

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TAMBURLU KURUTMA MAKİNELERİNDE PROSES ÇALIŞMA
KOŞULLARININ FARKLI TEKSTİL TİPLERİ İÇİN NEM ALMA HIZINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed ERGÜN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı & Akışkan Programı

TEMMUZ 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TAMBURLU KURUTMA MAKİNELERİNDE PROSES ÇALIŞMA
KOŞULLARININ FARKLI TEKSTİL TİPLERİ İÇİN NEM ALMA HIZINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhammed ERGÜN
(503181112)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı & Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIĞLU

TEMMUZ 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503181112 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Muhammed ERGÜN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TAMBURLU KURUTMA MAKİNELERİNDE PROSES ÇALIŞMA KOŞULLARININ FARKLI TEKSTİL TİPLERİ İÇİN NEM ALMA HIZINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ayşegül ABUŞOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Haziran 2021**
Savunma Tarihi : **12 Temmuz 2021**



Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Lisans öğrenimim sırasında kendisi ile bitirme tezi konusunda çalışma fırsatı bulduğum, tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgmeden katkıda bulunan, olumlu öneri ve eleştirileri ile beraber bu çalışmayı yöneten çok değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIOĞLU'na en derin sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam için imkân ve olanaklarını sunarak bana destek olan Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, Sn. Nihat BAYIZ, Sn. Dr. Emre OĞUZ ve Temizleme Teknolojileri Yöneticisi Sn. Dr. Önder BALIOĞLU'na teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışma hayatım ve tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleri ile çalışmaların her aşamasında desteklerini sunan, değerli fikir ve görüşleri ile bu tez çalışmasına büyük katkıda bulunan, çalışmalar süresince gösterdikleri ilgi ve içten yaklaşımlarından ötürü Sn. Mak. Yük. Müh. Gökhan SIR'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmalarım kapsamında bilgi ve tecrübelerini benle paylaşarak bana yardım eden Sn. Dr. Fatih KASAP ve Sn. Dr. Yusuf KOÇ'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar sırasında deney düzeneklerinin kurulması, devreye alınması, bu süre zarfında çıkan teknik problemlerin çözümü gibi konularda yardımlarını ve tecrübelerini esirgmeden katkıda bulunan başta Sn. Salih GÖK, Sn. Şenol ÇAVUŞOĞLU, Sn. Şükrü YALÇIN, olmak üzere tüm Arçelik A.Ş. Ar-Ge Temizleme Teknolojileri Ailesi ve Temel Bilimler Ailesi teknisyenlerine teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana destek olan, bana güç verip motive eden ve her zaman yanımda olacak Sn. Mak. Müh. Asuman GÜLEÇ'e tüm içten ve samimi duygularıyla teşekkür ederim.

Son olarak, tüm hayatım boyunca her daim yanımda olan, bugünlere gelmemde benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli AİLEME, en derin duygularıyla teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Haziran 2021

Muhammed ERGÜN
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Tekstil Kurutma İşlemini Etkileyen Parametreler.....	3
2.1.1 Tekstil tipi	3
2.1.2 Yük miktarı	5
2.1.3 Tekstil bağıl nemi.....	7
2.1.4 Tambur devri.....	7
2.1.5 Hava debisi.....	10
2.1.6 Isıtıcı gücü.....	11
2.1.7 Kademeli kurutma.....	11
2.2 Tamburlu Kurutma Makinelerinde Modelleme Çalışmaları	14
2.2.1 Poroz pamuk kumaşın kurutma işleminde ısı ve kütle geçişinin matematiksel modellenmesi	14
2.2.2 Etkin kurutma parametrelerinin belirlenmesi ve kurutma performansına etkileri	16
2.3 Sonuçlar.....	18
3. TEORİK ÇALIŞMALAR	19
3.1 Psikrometri	19
3.2 Bacalı Kurutucular	20
3.3 Isı Pompalı Kurutucular	24
3.3.1 Buharlaştırıcı.....	27
3.3.2 Yoğuşturucu	28
3.3.3 Kılcallık.....	28
3.3.4 Tambur	29
3.3.5 Kompresör.....	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
4.1 Deney Düzeneginin Tanıtılması	31
4.2 Deney Sonuçları	38
4.2.1 Tambur devrinin kurutma performansına etkisi.....	40
4.2.2 Hava debisinin kurutma performansına etkisi	44
4.2.3 Tekstil tipinin kurutma performansına etkisi	47
5. MODELLEME ÇALIŞMALARİ	51
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57



SEMBOLLER

ω	: Açısal hız [rad/s]
g	: Yer çekimi ivmesi [m/s^2]
m_{fi}	: Anlık tekstil ağırlığı [kg]
m_f	: Tekstil kuru ağırlığı [kg]
Fr	: Froude sayısı
P	: Nemli havanın basıncı [kPa]
P_h	: Kuru havanın kısmi basıncı [kPa]
P_b	: Buhar kısmi basıncı [kPa]
m_b	: Buhar kütlesi [kg]
m_h	: Hava kütlesi [kg]
\dot{m}_b	: Buharlaştırma kütleli debisi [kg/s]
k	: Kütle transfer katsayısı [m/s]
A	: Tekstil etkin yüzey alanı [m^2]
ρ_v	: Kumaş yüzeyinde su yoğunluğu [kg/m^3]
ω_m	: Havanın kumaş yüzeyi boyunca ortalama özgül nemi [kg/kg]
α	: Aktivite katsayısı
X	: Tekstil nem yüzdesi [%]
h_c	: Isı transferi katsayısı [$kW/m^2 K$]
C_L	: Lewis sayısı
C_{pa}	: Tekstil filmindeki havanın özgül ısı değeri [$kJ/kg K$]
\dot{m}_h	: Hava kütleli debisi [kg/s]
h_{hg}	: Hava giriş entalpi değeri [J/kg]
$h_{hç}$: Hava çıkış entalpi değeri [J/kg]
U_{ow}	: Islak yüzeyin toplam ısı transfer katsayısı [kg/m^2s]
F	: Düzeltme faktörü
A_0	: Hava tarafında toplam yüzey alanı [m^2]
Δh_{lm}	: Logaritmik ortalama entalpi değişimi [J/kg]
ΔT	: Tambur giriş ve çıkış sıcaklık farkı [K]
ΔT_{lm}	: Logaritmik ortalama sıcaklık değişimi [K]

U	: Sıcaklık tabanlı ortalama ısı transfer katsayısı [kg/m^2s]
μ	: Dinamik viskozite [$Pa \cdot s$]
p	: Kapileri tüp içerisinde bölgesel basınç değeri [Pa]
G	: Kütle akısı [kg/s]
v	: Özgül hacim [m^3/s]
d_{cap}	: Kapileri tüp çapı [m]
f_{tp}	: İki fazlı durumda sürtünme katsayısı
W_{comp}	: Kompresör güç tüketimi [$Watt$]
$\dot{m}_{c,o}$: Soğutkan kompresör çıkış kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_{c,i}$: Soğutkan kompresör giriş kütleli debisi [kg/s]
$\dot{h}_{c,o}$: Soğutkan kompresör çıkış entalpisi [J/kg]
$\dot{h}_{c,i}$: Soğutkan kompresör giriş entalpisi [J/kg]
\dot{m}_h	: Hava kütleli debi [kg/s]
$\omega_{giriş}$: Tambur girişi özgül nem değeri
$\omega_{çıkış}$: Tambur çıkışı özgül nem değeri
V_t	: Tambur çevresel hızı [m/s]
V_h	: Hava akış hızı [m/s]

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Termokupl bölgeleri	35
Çizelge 4.2 : Deney test parametreleri.....	39
Çizelge 4.3 : Deney test parametreleri.....	43
Çizelge 5.1 : Buckingham pi teoremi parametreler	53
Çizelge 5.2 : Minitab analiz sonucu	54
Çizelge 5.3 : Doğrulama testleri parameterleri.....	55
Çizelge 5.4 : Doğrulama testleri sonuçları	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yük miktarına bağlı SMER grafiği [7]	6
Şekil 2.2 : Yük miktarına bağlı tekstil nem değişimi grafiği [8]	6
Şekil 2.3 : Tekstil başlangıç nem değerine bağlı kurutma grafiği [8]	7
Şekil 2.4 : Tamburlu kurutucu motor devrine bağlı kurutma grafiği [8].....	8
Şekil 2.5 : Tamburlu kurutucu motor devrine bağlı SMER grafiği [7]	9
Şekil 2.6 : Tamburlu kurutucu motor devrine ve yük miktarına bağlı smer grafiği [7].....	10
Şekil 2.7 : Tamburlu kurutucu hava hızına bağlı SMER grafiği [8]	10
Şekil 2.8 : Tamburlu kurutucu ısıtıcı gücüne bağlı tekstil sıcaklık grafiği [8].....	11
Şekil 2.9 : Kurutma adımı zamana bağlı hava bağıl nemi ve sıcaklığı [10]	12
Şekil 2.10 : Test Düzeneği [8]	15
Şekil 2.11 : Tekstil üzerinden ısı ve kütle transfer modeli[8].....	15
Şekil 3.1 : Psikrometrik diyagram [11].....	19
Şekil 3.2 : Açık çevrim kurutucu modeli [12]	22
Şekil 3.3 : Logaritmik basınç-entalpi diyagramında basitleştirilmiş ısı pompası döngüsü [17]	25
Şekil 3.4 : Kapalı ısı pompası kurutma hava döngüsü, Mollier diyagramı [17].....	26
Şekil 3.5 : Kapalı soğutkan ve hava çevrimi, ısı pompası diyagramı [18].....	27
Şekil 4.1 : Deney mekanizması	32
Şekil 4.2 : Deney düzeneği data toplama diyagramı	33
Şekil 4.3 : % 100 Pamuk yük oranları[1]	33
Şekil 4.4 : % 100 Polyester yük oranları [1].....	34
Şekil 4.5 : Veri toplama sistemi(1), data logger(2), nem ölçme cihazı(3), debi ölçme cihazı(4)	35
Şekil 4.6 : Debi ölçme cihazı.....	36
Şekil 4.7 : Debi sensörü	37
Şekil 4.8 : Rüzgar tüneli test düzeneği	37
Şekil 4.9 : Rüzgar tüneli test sonuç grafiği.....	38
Şekil 4.10 : Deneylerin enerji tüketim değerleri [kWh]	40
Şekil 4.11 : Tambur devrine bağlı kurutma sonu nem değerleri [%]	41
Şekil 4.12 : Tambur devrine bağlı pamuk anlık hava debi değerleri [lt/s]	42
Şekil 4.13 : Tambur devrine bağlı polyester anlık hava debi değerleri [lt/s]	42
Şekil 4.14 : Tamburlarda katıların enine hareket biçimleri [9]	43
Şekil 4.15 : Ortalama hava debi değerleri [lt/s].....	45
Şekil 4.16 : Hava debisine bağlı kurutma sonu nem değerleri [%]	46
Şekil 4.17 : Hava debisine bağlı buharlaşma hızı [gr/s]	47
Şekil 4.18 : Ortalama hava debi değerleri [lt/s].....	48
Şekil 4.19 : Tekstil tipine bağlı kurutma sonu nem değerleri [%]	49
Şekil 4.20 : Tekstil tipine bağlı buharlaşma hızı [gr/s].....	50
Şekil 5.1 : 52 rpm – 2800 rpm buharlaşma hızı ve aktivite katsayısı grafiği	52

TAMBURLU KURUTMA MAKİNELERİNDE PROSES ÇALIŞMA KOŞULLARININ FARKLI TEKSTİL TİPLERİ İÇİN NEM ALMA HIZINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüz dünyasında küresel ısınmanın etkilerinin daha belirgin bir şekilde görülmesiyle ısı pompalı tamburlu kurutucuların kullanımı yaygınlaşmıştır. Isı pompalı kurutucuların kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte enerji tüketiminde iyileşmeler görülmesine rağmen, kurutma sürelerinde yüksek oranda artış görülmüştür. Bu konuda tamburlu kurutma makinelerinde hibrit çözümlere gidilmiştir. Bu sebeple optimum kurutma parametreleri oluşturulması, etkin kurutma parametrelerinin belirlenmesi ve sonucunda optimum nem alma değerlerinin elde edilmesi üzerine çalışma yapılması zorunlu hale gelmiştir.

Ayrıca mevcut tanımlanan kurutma standardının tam ve yarım yüklere yönelik olması kullanıcıların evlerinde uyguladıkları yük miktarını yansıtmamaktadır. Bu sebeple çeyrek yük olarak tanımlanan 2 kg yük üzerine çalışma yapılması ve çeyrek yük için optimum kurutma algoritmaları geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bununla birlikte tekstil sektörünün gelişmesi sonucu standart hesaplamalarda kullanılan pamuk tekstiline ek olarak sentetik tekstillerinin kurutma karakteristiğinin araştırılması ve optimum kurutma değerlerinin araştırılması zorunlu olmuştur.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında hibrit yapıda olan ısı pompalı ve ısıtıcılı tamburlu kurutma makinelerinde çeyrek yük pamuk ve sentetik tekstilin nem alma hızı ve kurutma karakteristikleri incelenmiştir.

Gerçekleştirilen tez çalışması 6 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde teze başlama sebepleri, tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar özet olarak sunulmuştur.

