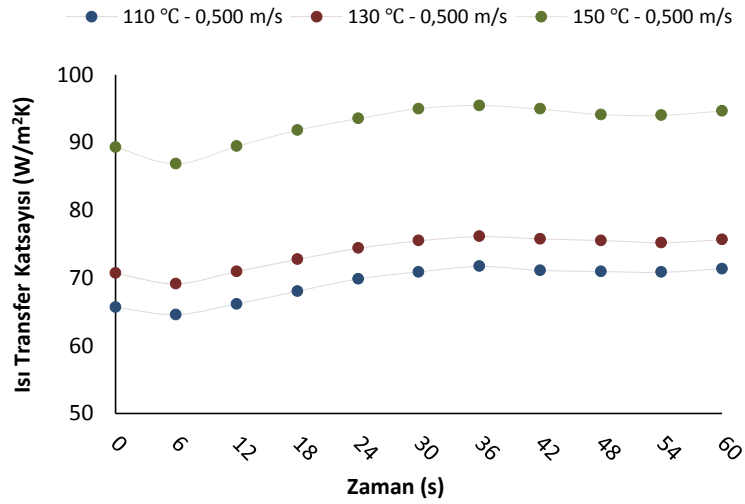


Şekil 2. Üç farklı kurutma havası sıcaklığında kumaş yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

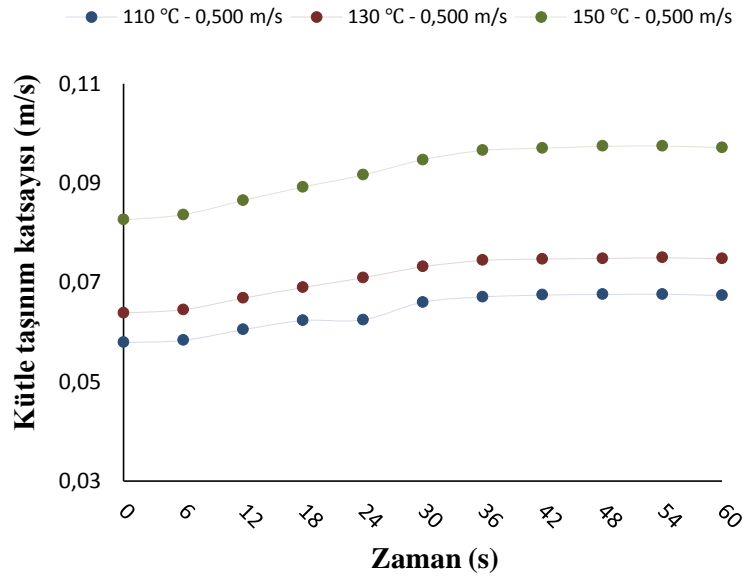
Tablo 5. Isı ve Kütle Transfer katsayıları

Isı ve Kütle Taşınım Katsayıları						
Hız (m/s)	Süre (Saniye)	Kurutma havası sıcaklığı Th (K)	Kumaş yüzey sıcaklığı Ty (K)	Sıcaklık (Th+Ty)/2 (K)	Taşınım ısı transferi sayısı h (W/m ² K)	Taşınım kütle transferi hm (m/s)
0,500 (110 °C)	GİRİŞ	383	308	345,5	65,636	0,0579
	6	383	329	356	64,580	0,0583
	12	383	338	360,5	66,151	0,0605
	18	383	341	362	68,022	0,0623
	24	383	345	364	69,846	0,0624
	30	383	354	368,5	70,882	0,0660
	36	383	359	371	71,690	0,0671
	42	383	369	376	71,110	0,0674
	48	383	375	379	70,935	0,0676
	54	383	376	379,5	70,825	0,0676
0,500 (130 °C)	60	383	367	375	71,335	0,0673
	ÇIKIŞ	383	362	372,5	71,561	0,0672
	GİRİŞ	403	308	355,5	70,658	0,0638
	6	403	337	370	69,113	0,0645
	12	403	345	374	70,930	0,0668
	18	403	350	376,5	72,711	0,0689
	24	403	361	382	74,360	0,0709
	30	403	370	386,5	75,453	0,0731
	36	403	378	390,5	76,093	0,0744
	42	403	386	394,5	75,743	0,0747
0,500 (150 °C)	48	403	391	397	75,519	0,0748
	54	403	396	399,5	75,186	0,0749
	60	403	388	395,5	75,631	0,0747
	ÇIKIŞ	403	385	394	75,856	0,0746
	GİRİŞ	423	308	365,5	89,272	0,0825
	6	423	345	384	86,836	0,0836
	12	423	349	386	89,409	0,0865
	18	423	353	388	91,809	0,0892
	24	423	360	391,5	93,489	0,0916
	30	423	376	399,5	94,977	0,0947
0,500 (150 °C)	36	423	391	407	95,455	0,0965
	42	423	401	412	94,907	0,0970
	48	423	413	418	94,112	0,0974
	54	423	414	418,5	93,981	0,0974
	60	423	405	414	94,640	0,0971
	ÇIKIŞ	423	393	408	95,449	0,0967

Tablo 4’de verilen değerlerden ve Eş. 4-5’deki formüllerden yararlanılarak 0,500 m/s (30 m/dak) kumaş ilerleme hızı ve 110-130-150 °C’deki kurutma havası sıcaklığı ile yapılan kurutma işlemine ait ısı ve kütle transferi katsayıları hesaplanmıştır. Bulunan değerler Tablo 5’de verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler Şekil 3 ve 4’de sunulmuştur.