İkinci bölümde, tamburlu kurutma makinelerinde kurutma performansına etki eden parametrelerin belirlenmesi üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmaları paylaşılmıştır. Kurutmaya etki eden parametreler ayrı ayrı açıklanmıştır. Çoğunlukla bacalı tip kurutucularda ve daha az miktarda ısı pompalı kurutucularda yapılan çalışmalar yer almaktadır.

Üçüncü bölümde, tambur içerisinde tekstil üzerinden nem alma işlemi teorik olarak açıklanmıştır. Isı ve kütle geçişinin birlikte gerçekleştiği tambur içerisindeki taşınım ile kütle geçiş katsayısının ve pamuk tekstiline yönelik elde edilen katsayılar ile bu katsayılar etki eden parametreler paylaşılmıştır.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında kurutma performansına etki eden parametrelerin belirlenmesi için oluşturulan deney planı ve deney düzeneği tasarımı açıklanmıştır. Gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ve deney sonuçlarının açıklamaları yapılmıştır.

Beşinci bölümde, elde edilen deney sonuçları ile gerçekleştirilen analitik çalışmalar ve oluşturulan nem alma modeli paylaşılmıştır. Oluşturulan model ile kurutma sonunda toplam buharlaşan su miktarı %4.6 hata ile tahmin edilmiştir.

Altıncı ve son bölümde ise gerçekleştirilen tez çalışmasında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir ve daha sonraki çalışmalar için öneriler paylaşılmıştır.

Sonuç olarak, bu yüksek lisans tezinde elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Tambur devrinin hava debisine etkisi çok düşüktür, ihmal edilebilir.
- 42 ve 52 rpm'de ezme hareketi, 62 rpm'de santrifüj hareketi gerçekleşmektedir.
- Ezme hareketi yapılan 42 ve 52 rpm'de en iyi sonuç 52 rpm'de elde edilmiştir. Froude sayısı ile açıklandığı şekilde, 52 rpm'de, 42 rpm'e göre tekstiller daha yüksek noktadan düşmekte ve bu sayede tambur hacmi içerisinde daha iyi açılarak kurutma havası ile temas eden yüzey alanı daha fazla olmaktadır.
- Aynı fan motor devirlerinde, pamuk tekstilinin üzerinden geçen hava debisi sentetiğe göre daha yüksektir. Standart 2 kg pamuk ve sentetik yükte, sentetiğin toplam yüzey alanı pamuğa göre %30 daha fazladır.
- Pamuğun higroskopik yapıda olması ve su emiliminin yüksek olmasından dolayı, sentetiğin de higroskopik yapıda olmaması ve su emilim değerinin düşük olması dolayısıyla suyun yüzeyinde bulunması sebebiyle sentetik tekstiller pamuğa göre daha hızlı bir şekilde kurutulmaktadır.
- Aktivite katsayısı 1 değerine yakinken su tekstil yüzeyinde bulunmaktadır ve buharlaşma hızı yüzeydeki su bitene kadar artmaktadır ve maksimum noktasına ulaşmaktadır. Tekstil yüzeyindeki suyun bitmesiyle birlikte tekstil yapısında bulunan suyun kurutulması zorlaşmaktadır. Bu durum aktivite katsayısının düşmesi ile açıklanmaktadır ve bu durumda buharlaşma hızında yavaşlamaktadır.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PROCESS WORKING CONDITIONS ON DRYING RATE FOR DIFFERENT TEXTILE TYPES IN DRUM DRYERS

SUMMARY

In today's world, the use of heat pump drum dryers has become widespread as the effects of global warming are seen more clearly. Despite the improvement in energy consumption, there was a high rate of increase in drying times. In this regard, hybrid solutions have been made in drum dryers. For this reason, it has become necessary to work on establishing optimum drying parameters, determining effective drying parameters and obtaining optimum dehumidification values as a result.

In addition, the fact that the current drying standard is for full and half loads does not reflect the amount of load applied by users in their homes. For this reason, it is important to work on 2 kg load, which is defined as a quarter load, and to develop optimum drying algorithms for a quarter load. However, as a result of the development of the textile industry, it has been necessary to investigate the drying characteristics of synthetic textiles in addition to cotton textiles used in standard calculations and to investigate their optimum drying values.

Within the scope of this master's thesis, the dehumidification rate and drying characteristics of quarter-load cotton and synthetic textile in the hybrid drum dryer with heat pump and heater have been investigated.

The thesis study consists of 6 main parts. In the first chapter, the reasons for starting the thesis, the studies carried out within the scope of the thesis and the results obtained are presented in summary.

In the second chapter, literature studies on determination of parameters affecting the drying performance of drum dryers are shared. Mostly, there are studies performed on air-vented dryers and less amount of heat pump dryers.

In the third chapter, the dehumidification process on textile in the drum is explained theoretically. The mass transfer coefficient and the coefficients obtained for cotton textile and the parameters affecting these coefficients are shared in the drum where heat and mass transfer occur together.

In the fourth chapter, the experimental plan and the design of the experimental setup created within the scope of the thesis are explained. The results of the experiments and the explanations of the experimental results were shared.

In the fifth chapter, the analytical studies and the dehumidification model created are shared.

In the sixth and last part, the results obtained in the thesis study were evaluated and suggestions for further studies were shared.

As a concluding remark; all experimental results showed in this thesis were obtained. As a result,

- At constant cotton, synthetic load and fan engine speed, when the drum speed is increased from 42 rpm to 62 rpm, the air flow rate increases by about 1 liter/second. Since this corresponds to 0.001 m³/s, the effect of the drum rotation on the air flow is neglected.

- Cotton and synthetic textile movements were investigated at 42, 52 and 62 rpm by calculating the Froude number values. It has been determined that sticking to the wall - centrifugal movement at 62 rpm, falling - crushing movement at 42 and 52 rpm.
- The 62 rpm centrifugal movement provided the lowest evaporation rate. The textiles adhering to the wall act as a whole and mass transfer takes place from a single surface. Therefore, more time and energy is needed for the water molecules in the interior of the textiles to reach the textile surface by diffusion.
- At 42 and 52 rpm, where the crushing motion was made the best results were obtained at 52 rpm. At 52 rpm the textiles fall from a higher point than at 42 rpm, and thus, the surface area in contact with the drying air is greater by opening better within the drum volume.
- In order to see the singular effect of the air flow rate, 62 rpm with centrifugal movement was examined. In this condition, the singular effect was observed by increasing the air flow rate over the textile acting as a single solid load. In this condition, as the fan motor speed increases, the air flow increases and thus the water evaporation flow over the textile increases.
- At the same fan motor speeds, the air flow over the cotton textile is higher than the synthetic. At standard 2 kg cotton and synthetic load, the total surface area of synthetic is 30% more than cotton.
- Although the air flow rate is lower in synthetic load, the evaporation rate is higher than cotton. Since cotton has a hygroscopic structure and has high water absorption, synthetic textiles are dried faster than cotton because it is not in a hygroscopic structure and its water absorption value is low, so it is on the surface of water.
- The state of the water on the cotton textile depending on the textile moisture content is defined by the activity coefficient. When the activity coefficient is close to 1, the water is on the textile surface and the evaporation rate increases until the water on the surface is exhausted and reaches its maximum point. As the water on the textile surface runs out, it becomes difficult to dry the water in the textile structure. This is explained by the decrease in the activity coefficient, and in this case, the evaporation rate slows down.

1. GİRİŞ

Yeni yaşam şekillerinin gelişmesiyle birlikte evlerde tekstil kurutma işlemi önemli bir çalışma konusuna dönüşmüştür. Bu işlemi gerçekleştirmek için ev tipi kurutucular her geçen gün daha çok talep görmektedir. İlk dönemlerde kurutucu çözümü olarak bacalı kurutucular kullanılmıştır. Bacalı kurutucuların çok yüksek oranda enerji tüketmesi ve nemli havayı doğrudan atmosfere vermesinden dolayı sonrasında çözüm olarak yoğunlaştırıcı kurutucular tasarlanmıştır. Enerji tüketiminin düşmesinin sağlanamamasından dolayı farklı bir ısıtma yöntemi seçilerek kapalı çevrim ısı pompalı kurutuculara geçilmiştir ve enerji tüketiminde ciddi iyileşmeler sağlanmıştır. Özellikle Avrupa'da oluşturulan kurutucu standardı ile [1] birlikte ısı pompalı kurutucular zaruri hale gelmiştir. Ancak enerji tarafında sağlanan bu kazanım kurutma sürelerinin uzamasına sebep olmuştur. Bununla birlikte oluşturulan standart, tam ve yarım yüklere yani sekiz, dokuz ve dört, beş kilogram yüklere göre oluşturulmuştur. Günlük yaşamda ise insanlar daha az miktarda tekstil kurutmayı tercih etmektedir.

Tekstil endüstrisinin gelişmesi ile birlikte insanların kullandığı tekstiller daha fazla sentetik yapıdadır. Standartta sentetik yük tanımlanmış olsa bile kurutucu çalışmalarında genel olarak pamuk yük kullanılmaktadır.

İnsanlar, yaşamlarının zaman içerisinde gelişmesiyle birlikte daha az miktarda, daha hızlı bir şekilde, farklı yapıda olan çamaşırlarını kurutmaya ihtiyaçları oluşmuştur. Bu ihtiyaçları karşılamak için standart test prosedürlerine bağlı kalarak yeni oluşan düzenlere uygun optimum kurutucular geliştirilmelidir.

Bu tez çalışması kapsamında, oluşan yeni ihtiyaçları karşılamak amacıyla çeyrek yükte, pamuk ve sentetik olmak üzere iki farklı tekstil tipinde ve hibrit yapıda olan tamburlu kurutma makinesinde kurutma işleminde tekstilden nem alma sürecine etki eden parametrelerin belirlenmesi ve incelenmesi amaçlanmıştır.

Tez kapsamında Avrupa standartında [1] çeyrek yük olarak tanımlanan 2 kg yük ve yine standarda uygun olarak pamuk ve sentetik yük oranları belirlenmiştir. Hibrit makine olarak Beko DPHR8PB561W hibrit kurutma makinesi kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen ve 2. bölümde açıklanan literatür araştırmasından yapılan öngörülere göre test parametreleri belirlenmiştir ve deneylerin planı yapılmıştır. Bu kapsamda test parametresi olarak tambur devri, kurutma hava debisi ve yük çeşidi belirlenmiştir. Parametrik çalışma gerçekleştirilmesi için ısıtıcı gücü ve kurutma süresi sabit olarak belirlenmiştir. Bu sayede tekstil üzerinden nem alma hızının belirlenen üç parametreye göre değişimleri incelenmiştir.

Sabit ısıtıcı gücünde ve kurutma süresinde nem alma hızını hesaplamak için 3. bölümde açıklanan teorik hesaplamalar kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonrası elde edilen deney sonuçları 4. bölümde incelenerek analiz edilmiştir ve tekstil türünün, tambur devrinin ve hava debisinin tekstilden nem alma hızına etkileri paylaşılmıştır.

5. bölümde yapılan analitik çalışma ile ve 3. bölümde açıklanan kütle transfer katsayısının pamuk tekstili için hesaplaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile MiniTab analiz programı ile data analizi yapıp boyutsuz değerlerin tambur devrine ve hava debisine bağlı matematiksel modeli oluşturulmuştur.

Bu tez kapsamında standartta belirlenen çeyrek yükte pamuk ve sentetik tekstillerinin kurutma karakteristikleri incelenmiştir ve bu iki farklı yükün yapıları sebebiyle nem alma hız değerlerinin karşılaştırılması paylaşılmıştır.

Bölüm 3.'te açıklanan “aktivite katsayısı” değerinin literatürde sadece pamuk standart pamuk için belirli olması sebebiyle pamuk tekstilinin tambur devrine ve hava debisine bağlı nem alma profili modellenip paylaşılmıştır. Bu sayede pamuk çeyrek yükte test yapmadan kurutma sonu nem değerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kurutma işlemi günümüzde endüstrinin pek çok alanında kullanılmaktadır. Gıda kurutma, ağaç kurutma, bitki kurutma, tekstil kurutma vb. işlemler örnek olarak verilebilir. Kurutulmak istenen her ürünün ayrı bir karakteristik özelliği vardır ve bu ürünlerin kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi ve kurutucular geliştirilirken bu özelliklere karşılık verebilecek şekilde tasarlanmaları önem arz etmektedir.

Bu durum ev tipi kurutucularda da önemli bir konu olarak literatür içerisinde kendine yer bulmaktadır. Tambur hareketinin de dahil olduğu bir durumda tekstil üzerinden gerçekleşen ısı ve kütle transferinin tanımlanmasına yönelik literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır.

Bu kapsamda ev tipi kurutucularda tambur içerisinde gerçekleşen nem alma işlemine etki eden parametreler literatürde araştırılmıştır ve bölüm 2.1’de açıklanmıştır. Literatürde tambur içerisindeki nem alma prosesi ile ilgili yapılan çalışmalar bölüm 2.2’de açıklanmıştır.

2.1 Tekstil Kurutma İşlemini Etkileyen Parametreler

2.1.1 Tekstil tipi

Ev tipi kurutucularda Avrupa standardı [1] incelendiğinde pamuk ve polyester olmak üzere iki çeşit tekstil tanımlanmıştır. Enerji çalışmalarında ise sadece pamuk türü tekstil kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı tekstil türü olarak çalışmalarda pamuk kullanılmaktadır.

Tekstil yapısı incelendiğinde örülme veya dikilme yapılarından dolayı ve poroz yapıda oldukları için farklı özellikte kumaşların farklı su tutma oranları olmaktadır.

Porozite malzemenin boşluklarının toplam hacme oranı olarak tanımlanmaktadır. Gazlar ve sıvılar poroz malzemenin üzerinde bulunan boşluklardan geçmektedir. Poroz malzemenin özelliklerine göre gaz veya sıvılar bu boşluklar üzerinden poroz malzemenin katı kısmına emilebilir veya bu boşluklarda kalabilirler. Poroz malzemeler yapısal olarak ‘higroskopik olmayan’ ve ‘higroskopik’ olmak üzere ikiye

ayrılabilir. 'higroskopik olmayan' malzemelerde doymuş durumda boşluklar sıvı ile doludur. Isıtma adımlarında malzeme yapısında kırıxıklık oluşmamaktadır. higroskopik malzemelerde ise poroz yapı ile sıvı arasında fiziksel bağlar oluşmaktadır. Bu sebeple ısıtma adımlarında kırıxıklıklar görölmektedir. Bu sebepten ötürü higroskopik yapılarda sıvı transferi daha karmaşıktır [2].

Nem içeren poroz yapıların farklı fiziksel, kimyasal, mekanik yapıları kurutma sürecini etkilemektedir. Kurutma prosesini tanımlarken malzemenin mekanik yapısı ve oluşan fiziksel bağlar önemlidir. 'higroskopik olmayan' yapılarda kurutma işlemi suyun serbest halde olmasından dolayı daha kolay gerçekleşmektedir ve su doğrudan buharlaştırılmaktadır. Burada, buharlaşma hızı kurutma performansını doğrudan etkilemektedir. 'higroskopik' malzemelerde ise bu durum serbest halde olan suyun buharlaşmasına kadar bu şekilde gerçekleşir. Ancak kurutma devam ettikçe poroz yapı ile bağ kurmuş olan su moleküllerini buharlaştırmak zorlaşmaktadır. Bu sebeple higroskopik malzemeleri kurutmak için daha fazla enerji harcamak ve kurutma süresini uzatmak gerekmektedir [3].

Poroz yapıdaki farklılıklar tekstil malzemeleri değıştikçe de görölmektedir. Değışen yapılara göre her bir tekstil türü nem miktarına göre farklı davranışlar sergileyecektir. Tekstil yapılarında suyun hareketi incelendiğinde sabit nem değerlerinde pamuğun polyesterde göre çok daha hızlı bir şekilde su emilimi gerçekleştirdiği görölmektedir. Nem değeri arttıkça pamuktaki su emilimi daha hızlı olmasına rağmen polyesterde su emilim hızı nem miktarı arttıkça artmamaktadır [4].

Higroskopik olan pamuk, ipek gibi tekstillerde suyun emilme değeri daha hızlı gerçekleşmekte ve poroz yapı ile su arasında fiziksel bağlar oluşmaktadır. Higroskopik olmayan polyester yapıları tekstillerde ise emilim daha yavaş oluşmakta ve tekstil yapısı ile su arasında fiziksel bağlar oluşmamaktadır [5]. Bu sebeple kurutulmak istenen pamuk gibi kumaşlarda buharlaşma için daha fazla enerjiye ve daha uzun süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Polyesterde ise su boşluklarda serbest halde bulunduğundan, buharlaşma daha kolay olmaktadır ve daha az enerji ve süreyle gerçekleşebilmektedir.

Poroz yapılarda akış hızının basınç değışimine oranı olarak tanımlanan Darcy akışı, poroz yapılar arasındaki farkı açıklamakta kullanılır. Tekstil türleri darcy akışı üzerinden incelendiğinde pamuk gibi higroskopik yapıların darcy akışının polyester gibi düşük higroskopik değeri tekstillere göre daha yüksek olduğu görölmüştür.

Tekstil nem miktarı arttıkça darcy akış direnci pamukta daha da artmaktadır, bu durum tekstilin suyu emmesi ile birlikte tekstilin kalınlaşmasına sebep olmaktadır. Polyesterde ise nem oranı arttıkça darcy akış direnci değişmemektedir. Bu durumda polyesterde suyun emilme oranının çok düşük olduğu, suyun polyester tekstilinin üzerinde kaldığı ve tekstil tarafından çok az miktarda emildiğini göstermektedir [6].

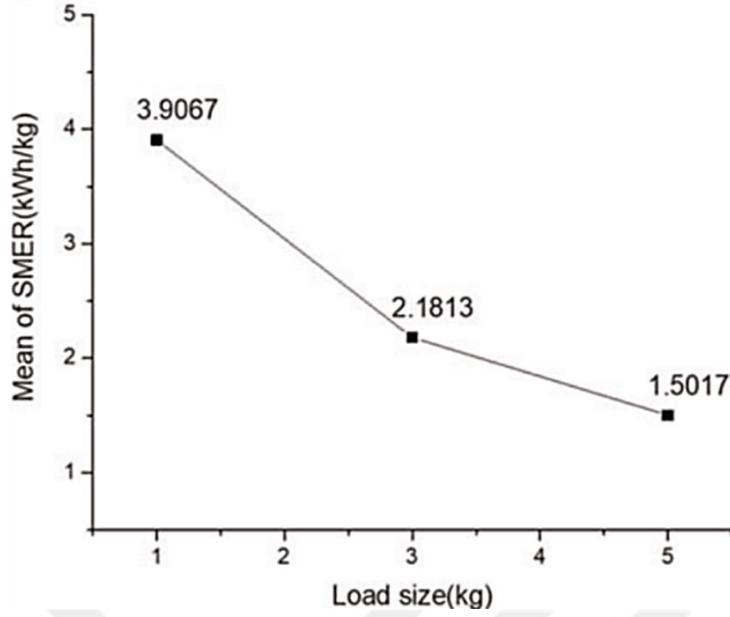
2.1.2 Yük miktarı

Yük miktarı kurutma performansını etkileyen bir parametredir. Bu bölümde pamuk tekstilinde SMER ve tekstil nem değerinin yük miktarına bağlı değişimleri paylaşılmıştır.

Yapılan çalışmalarda kurutma performans değeri genel olarak SMER (denklem 2.1) değeri üzerinden kıyaslanmaktadır. SMER değeri 1 kg suyun buharlaşması için gerekli enerji miktarını göstermektedir. Denklem 2.1’de, T kurutma süresini, W ısıtıcı gücünü, H ise tekstil üzerinden buharlaştırılan toplam su miktarını göstermektedir.

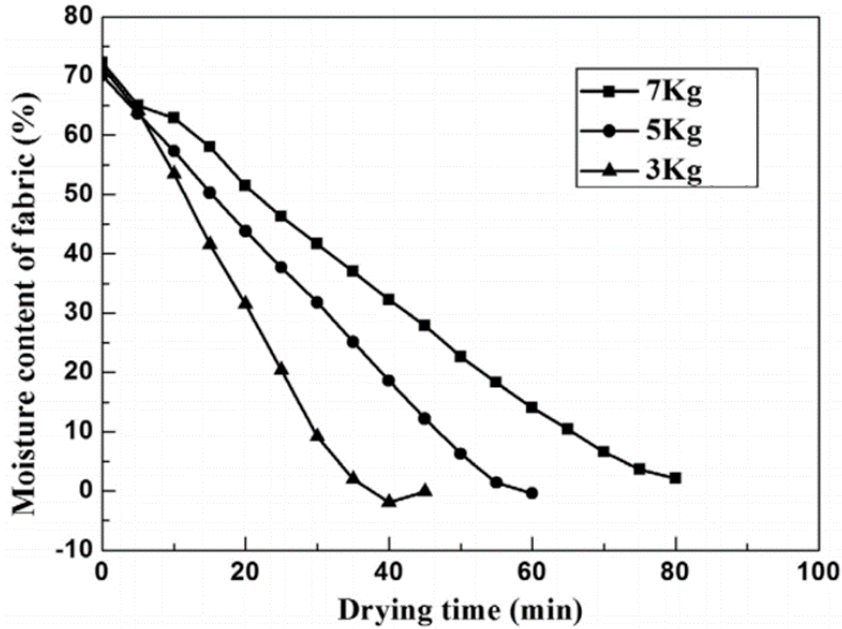
1, 3, 5 kg yük değerlerinde gerçekleştirilen testlerde sonuçlar incelendiğinde (Şekil 2.1), yük miktarı arttıkça SMER değerinin azaldığı görülmektedir. Bu duruma sebep ise sisteme sabit bir ısıtıcı güç uygulanmasından dolayı yük miktarı arttıkça mevcut ısının daha fazla tekstille etkileşime girmesi ve tekstilin üzerinden buharlaşmanın sağlanmasıdır. Düşük yükte ise yeterli ısıtıcı güç bulunmasına rağmen hava ile temas eden tekstil alanının az olmasından dolayı sıcak hava ve tekstil etkileşiminin az olması, dolayısıyla birim kütledeki tekstilin kurutulması için gereğinden fazla enerji harcanması gerekir. Bu sonuç yorumlandığında düşük yük ile kurutmalarda daha az ısıtıcı gücü ile aynı sürede kurutma yapılabileceği ve daha düşük bir SMER değeri dolayısıyla daha az enerji tüketiminin sağlanabileceği görülmektedir [7].

$$SMER = \frac{T * W}{H} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1 : Yük miktarına bağlı SMER grafiği [7]

Şekil 2.2'de yük miktarına bağlı kurutma performansı gösterilmiştir. Grafik incelendiğine kurutma eğrisinin yük miktarı düştükçe azaldığı görülmektedir. Bu duruma sebep ise yük miktarının artması ile birlikte belirli tambur hacmi içerisinde tekstillerin yeteri kadar açılmaması ve bu sebeple sıcak ve düşük nemli havanın tekstil ile temasının azalmasıdır [8].

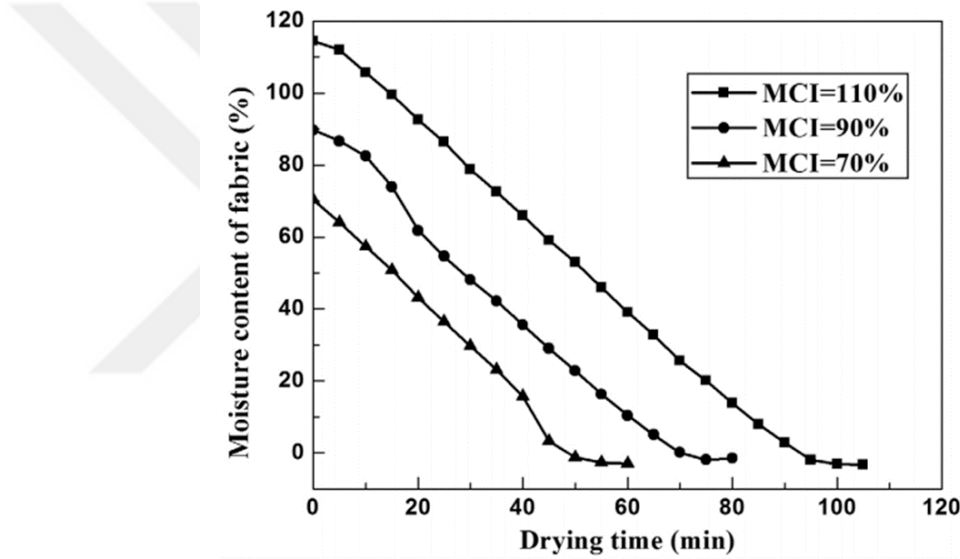


Şekil 2.2 : Yük miktarına bağlı tekstil nem değişimi grafiği [8]

2.1.3 Tekstil bağıl nemi

Tekstilin başlangıç nem değerinin kurutma performansına etkisi araştırılmıştır.

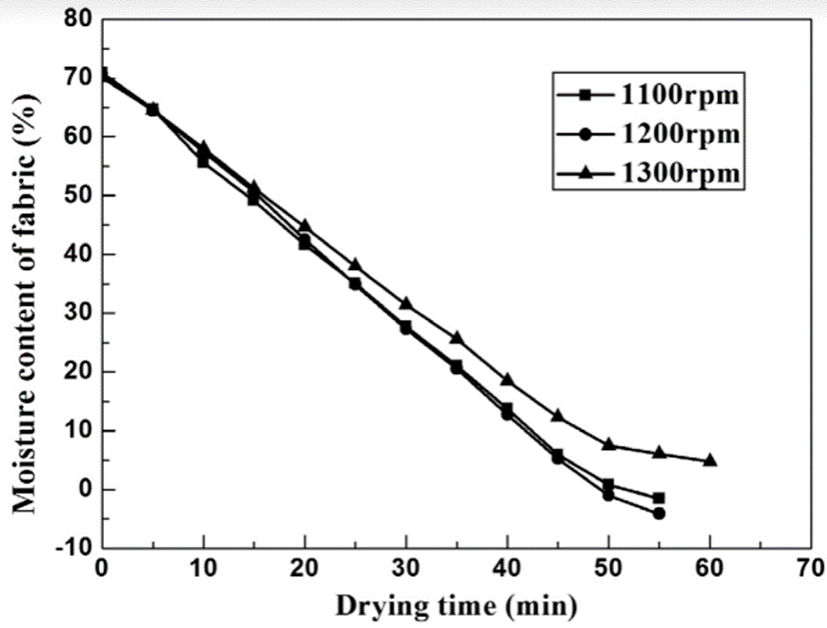
Şekil 2.3'te tekstil başlangıç neminin kurutma süresine etkisi gösterilmiştir. Sabit ısıtıcı gücünde ve hava hızında başlangıç nem değerlerinin farklı olmasına rağmen grafik eğrilerin benzer olduğu görülmektedir. Bu durum farklı başlangıç nem değerlerinin tekstil üzerinden nem alma hızına bir etkisi olmadığını göstermiştir [8]. Evlerde yıkama ve kurutma prosesleri bir olarak düşünüldüğünde çamaşır makinelerinin sıkma verimlerinin yükselmesiyle kurutma sürelerinin dolayısıyla enerji tüketiminin azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla tekstilin başlangıç nem değerinin kurutma karakteristiğini değiştirmedeği görülmüştür.