Şekil 3. Isı taşınım katsayısı-zaman grafiği



Şekil 4. Kütle taşınım katsayısı-zaman grafiği

Şekil 3 ve 4’de ısı ve kütle taşınım katsayıları incelendiğinde; kurutma havası sıcaklığı 110 °C’den 130 °C’ye çıkarıldığında, ısı transfer katsayısı yaklaşık %6-7, kurutma havası sıcaklığı 130 °C’den 150

°C'ye çıkarıldığında, ısı transfer katsayısı yaklaşık %20-23 arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Kumaş yüzeyindeki nem miktarına paralel olarak, kumaş yüzey sıcaklıkları arttıkça ısı transfer katsayısına bağlı olarak kütle transfer katsayısı da artmaktadır. Kumaş yüzey sıcaklığı kurutma havası sıcaklığına yaklaşmaya başladığında ise ısı transfer katsayısı azalmakta buna karşılık kütle transfer katsayısının sabit değerlere ulaşmakta olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, tekstil endüstrisinde kullanılmakta olan 10 kabinli bir ram makinesinin kurutma davranışı, ısı ve kütle transferi katsayılarının belirlenmesi ile araştırılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda kumaş yüzey sıcaklıkları analiz edilerek, kumaş yüzeyi ile kurutma havası arasındaki sınır tabaka civarında ölçülen verilerden yararlanılarak eş zamanlı ısı-kütle transferi eşitlikleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- 1- Kurutma şartları kurumayı önemli ölçüde etkilemekte, aynı kumaş ilerleme hızında kurutma havası sıcaklığının değiştirilmesiyle birlikte ısı-kütle transfer katsayılarında büyük değişiklikler meydana gelmektedir.
- 2- Kurutmanın başladığı ilk kabinlerde kumaş üzerindeki nem miktarına bağlı olarak kumaş yüzey sıcaklığının 80 °C'yi aşmadığı görülmüştür.
- 3- Özellikle ilk üç kabinde buharlaşma yüksek olmakta, 6. Kabinden sonra kurutmanın difüzyon ile gerçekleşmesi yüzünden kurutma zorlaşmakta ve son kabinlere göre en az değerlerini almaktadır.
- 4- Kumaş giriş-çıkış noktalarındaki açıklıktan büyük miktarda ısı transferi olmakta, bunun sonucunda kumaşın son kabindeki sıcaklık değerleri yaklaşık 5-12 °C'lik bir düşüş göstermektedir. Bu değerlerin kumaş ilerleme hızı ile daha da artacağı kaçınılmazdır.

Kaynaklar

- [1] F. Ünal, D. B. Özkan, Application of Exergoeconomic Analysis For Power Plants, Thermal Science, <https://doi.org/10.2298/TSCI170217098U>, 2017.
- [2] U. Akyol, İplik Bobini Kurutulmasının Teorik İncelenmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne-Türkiye, 2007.
- [3] F. Akarslan, Tekstil mamul özelliklerinin kurutma etkinliğine etkisi, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2002.
- [4] A. K. Haghi, N. Amanifard, Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 491-501 (2008).
- [5] Ghali K., Jones B., Tracy J., (1995). "Modeling Heat and Mass Transfer in Fabrics", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.38, No.1, pp. 13-21.
- [6] Sousa L.H.C.D., Lima O.C.M, Pereira N.C., (2006). "Analysis of Drying Kinetics and Moisture Distribution in Convective Textile Fabric Drying", Drying Technology, 24: 485-497.

- [7] Park I.S., Baik D.H., (1997). ‘‘Heat and Mass Transfer Analysis of Fabric in the Tenter Frame’’, Textile Research Journal, Vol:67 issue 5, pp. 311-316.
- [8] Prabhu M.R., Parajia J.S., (1982). ‘‘Performance Relations and Norms for Textile Contact and Convection Dyer’’, Hemisphere Publishing Corporation, pp: 233-238, Washington.
- [9] Ramaswamy S., Cui Y., (1999). ‘‘Analyzing Convective Heat and Mass Transfer in Through-Air Drying of Fabrics’’, Textile Research Journal, Vol. 69: 776 –781.
- [10] Lee H.S., Carr, W.W., Bechham H.W., Leisen J., (2002). ‘‘A Model of Through Air Drying of Tufted Textile Materials’’, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45: 357-366.
- [11] Çengel Y.A., Ghajar A.J., Isı ve Kütle Transferi Esaslar ve Uygulamalar, Palme Yayıncılık, 4. Baskı, Ankara, 2015.
- [12] Karaaslan, M.A., (2006). Ramöz Atık Havasından Isı Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.