Şekil 2.3 : Tekstil başlangıç nem değerine bağlı kurutma grafiği [8]

2.1.4 Tambur devri

Şekil 2.4'te tekstil nem oranının sabit ısıtıcı gücü, yük ve hava hızında tambur devrinin değişimine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 1300 rpm motor devrinde diğer devirlere göre daha kötü kurutma performansı görülmüştür. Motor devrinin artması ile birlikte tambur çeperlerine yaklaşan tekstil üzerinden nem almak daha zor hale gelmektedir. Bu sebeple kurutma proseslerinde optimum tambur devirleri aranmaktadır[8].



Şekil 2.4 : Tamburlu kurutucu motor devrine bağlı kurutma grafiği [8]

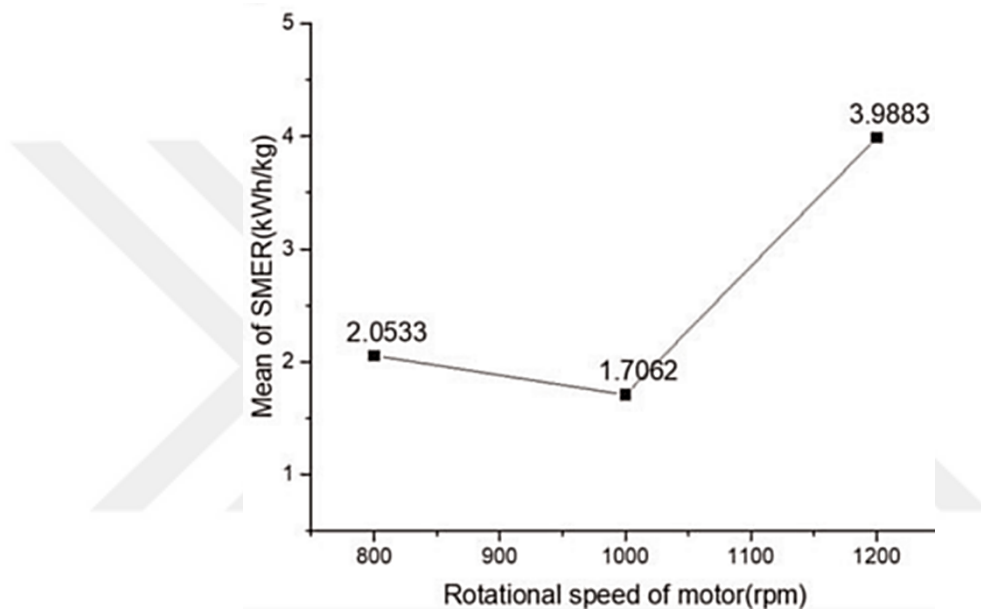
Tekstil motor devrine bağlı hareketini daha iyi anlamak için dönen silindirlere katıların enine hareketini incelemiştir. Gerçekleştirilen çalışma incelendiğinde katılar tambur devrine bağlı olarak temelde kayma hareketi, yuvarlanma hareketi, ezme hareketi ve santrifüj hareketi olmak üzere toplamda 4 farklı harekette bulunmaktadır. Tanımlanan 3 farklı hareketi etkileyen en önemli parametrelerden biri dönmeye özgü Froude sayısıdır (denklem 2.2). Froude sayısı genel anlamda atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 incelendiğinde santrifüj kuvveti arttıkça yer çekimi kuvvetine karşı olan kazanım artar ve bir noktadan sonra katıların tambur çeperlerine yapıştığı gözlenmektedir [9].

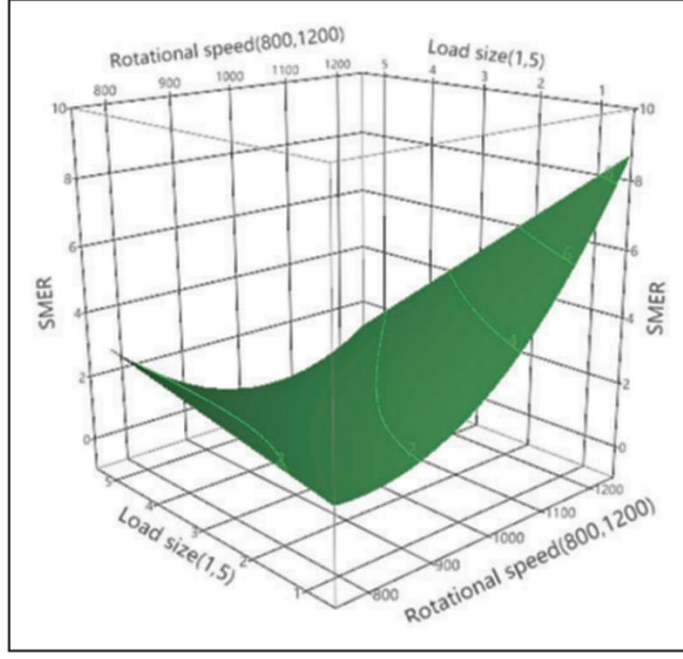
Motor devrine bağlı diğer bir çalışma incelendiğinde ise Şekil 2.5'te gösterildiği üzere en düşük SMER değerinin 1000 rpm motor devrinde elde edildiği görülmektedir. En yüksek SMER değerinin yani en yüksek enerjinin harcandığı durum ise 1200 rpmde görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde tamburlu kurutma için optimum bir tambur devri olduğu görülmektedir. Bu durumu anlamak için tekstil hareketinin tambur içerisinde kat ettiği yollar incelenmelidir. Yapılan çalışmada 1000 rpm de en iyi sonucun görülmesi tekstilin bu hızda ezme hareketi yapmasından dolayı oluşmuştur.

Ezme hareketi yapan tekstil daha iyi karışmaktadır ve bu sayede tambur girişinden gelen sıcak hava tekstilin daha fazla noktasına temas etmekte, bu sayede de ısı ve kütle transferi için gerekli yüzey alanın artması sağlanmış olmaktadır. En düşük SMER değerinin elde edildiği 1200 rpm'de ise santrifüj kuvvetinin iyice artmasıyla tekstiller çepere doğru sıkışmışlardır, bu sebep ile sıcak hava tekstil yüzeyine homojen olarak ulaşamamıştır ve kurutma sürelerinin uzaması ile birlikte tüketilen enerji miktarında yükselmiştir [7].



Şekil 2.5 : Tamburlu kurutucu motor devrine bağlı SMER grafiği [7]

Tambur devri ve yük miktarı Şekil 2.6'da birlikte incelendiğinde ise 1 kg yükte motor devri arttıkça SMER değerinin 1.78'den 6.67'ye çıktığı görülürken bu değer 5 kg yükte SMER değerinin 0.5'ten 2.33'e çıktığı görülmüştür. Düşük SMER değerleri 1000 rpm motor devrinde görülmüştür.. 1 kg yükün 1200 rpm'de SMER değerinin 5 kg'a göre çok daha yüksek olması ise 5 kg yük tambur içerisinde daha fazla hacim kaplamasından ve ısı ve kütle geçiş alanının 1 kg yüke göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır [7].

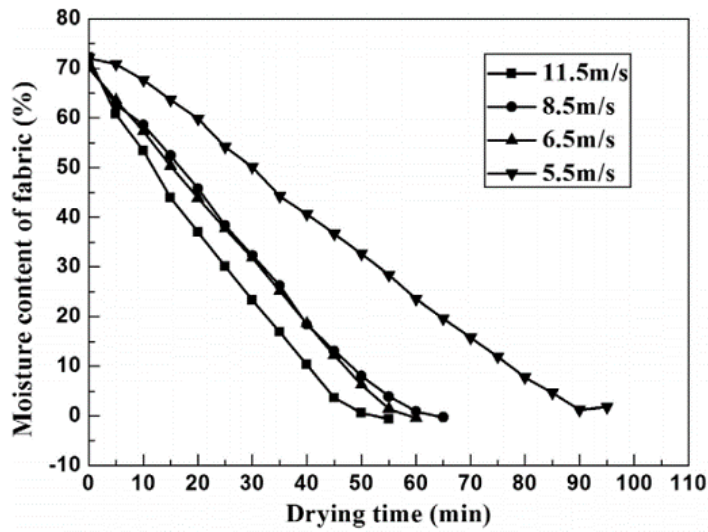


Şekil 2.6 : Tamburlu kurutucu motor devrine ve yük miktarına bağlı smer grafiği [7]

2.1.5 Hava debisi

Tekstil kurutma prosesinde hava debisinin kurutma performansına etkisi araştırılmıştır. Araştırılan çalışmalarda, hava debisi değeri tambur hacmine bağlı değişkenlik gösterebileceği için, hava hızı değerinin kullanıldığı görülmüştür.

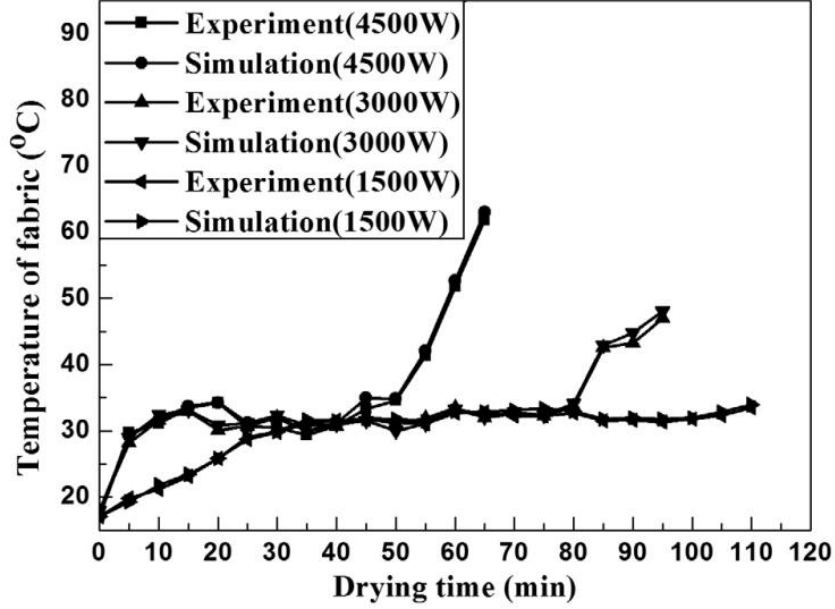
Şekil 2.7'de hava hızına bağlı tekstil nem değerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Hava hızının artması ile birlikte ısı ve kütle geçiş katsayısı artmaktadır. Sonuç olarak kurutma sürelerinin azaldığı görülmüştür [8].



Şekil 2.7 : Tamburlu kurutucu hava hızına bağlı SMER grafiği [8]

2.1.6 Isıtıcı gücü

Şekil 2.8’de sabit hava hızında tekstil sıcaklığının ısıtıcı gücüne göre zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekil 2.8 incelendiğinde tekstil sıcaklığının kurutma aşamalarına göre farklılık gösterdiği görülmüştür [8].



Şekil 2.8 : Tamburlu kurutucu ısıtıcı gücüne bağlı tekstil sıcaklık grafiği [8]

Bu duruma sebep olarak, ilk kurutma bölümünde düşük sıcaklıkta bulunan tekstilin ve tamburun sıcaklığı doğrudan yükselmektedir. İkinci kurutma adımına geçildiğinde buharlaşma için daha fazla enerji gerektiği için tekstil sıcaklığı az bir miktarda değişmektedir. Son kurutma adımına gelindiğinde tekstil iç yapısında bulunan su moleküllerinin buharlaşma hızının düşmesiyle mevcut enerji tekstilin sıcaklığını tekrardan yükseltmektedir[10].

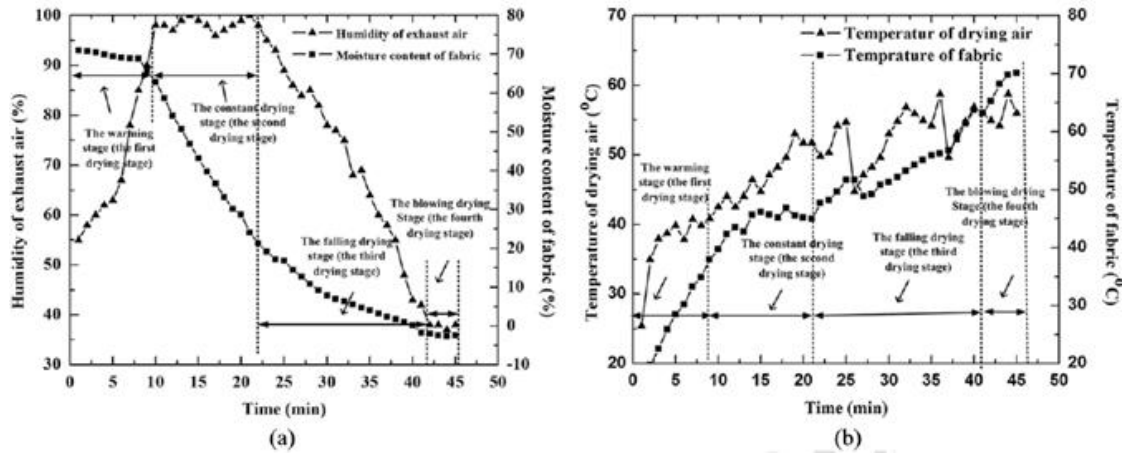
2.1.7 Kademeli kurutma

Yapılan araştırmalarda tamburlu ev tipi kurutucularda kurutma prosesinin zamana bağlı değişimi ve bunun nedenleri araştırılmıştır. Bu duruma sebep olarak ise poroz yapıda olan tekstillerin içerisinde veya üzerinde bulunan su moleküllerinin aralarındaki bağ yapılarının gücüne bağlı olarak kurutma karakteristiğinin değişmesi olduğu düşünülmüştür. Ev tipi bacalı kurutucuların enerji verimliliğini artırmak için kurutma prosesinin aşamaları incelenmiş ve optimum kurutma çevrimini elde edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışma kapsamında kurutma işlemini doğrudan etkileyen ısıtıcı gücü, hava akış hızı, tamburun devir değeri ve kurutma çevrim süresi ana

parametreler olarak belirlenmiştir ve bu parametreler genel olarak bacadaki hava sıcaklığı yerine bacadaki hava nem değeri ile ilişkilendirilmiştir.

Şekil 2.9’da bacadan çıkan havanın bağıl nem değerinin kurutma boyunca değişiminin zamana bağlı grafiği gösterilmiştir ve kurutma çevrimi bu grafik üzerinden 4 aşamaya bölünmüştür.

Enerji tüketimindeki değişimi gözlemlemek amacıyla 4 bölüme ayrılan kurutma modeli için ısıtıcı güç değeri, hava akış hızı değeri ve tambur devir değeri parametrik olarak değiştirilmiştir ve kurutma süreleri ile enerji tüketimindeki değişimler incelenmiştir. Sonuç olarak, enerji tüketiminin iyileştirildiği algoritmanın belirlenmesi ve bu 4 kurutma adımında kullanılan farklı algoritmaların nedenlerinin açıklaması yapılmıştır.



Şekil 2.9 : Kurutma adımında zamana bağlı hava bağıl nemi ve sıcaklığı [10]

Deney sonuçları incelendiğinde, Test 2 değeri en iyi sonuç olarak elde edilmiştir. Kademesiz ve hep aynı şekilde çalışan Test 1 ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak enerji tüketiminde %21.5 iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

Bu iyileşmenin sebebi olarak 4 kurutma adımı incelenmiştir:

Birinci kurutma adımında Şekil 2.9’da görüldüğü üzere bacada havanın bağıl nemi, tekstil sıcaklığının hava sıcaklığından çok düşük olması nedeniyle, neredeyse sabit kalmaktadır. Bu yüzden tekstil ve tamburun sıcaklığının hızlıca yükseltilebilmesi için yüksek ısıtıcı gücü (4000 W) gerekmektedir. Hava akış hızının düşürülmesi (6.88 m/s) ile havanın tambur içinde daha uzun süre kalması sağlanarak tekstil ve tamburun ısıtılma süresinin azaltılması sağlanmaktadır. Tambur devrinin ise 50-55 rpm

aralığında tutularak tekstilin tambur içerisinde yayılarak sıcak hava ile temas yüzeyinin artırılması sağlanmıştır.

İkinci kurutma aşamasında tekstil yüzeyinde ve tekstilin örme kısmındaki boşluklu yapılarda fazla miktarda serbest haldeki su moleküllerinin buharlaştırılması için yüksek miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşamada nem alma hızı diğer aşamalara göre en yüksek seviyededir. Bunun en önemli sebebi su moleküllerinin serbest yapıda olmaları ve kolay bir şekilde buhar haline dönüştürülebilmeleridir. Bu sebeplerden dolayı ikinci aşamada yüksek ısıtıcı gücü (4000W), buharlaşma hızının yüksek tutulması için yüksek hava akış hızı (8.5 m/s) ve çamaşırların kurumaya başladıkça su miktarının azalmasıyla birlikte açılmasının daha kolay olmasından dolayı tambur devrinin 45-50 rpm aralığında olması gerektiği belirtilmiştir. Tambur devrinin bir miktar düşürülmesiyle tekstile kayma, düşme, sallanma, dönme gibi daha karmaşık yapıda bir hareket ortamı oluşturulmuştur.

Üçüncü kurutma aşamasında ise tekstil üzerinde serbest halde olan su moleküllerinin azalmasıyla birlikte tekstil yüzeyinde ıslak temas alanı azalmıştır ve bu yüzden hava sıcaklıkları Şekil 2.9'da görüldüğü üzere bir anda artmıştır. Bu durum kısmi buhar basıncının hızlı bir şekilde yükselmesine sebep olmaktadır. Tekstil içerisinde bulunan su moleküllerinde ise kısmi buhar basıncı aynı oranda artmamaktadır ve böylece, hava ve tekstil arasındaki buhar basıncı farkı oluşmaktadır. Böylece, tekstil üzerinden gerçekleşen buharlaşmanın hızı azalmaktadır. Bu yüzden bu aşamada ısıtıcı gücünün biraz daha düşürülmesinin buharlaşma hızını etkilemediği görülmüş ve ısıtıcı gücü 3000 W değerine getirilmiştir. Bu sayede tekstil sıcaklığının istenmeyen değerlere çıkması da önlenmiş olmaktadır. Hava akış hızı 8.55 m/s değerinde tutularak tekstil üzerinden buharlaşmanın hızının düşmemesi sağlanmıştır. Tambur devri ise 40-45 rpm aralığına alınarak bu sayede çamaşırın tamamen açılması sağlanarak ıslak kısımlarla temasın artırılması amaçlanmıştır. Yüksek tambur hızlarından kaçınılmasının sebebi olarak tekstilin tambur çeperine yakın hareketinden kaçınmak ve ısı kütle geçişinin azalmasının önüne geçmek olmuştur.

Son aşamaya gelindiğinde tekstil üzerinde hala bir miktar su bulunmaktadır ve bu su molekülleri doğrudan tekstil ile kimyasal bağ oluşturacak şekilde emilmiştir, bir diğer bağ türü ise su moleküllerinin kılcal gözenekler tarafından tutulması şeklindedir. Serbest haldeki su moleküllerini buharlaştırmaya göre bu bağları koparıp buharlaştırmak çok daha zordur. Bu aşamada yüksek ısıtıcı güçleri tekstil sıcaklıklarını

aşırı yükseltebilir ve tekstilde hasarlanmalara sebep oluşturabilmektedir. Bu durumdan kaçınmak için daha düşük ısıtıcı gücü (1500 W) kullanmak gerekmektedir. Aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamak konusunda etkili olmaktadır. Bu aşamada hava akış hızının azaltılması (6.88 m/s) ve tambur devrinin 45-50 rpm değerlerinde olması en optimum sonuç olarak paylaşılmıştır.

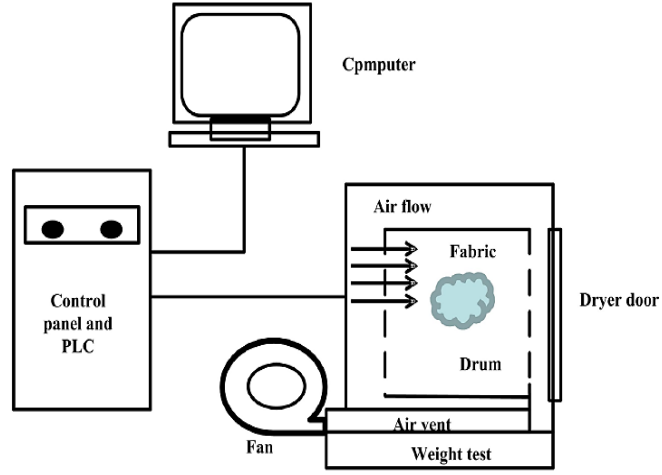
Oluşturulan yeni algoritma kullanılarak benzer kurutma sürelerinde %21.5 enerji tasarrufu sağlanmış ve aynı zamanda tekstil ve hava sıcaklıklarının istenmeyen düzeylere gitmesi önlenmiştir. Bu sayede bacalı kurutma makinelerinde optimum bir kurutma algoritması oluşturulmuştur [10].

2.2 Tamburlu Kurutma Makinelerinde Modelleme Çalışmaları

2.2.1 Poroz pamuk kumaşın kurutma işleminde ısı ve kütle geçişinin matematiksel modellenmesi

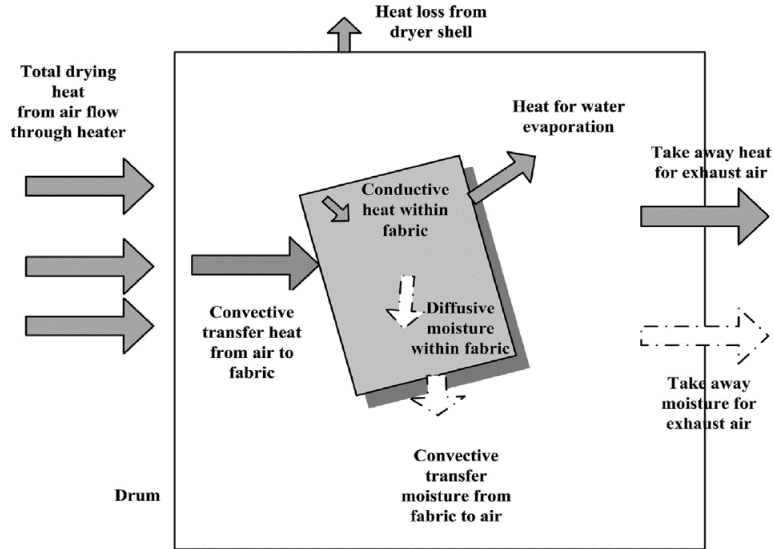
Ev tipi tekstil kurutma makinelerinde kurutma performansına etki eden parametrelerin araştırılması üzerine pek çok çalışma bulunmakla birlikte genel olarak tambur içerisinde gerçekleşen ısı ve kütle transferinin matematiksel olarak açıklanması konusunda farklı yöntemler izlenmiştir. Bu yöntemler genel olarak deneysel verilerin modellenmesi ya da belirli kabuller altında ısı ve kütle transferi açısından korunum denklemleri ile oluşturulan modeller olmuşlardır. Tambur içerisinde tekstillerin dairesel hareket yapması, tekstillerin iç içe girmesi ve rastgele harekette bulunmaları sebebiyle ısı ve kütle geçişini matematiksel olarak açıklanmasını zorlaştırmaktadır. Yapılan çalışmada ev tipi bacalı kurutucularda tambur içerisinde tekstil kurutma işlemini zamana bağlı lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile matematiksel olarak incelemişlerdir. Kurutma esnasında gerçekleşen ısı ve kütle geçişinin birbirleri ile bağlantılı olması sebebiyle sistemi hem sıcaklık verilerine göre hem de nem değerlerine göre modellemişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekil 2.10'da gösterildiği üzere oluşturulan deney tasarımında tekstilin giriş nemi, yük miktarı, ısıtıcı gücü, hava akış hızı ve tambur devri deney parametreleri olarak belirlenmiştir. 16 farklı test planlanmıştır ve deneyler kontrollü olarak gerçekleştirilip elde edilen veriler matematiksel model ile karşılaştırılmak üzere kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.10 : Test Düzenegi [8]

Yapılan çalışmada matematiksel tambur ve tekstil Şekil 2.11’de gösterildiği üzere bir kontrol hacmi içerisinde kabuller yapılarak oluşturulmuştur. Temel olarak yapılan hesaplamalar üç bölümden oluşturulmuştur. Öncelikle tekstilin tambur içerisinde kuruma mekanizması incelenmiştir, sonrasında kurutma sırasında tekstil üzerinden gerçekleşen ısı ve kütle geçişinin matematiksel olarak tanımlanması yapılmıştır, son olarak kurutma havasının ve tekstilin ısıl özellikleri belirlenmiş ve sınır şartları sisteme uygulanarak lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler tümüyle oluşturulup sistem çözülebilir hale getirilmiştir.



Şekil 2.11 : Tekstil üzerinden ısı ve kütle transfer modeli[8]

Oluşturulan denklemlerin çözülebilmesi için hava ve tekstilin başlangıç nem içeriklerinin homojen olduğu, tekstillerdeki boyut değişiminin ihmal edilebilir olduğu, tekstilin tambur hareketi ile dairesel ve homojen bir şekilde dağıldığı, kurutma ortam basınç değerinin standart atmosfer değerinde olduğu, havanın ısıtıcıda ısıtıldıktan sonra tamamen kuru olduğu ve çıkıştaki nem değerinin tamamen tekstilden alınan nem olduğu, havada iletim ve taşınım ile ısı geçişi gerçekleştiği, havada kütle geçişinin difüzyon ve taşınım ile gerçekleştiği, tekstil içerisinde ısı transferinin iletim ile olduğu ve kütle transferinin difüzyon ile gerçekleştiği, suyun buharlaşma işleminin sadece tekstil yüzeyinde gerçekleştiği, havanın tekstilin etrafından laminar akış durumunda geçtiği kabulleri yapılmıştır.

Yapılan kabuller sonrası oluşturulan model nümerik olarak çözülmüştür. Çözümler sonucunda tekstilin zamana bağlı nem ve sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Deneylede kullanılan tekstilin başlangıç nemi, yük miktarı, ısıtıcı gücü, hava akış hızı ve tambur devri parametreleri kullanılarak 16 farklı durum nümerik olarak çözülmüştür.

2.2.2 Etkin kurutma parametrelerinin belirlenmesi ve kurutma performansına etkileri

Tamburlu kurutucularda kurutma performansını etkileyen parametreler araştırılmıştır. Yu ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada konuyu detaylı bir şekilde incelemiştir. Yapılan çalışmada bacalı tip 4500 W gücünde ısıtıcılı kurutucu kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak tambur motor devri, hava akış hız ve yük miktarı parametre olarak kullanılmıştır ve toplamda 20 farklı durum test edilmiştir. Testlerde SMER değeri denklem 2.1 ile hesaplanmıştır.

Tekstillerin nem oranı ise denklem 2.3 ile gösterilmiştir. μ_i değeri anlık nem oranını, m_{fi} değeri o andaki tekstilin ağırlığını, m_f ise tekstilin kuru haldeki ağırlığını göstermektedir.

$$X = \frac{m_{fi} - m_f}{m_f} * 100\% \quad (2.3)$$

Gerçekleştirilen testler sonrası sonuçlar sayısal olarak incelenmiştir ve etkin olan SMER ve kurutma sonu değerlerine etki eden parametreler açıklanmıştır. SMER değerini etkileyen iki önemli tekil faktör bulunmuştur.

Yapılan sayısal analiz sonucunda kurutma sonu nem değerine etki eden en önemli ikili parametrenin motor devri ve yük miktarı olmuştur. SMER değerinde elde edilen sonuçların kurutma sonu nem değeri için bir yansıması olarak değerlendirilmektedir. 800 rpm motor devrinde kurutma sonu nem değeri yük miktarı arttıkça artmıştır. Bu duruma sebep ise 800 rpm'de kayma hareketi yapan tekstilde, yük miktarı arttıkça kurutma havasının tekstil ile temasının zorlaşmasıdır. Bu yüzden tekstil üzerinden ısı ve kütle geçişi azalmıştır. 1200 rpm'deki durum incelendiğinde 800 rpm'e ters olarak yük miktarı arttıkça kurutma sonu nem değerinde azalma görülmüştür. Bu durum yukarıda açıklandığı üzere 5 kg yüke ulaşan kurutma havasının daha fazla olması ve enerji transferi için daha fazla alan olmasından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen sonuçlar ile etkin parametrelerin bulunması sonrasında Buckingham Pi Teoremi kullanılarak SMER değeri sayısal analiz yöntemiyle tahmin edilmiştir. Yapılan hesaplama sonrası 3 farklı pi sayısı elde edilmiştir.

$$\Pi_1 = \frac{m_f}{m_h} \quad (2.4)$$

$$\Pi_2 = \frac{V_h}{V_t} \quad (2.5)$$

$$\Pi_3 = Fr = \frac{V_t^2}{r * g} \quad (2.6)$$

İlki (denklem 2.4) tekstil yük miktarının tambur içerisindeki hava kütesine oranı olan ağırlık oranıdır. İkincisi (denklem 2.5) hava hızının tambur hızına oranı olan bağıl hava akış oranıdır. Üçüncü pi sayısı (denklem 2.6) için Froude sayısı kullanılmıştır [9]. Yapılan deneyler sonucunda bu üç değer her deney için hesaplanmıştır ve SMER değeri sayısal olarak tahmin edilmiştir. SMER formülü incelendiğinde ağırlık oranı ve Froude sayısının SMER değerini etkileyen en önemli parametreler olduğu görülmüştür. Bu iki değer tambur içerisindeki tekstil hareketini doğrudan etkilemesi sebebiyle SMER değerine etkileri yüksek olmuştur. R² değeri olarak %73.8 değerine ulaşılmıştır.

Sonuç olarak daha yüksek kurutma verimlerinin elde edilmesi için yüksek Froude sayısı ve ağırlık oranının gerekli olduğu gösterilmiştir [7].

2.3 Sonuçlar

Literatür incelendiğinde çalışmaların çoğunlukla pamuk tekstili üzerine olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple pamuk ve sentetiği karşılatırmak için yapısal ve karakteristik özellikleri araştırılmıştır ve bu özelliklerin kurutma performansına etkileri bu tez çalışmasında paylaşılmıştır.

Tambur devrinin, hava debisinin, ısı gücünün, yük miktarının ve tekstil başlangıç neminin kurutma performansına etkileri paylaşılmıştır. Tez alışması kapsamında; ısı gücü, yük miktarı ve tekstil başlangıç nemi sabit tutularak, tambur devrinin ve hava debisinin farklı tekstil tiplerinde kurutma performansına etkileri araştırılmıştır.

Kurutma modelleme çalışmalarında çoğunlukla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Tekstillerin tambur içerisinde gerçekleştirdiği dönme hareketinin karmaşık olması ve geometrinin sürekli değişmesinden dolayı taşınım katsayısının, kütle transfer katsayısının, buharlaşma debisinin hesaplamalarında zorluklar oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda ise elde edilen deneysel sonuçlar Buckingham Pi teoremi ile oluşturulan ampirik denklemler ile modellenmiştir.

3. TEORİK ÇALIŞMALAR

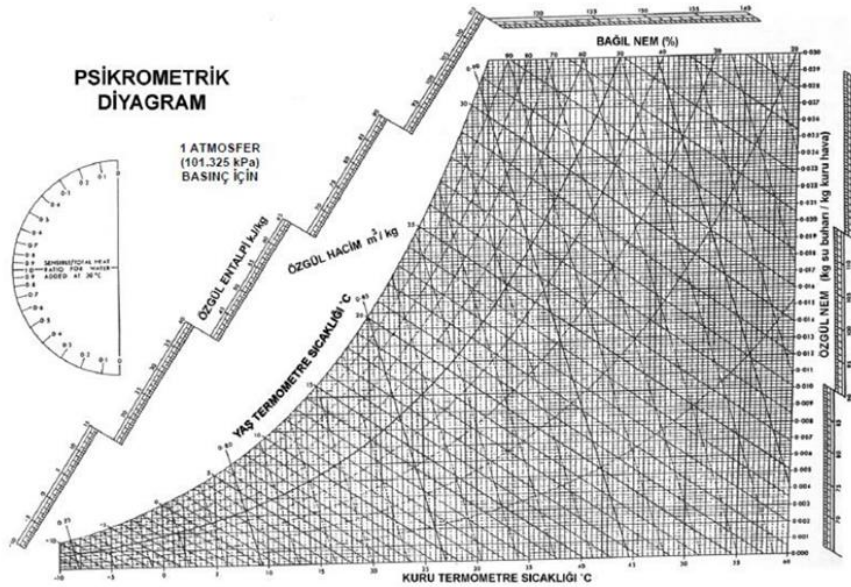
3.1 Psikrometri

Psikrometri; nemli havanın termodinamik özellikleri ile bu özellikleri kullanarak nemli havadaki işlemler ve şartlar ile ilgilenen termodinamiğin bir dalıdır.

Nem alma işlemlerinde hava ve su buharı mükemmel gaz olarak kabul edilmektedir. Mükemmel gaz yaklaşımıyla nemli hava su buharı basıncı ve hava basıncının toplamı ile hesaplanabilmektedir (denklem 3.1).

$$P = P_h + P_b \quad (3.1)$$

Isı pompalı kurutma makinelerinde, kurutma işleminde tekstil üzerinden nem alma ve buharlaştırıcı üzerinden de havanın yoğuşturulması işlemlerini içermesinden dolayı psikrometrik diyagram (Şekil 3.1) önemli bir yer tutmaktadır. Diyagram sayesinde nem alma ve yoğuşma miktarları hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.1 : Psikrometrik diyagram [11]

Nemli hava içerisindeki su buharı kütlesinin kuru hava kütlesine oranı özgül nem olarak (denklem 3.2) tanımlanır.

$$\omega = \frac{m_b}{m_h} [kg_{sb}/kg_{kh}] \quad (3.2)$$

m_b : Su buharı miktarı [kg]

m_h : Kuru hava miktarı [kg]

olarak tanımlanmaktadır.

İdeal gaz denklemi denklem 3.2'ye uygulanırsa denklem 3.3'te özgül nem değeri kısmi buhar basıncı ve kısmi hava basıncı değerlerine bağlı elde edilmiştir.

$$\omega = \frac{m_b}{m_h} = \frac{P_b V / R_b T}{P_h V / R_h T} = \frac{P_b / R_b}{P_h / R_h} = 0.622 * \frac{P_b}{P_h} \quad (3.3)$$

Bağıl nem, havadaki nem miktarının aynı sıcaklıkta doymuş havadaki mutlak nemin yüzde kaçını içerdiğini gösterir ve ϕ sembolü ile gösterilmektedir. Bu durumda havadaki nem miktarı mutlak nem değerine ulaştığında doyma noktasına ulaşılır ve o sıcaklık ve basınçta daha fazla su buharını barındıramaz.

Kuru havada hiç su buharı bulunmadığı durumda özgül nem değeri 0 olmaktadır. Hava doyma basıncına ulaştığında ise su buharı basıncı ve hava basıncı eşitlenir ve bu durumda özgül nem değeri 1 olmaktadır. Özgül nem değeri ve bağıl nem değeri arasındaki ilişki denklem 3.4 ile ifade edilmektedir.

$$\phi = \frac{P_b}{P_g} = \frac{\omega \cdot P}{(0.622 + \omega) \cdot P_g} \rightarrow \omega = \frac{0.622 \cdot \phi \cdot P_g}{P - \phi \cdot P_g} \quad (3.4)$$

3.2 Bacalı Kurutucular

Bacalı tip kurutucular açık çevrim olarak çalışmaktadır. Bu tip kurutucularda tekstillerin kurutulduğu bir tambur, hava akışını sağlamak için bir fan, havayı ısıtmak için bir ısıtıcı, liflerin tutulması için bir filtre ve nemli havanın atılması için atmosfere açık bir baca bulunmaktadır. Bu sistemde atmosferden alınan kuru hava ısıtılmakta,

tekstillerin üzerinden nem alınıp, nemli hava atmosfere geri atılır ve bu döngü tekstiller kuruyana kadar sürdürülür.

Açık çevrim bacalı kurutucularda nem alma prosesinin modellenmesi için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Tambur içerisinde gerçekleşen tekstilin kuruma işlemi havanın tambura giriş sıcaklığı, hava nem oranına, tekstilin sıcaklığına, tekstilin zamana bağlı nem oranına göre incelenmektedir. Bu işlem için yapılan kabuller şu şekilde olmuştur [12]:

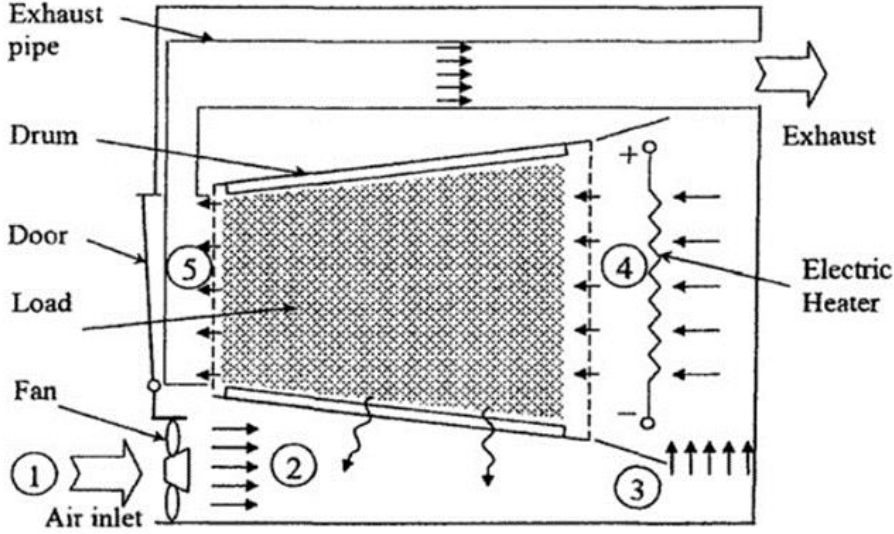
- Kullanılan tekstil malzemesinin termo-fiziksel özellikleri, kullanılan hacim boyunca aynıdır.
- Tekstil malzemesinin içerisindeki nem dağılımı homojendir.
- Kurutma akışkanının anlık nem değişimi eşittir.
- Tekstil malzemesinin sıcaklığı ve kurutma akışkanının yaş termometre sıcaklığı aynıdır.
- Tekstil malzemesinin içerisindeki sıcaklık dağılımı anlık olarak eşittir.
- Kurutma akışkanına tekstil malzemesinden nem geçişi belirlenen kontrol hacminde gerçekleşmektedir.
- Düşük nem değerindeki kurutma havası bir noktadan girer ve diğer noktadan çıkar
- Modelin uygulama amacı için kurutma akışkanının tüm termo-fiziksel özellikleri hava değerlerine göre alınmıştır.

Açık çevrim kurutucu modeli Şekil 3.2’de paylaşılmıştır. Kurutma çevrimi 4 ana bölümden oluşmaktadır.

Bu bölümler sırasıyla:

- 1-2 arasında fan boyunca
- 2-3 arasında hava kanalı boyunca
- 3-4 arasında ısıtıcı bölümü boyunca
- 4-5 arasında tambur içerisi boyunca

olarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.2 : Açık çevrim kurutucu modeli [12]

Kurutma işlemi boyunca anlık olarak tekstil üzerinden buharlaşan su miktarı denklem 3.4 ile hesaplanmıştır[12].

$$\dot{m}_b = kA \frac{\rho_v}{0.622} \left[\alpha \omega_m - \frac{\omega_{giriş} - \omega_{çıkış}}{2} \right] \quad (3.4)$$

ρ_v = kumaş yüzeyinde su yoğunluğu [kg/m^3]

ω_m = havanın kumaş yüzeyi boyunca ortalama özgül nemi [kg_{sb}/kg_{kh}]

$\omega_{giriş}$ = havanın tambur girişi özgül nemi [kg_{sb}/kg_{kh}]

$\omega_{çıkış}$ = havanın tambur çıkışı özgül nemi [kg_{sb}/kg_{kh}]

α = aktivite katsayısı

A = tekstilin etkin yüzey alanı [m^2]

k = kütle transfer katsayısı [m/s]

Denklem 3.4, buharlaştırıcılarda nemli havadan yoğuşan su miktarını hesaplamak için oluşturulmuştur. Bu denklemin elde edilmesi için buharlaştırıcıdaki soğutkan ve hava tarafı birlikte incelenmiştir. Hava tarafında 2 adet bölge vardır. Birincisi sadece ısı transferinin gerçekleştiği kuru bölge, diğeri ise hem ısı ve hem de kütle transferinin eş zamanlı gerçekleştiği ıslak bölgedir. Bu iki bölgenin sınırı, hava su buharı karışımının çığ noktası tarafından belirlenmektedir. Buharlaştırıcıdaki soğutkan ve hava için ısı

geçiş denge denklemi denklem 3.5'te gösterilmiştir. Islak bölge kütle transfer denkleminde denklem 3.6'da gösterilmiştir.

$$U_{ow}(T_s - T_r)\Delta A_0 = h_c(T_a - T_s)\Delta A_0 + \dot{m}_h h_{fg}\Delta\omega \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_h\Delta\omega = k(\omega - \omega_m)\Delta A_0 \quad (3.6)$$

$$\dot{m}_h(\omega_{giris} - \omega_{cikis}) = \left(\frac{\omega_{giris} + \omega_{cikis}}{2} - \omega_m\right)\left(\frac{h_c}{C_{pa} + \omega_{giris}C_{ps}}\right) \quad (3.7)$$

Denklem 3.6 denklem 3.5'te yerine yazıldığında buharlaştırıcıda yoğuşturulan su miktarının bulunduğu denklem 3.7 elde edilmiştir. Denklem 3.7'de gerekli düzenlemeler yapıp denklem 3.4 formuna getirilip tambur içerisinde tekstil üzerinden suyun buharlaştırılması için kullanılmıştır [14,15,16].

Denklem 3.4'ün tekstilden nem alma işleminde kullanılabilmesinin sebebi aktivite katsayısıdır. Bu katsayı literatürde pamuk tekstili için hesaplanmıştır ve denklem 3.8 ile hesaplanmaktadır. Aktivite sabiti kurutulacak ortamın nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Aktivite sabiti ayrıca işlemin sıcaklığına ve yönüne bağlıdır ve yaklaşık eğrilerin çizdirilmesi ile elde edilen kümelenme seviyesi tahmin edilip hesaplanmıştır [13].

$$\alpha = 1 - \frac{\beta X + \delta}{1 + \delta^{\gamma X}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de tekstilin nem oranına bağlı olarak pamuk için bulunan aktivite katsayısının değerleri:

X = Pamuk nem oranı [$kg_{su}/kg_{tekstil}$]

$\beta=18$

$\gamma= 100$

$\delta=2$

olarak belirlenmiştir.

Denklem 3.4'te zamana bağlı nem alma miktarı hesaplanırken tekstil nem değerine bağlı değişen aktivite katsayısı da denklem 3.8 ile dahil edilmiştir.

k kütle transfer katsayısının hesabı denklem 3.9 ile gösterilmiştir. h_c değeri ısı geçişi katsayısı [$W/m^2 K$], C_{pa} değeri tekstil filmindeki havanın özgül ısı değeri [$J/kg K$] ve C_L değeri de bir boyutsuz sayı olan Lewis sayısı olarak tanımlanmıştır. Lewis sayısı ısı yayılımının kütle yayılımına oranı olarak tanımlanmaktadır ve ısı ve kütle transferinin birlikte olduğu bu gibi durumlarda kullanılmaktadır.

$$k = \frac{h_c}{C_L C_{pa}} [m/s] \quad (3.9)$$

Tekstilden suyun buharlaştırılması için yapılan kabuller ile bacalı tip tamburlu kurutma makinelerinde tekstil kurutma süreci hesaplanabilmektedir. Tez kapsamında sabit sürede ve sabit ısıtma gücünde deneyler gerçekleştirildiği için tambur içerisinde gerçekleşen kurutma işlemi benzer bir yaklaşımla hesaplanmıştır.

3.3 Isı Pompalı Kurutucular

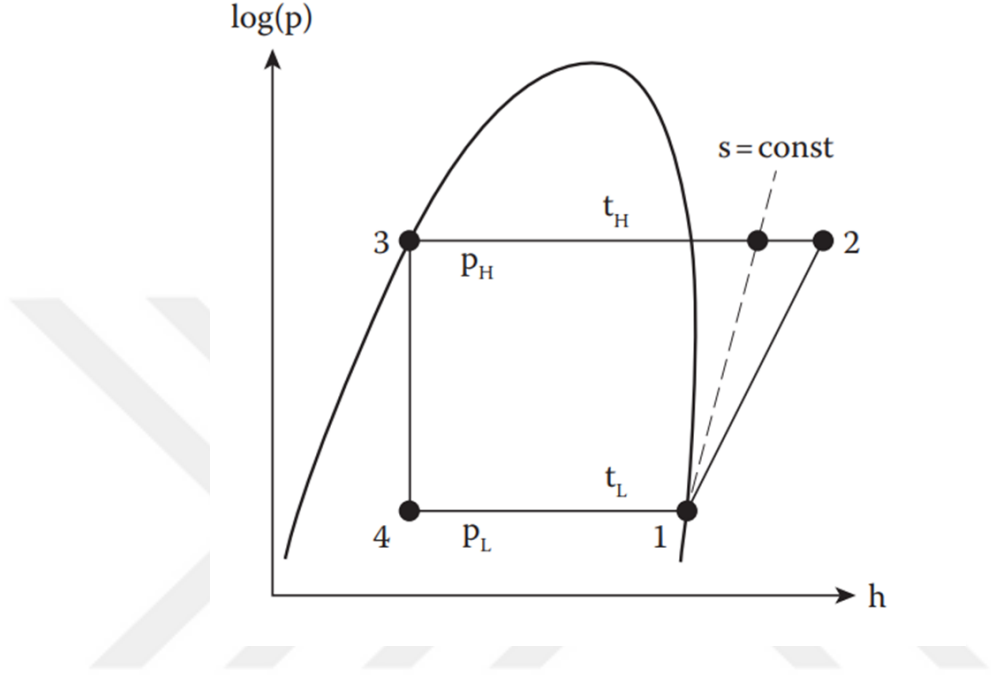
Isı pompalı kurutucular, bacalı kurutucularda kaybolan kurutma egzoz buharından ısıyı geri kazanma prensibine göre tasarlanmıştır. İdeal durumda tasarlanmış bir ısı pompalı kurutucu kapalı bir döngüye sahiptir ve kurutma işleminde gereken hem ısıtma hem de soğutma için gerekli enerjiyi tamamen geri kazanır. Isı pompalı kurutucular soğutkan çevrimi ve hava çevrimi olmak üzere 2 kapalı çevrimden oluşmaktadır.

Soğutkan çevrimi Şekil 3.3'te gösterildiği üzere 4 farklı bölümden oluşmaktadır.

- İzantropik olmayan sıkıştırma (1-2): Bu bölümde doymuş buhar, buharlaşma basıncından yoğuşma basıncına ve sıcaklığına sıkıştırılır ve kızgın buhar haline gelir.
- İzobarik yoğuşma (2-3): Bu bölümde kızgın buhar, yoğuşturucunun ilk bölümünde doymuş buhar haline gelir. Daha sonra buhar, yoğuşturucunun son bölümünden geçerken doymuş sıvıya dönüştürür ve alıcıda toplanır.
- Adyabatik genişleme (3-4): Burada, yüksek basınçta doymuş veya aşırı soğutulmuş sıvı, genişleme valfine girer ve adyabatik olarak daha düşük basınçta kadar kısılır. Valf çıkışında buhar-sıvı karışımı haline gelir ve buharlaştırıcıya akar.

- İzobarik buharlaşma (4-1): Soğutucu akışkan karışımı buharlaştırıcıdan akar, nemli havadan ısıyı alır ve buharlaştırıcı çıkışında fazı doymuş buhara dönüşür. Bu doymuş buhar, kompresöre girer [17].

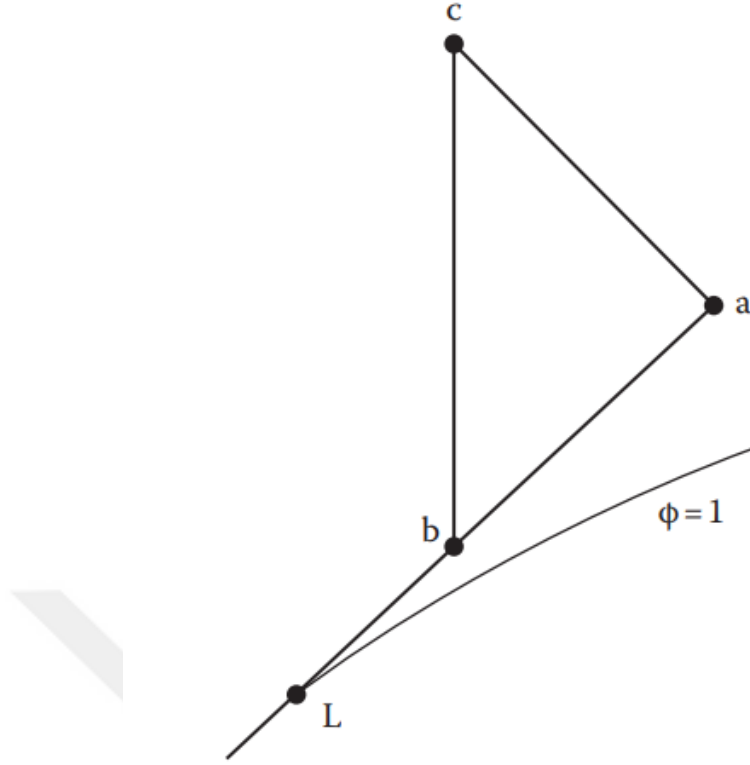
Bu şekilde soğutkan kapalı çevrimi tamamlamış olur ve kurutma boyunca bu döngü sürdürülür.



Şekil 3.3 : Logaritmik basınç-entalpi diyagramında basitleştirilmiş ısı pompası döngüsü [17]

Kapalı ısı pompası kurutma hava döngüsü, Şekil 3.4'teki Mollier diyagramında gösterildiği gibi üç işlemde oluşur:

- c – a: Ayarlanan sıcaklıktaki kurutma havasının tamburdan aktığı ve ıslak tekstil üzerindeki nemi uzaklaştırdığı adyabatik kurutma işlemi.
- Nemli hava buharlaştırıcı üzerinden akarken, buhar yoğunlaşır ve kurutma döngüsünden boşaltılır. Bu adımı gerçekleştirmek için, buharlaştırıcı yüzeyi, giriş kurutma bölgesindeki (c noktası) havanın çiy noktası sıcaklığının altında bir sıcaklıkta olan L durum noktasında tutulur.
- b – c: Nemli havanın yoğunlaştırıcı tarafından ısıtılması. Buharlaştırıcıda emilen düşük sıcaklıktaki enerji, soğutkanın buharlaşmasını sağlar ve ardından yüksek basınca (yüksek sıcaklıktaki enerjiye) sıkıştırılır ve kurutucu havasını ısıtmak için yoğunlaştırıcı tarafından yeniden kullanılır. Bu, ısı pompalı kurutucudaki enerji geri kazanım döngüsünü tamamlar [17].



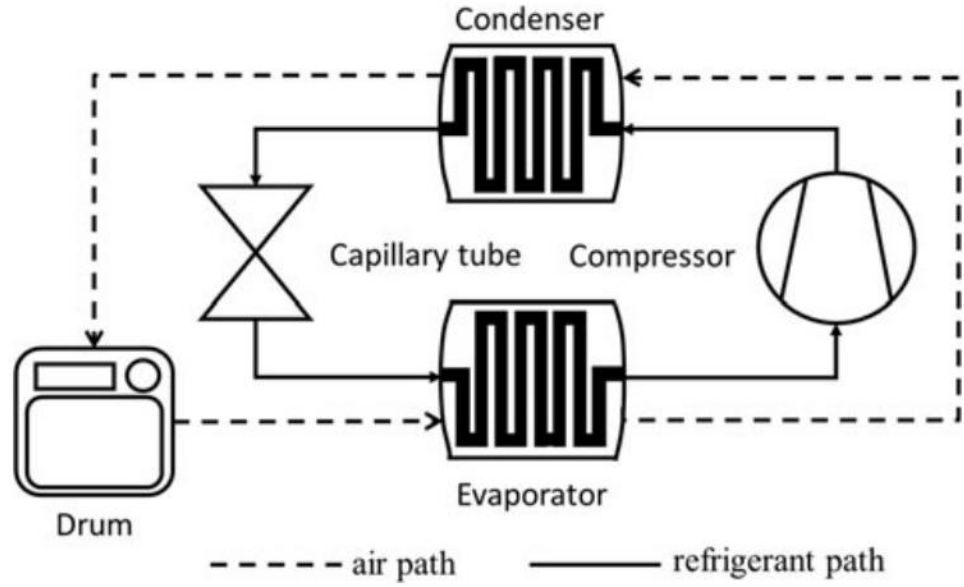
Şekil 3.4 : Kapalı ısı pompası kurutma hava döngüsü, Mollier diyagramı [17]

Isı pompalı kurutucularda performans hesaplamaları yapılırken yukarıda açıklanan kapalı soğutkan ve hava çevrimi birlikte ele alınmaktadır (Şekil 3.5). Birbirlerine bağlı ve sırayla çalışan bu döngüler ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bir sistemin hesaplanan çıkış değeri bir sonraki sistemin giriş parametresi olarak belirlenmektedir. Bu sayede hem soğutkan tarafı, hem de hava tarafı için zamana bağlı kurutma modeli oluşturulmaktadır.

Isı pompalı sistemler buharlaştırıcı, yoğuşturucu, kılcal, tambur ve kompresör olmak üzere 5 ana modülden oluşmaktadır. Sistem zamana bağlı bir sistemdir ve zaman içerisinde sıcaklık, basınç, SEK, kurutma oranı, buharlaşma oranı, kütleli debi, SMER, bağıl nem vb. gibi özellikler değişmektedir.

Isı pompası modellemelerinde 2 temel kabul bulunmaktadır [18]:

- Buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda olan basınç kayıplarının ihmal edilmesi
- Isı pompasından çevreye ısı kaybının ihmal edilmesi



Şekil 3.5 : Kapalı soğutkan ve hava çevrimi, ısı pompası diyagramı [18]

3.3.1 Buharlaştırıcı

Buharlaştırıcıda gerçekleşen ısı transferi denklem 3.10 ile gösterilmiştir. Isı değişiricisindeki nem alma ısı transferi oranı denklem 3.11 ile gösterilmiştir [18].

$$Q_{eva} = \dot{m}_h (h_{hg} - h_{hç}) \quad (3.10)$$

$$Q_{eva} = U_{ow} A_0 F \Delta h_{tm} \quad (3.11)$$

Denklemlerde bulunan ifadeler:

\dot{m}_h : Hava kütleli debi [kg/s]

h_{hg} : Giriş entalpi değeri [J/kg]

$h_{hç}$: Çıkış entalpi değeri [J/kg]

U_{ow} : Islak yüzeyin ortalama ısı transfer katsayısı [W/m^2K]

F : Düzeltme faktörü

A_0 : Hava tarafında toplam yüzey alanı [m^2]

Δh_{tm} : Logaritmik ortalama entalpi değişimi [J/kg]

olarak belirtilmiştir.

3.3.2 Yoğuşturucu

Yoğuşturucu üzerindeki ısı transferi oranı denklem 3.12 ile gösterilmiştir. Isı değiştiricisindeki nem alma ısı transferi değeri denklem 3.13'te gösterilmiştir. Denklem 3.13'te belirtilen logaritmik ortalama sıcaklık değişim değeri denklem 3.14 ile hesaplanmaktadır [18].

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_h C_{pa} \Delta T \quad (3.12)$$

$$\dot{Q}_{cond} = U A F \Delta T_{lm} \quad (3.13)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,o} - T_{c,i})}} \quad (3.14)$$

C_{pa} : Sabit basınçta özgül ısı değeri [J/kgK]

ΔT : Tambur giriş ve çıkış sıcaklık farkı [K]

ΔT_{lm} : Logaritmik ortalama sıcaklık değişimi [K]

U : Sıcaklık tabanlı ortalama ısı transfer katsayısı [W/m^2K]

A : Isı değiştirici yüzey alanı [m^2]

3.3.3 Kılcallık

Kılcal boru, soğutkanın yoğuşturucu basıncından buharlaştırıcı basıncına düşmesinde kullanılmaktadır. Bu boru içerisindeki akış iki fazlıdır. İki fazlı akış için viskozite hesabı denklem 3.15'te gösterilmiştir. x , kuruluk derecesidir ve alt simgeler ise t_p , l ve g , sırasıyla iki fazlı, doymuş sıvı ve doymuş buhar bölgelerini belirtir.

İki fazlı akış bölgesinde basınç değişimi, duvar sürtünmesi ve akış ivmelenmesi durumlarını içermektedir ve denklem 3.16 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{\mu_{tp}} = \frac{1-x}{\mu_l} - \frac{x}{\mu_g} \quad (3.15)$$

$$\frac{dp}{dz} = -G^2 \left(f_{tp} \frac{v}{2d_{cap}} + \frac{dv}{dz} \right) \quad (3.16)$$

μ : Dinamik viskozite [$Pa \cdot s$]

p : kılcal boru içerisinde bölgesel basınç değeri [Pa]

G : Kütle akısı [$kg/m^2 - s$]

v : Özgül hacim [m^3/kg]

d_{cap} : kılcal boru çapı [m]

f_{tp} : İki fazlı durumda sürtünme katsayısı

3.3.4 Tambur

Kurutma boyunca tekstiller tambur ile dönmektedir. Sıcaklığın, suyunve özgül ısının tambur içerisinde üniform bir şekilde dağıldığı kabul edilmektedir. Hava nem oranındaki değişim hava ve tekstil arasındaki kütle transferinden belirlenebilir. Bu eşitlik denklem 3.17 ile verilmiştir. Isı pompalı kurutucularda ve bacalı kurutucularda tambur içerisindeki nem alma işlemi benzer yaklaşımlarla oluşturulmuştur ve denklem 3.4 ile 3.17 arasındaki benzerlik görülmektedir.

$$\dot{m}_b [\omega_{giriş} - \omega_{çıkış}] = kA [\alpha \omega_{giriş} - \frac{\omega_{giriş} + \omega_{çıkış}}{2}] \quad (3.17)$$

3.3.5 Kompresör

Kompresörde süreklilik ve enerji denklemleri için aşağıdaki denklem 3.18 ve 3.19 kullanılabilir.

$$\dot{m}_{c,o} - \dot{m}_{c,i} = 0 \quad (3.18)$$

$$\dot{m}_{c,o} \dot{h}_{c,o} - \dot{m}_{c,i} \dot{h}_{c,i} = W_{comp} \quad (3.19)$$



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

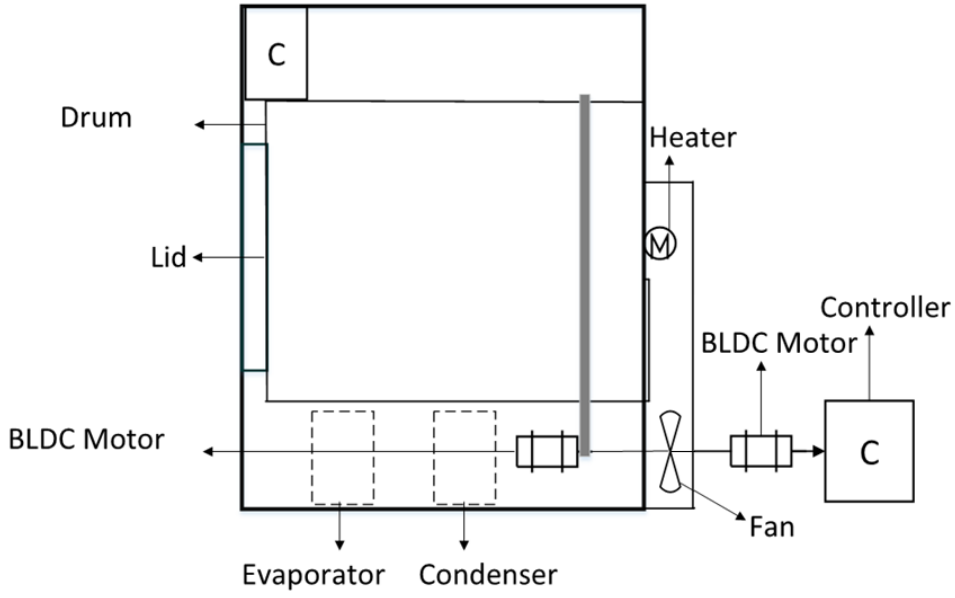
Tamburlu kurutma makinelerinde tekstil üzerinden nem alma prosesinin ve kurutmaya etki eden parametrelerin etkisinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezinde fan ve motor devirlerinin, ısıtıcı gücünün kontrol edildiği, nem alma prosesinin anlaşılması amacıyla gerekli noktalardan sıcaklık, nem ve debi datalarının toplanabildiği test düzeneği oluşturulmuştur. Söz konusu oluşturulan bu deneysel düzeneğe ile hibrit bir kurutucuda çeyrek yükte tambur devrinin, kurutma hava debisinin ve tekstil türünün, tekstil üzerinden nem alma karakteristiğine etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonrası bu parametrelere bağlı elde edilen sonuçlar ve yorumları paylaşılmıştır.

4.1 Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Oluşturulan deney düzeneği ile tekstillerin kurutma karakteristiğini belirlemek amaçlanmıştır. Fan ve motor devirlerinin, ısıtıcı gücünün kontrol edildiği, nem alma prosesinin anlaşılması amacıyla gerekli noktalardan sıcaklık, nem ve debi datalarının toplanabildiği test düzeneği oluşturulmuştur.

Deney düzeneğinde parametre olarak belirlenen tambur devrinin ve hava debisinin kontrolü amaçlı standart kurutucuların aksine iki adet motor kullanılmıştır. Standart kurutucularda bir motor ile hem tambur hem de fan sürülmektedir. Bu sebeple fan ve tambur aynı motor hızında dönmektedir. Bu tez çalışmasında hava debisinin ve tambur devrinin etkilerinin ayrı ayrı incelenmesi amacıyla Şekil 4.1’de gösterildiği şekilde fanın ve tamburun farklı olarak kontrol edildiği deney düzeneği oluşturulmuştur.

Şekil 4.1’de gösterilen hibrit kurutucuda 2 farklı kapalı çevrim bulunmaktadır. Bu çevrimlerden birincisi soğutkan çevrimi diğeri ise hava çevrimidir. Sistemin başlaması ile birlikte motorlar tamburu ve fanı döndürmeye başlar ve hava çevrimi başlamış olur. Kompresörün devreye girmesiyle de ısı pompası sistemi yani soğutkan çevrimi başlamış olur.



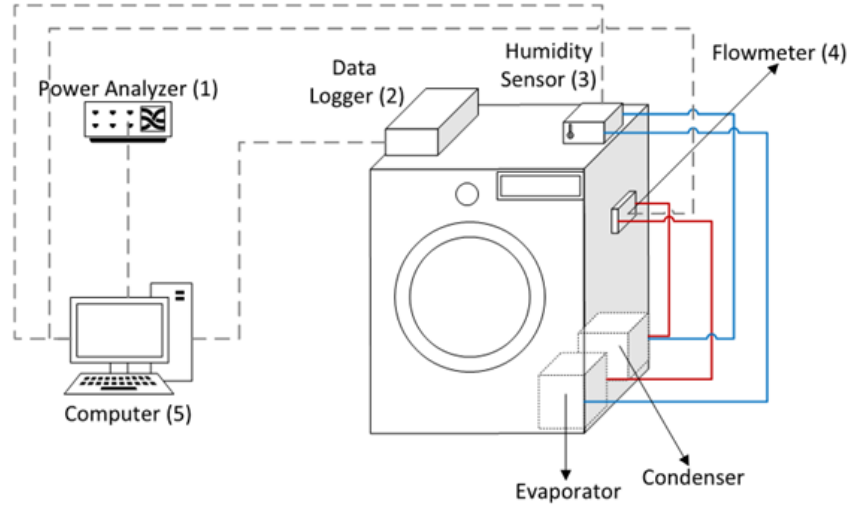
Şekil 4.1 : Deneysel mekanizması

Kurutma performansını artırmak için tambur giriş havası öncelikle yoğuşturucuda ısıtılır ve sonrasında tambura girmeden önce bir ısıtıcıdan daha geçerek tekrar sıcaklığı artırılır. Isıtıcı eklenmiş bu ısıtıcı pompalara hibrit kurutucu ifadesi bu sebeple verilmiştir.

Tekstil üzerinden nem alan hava hem bir miktar soğumuş hem nemlenmiştir. Tamburdan çıkan bu hava doğrudan buharlaştırıcıya giderek burada havadaki nem yoğuşturulmuş olur ve hava tekrardan ısıtılmak ve aynı süreçleri kurutma boyunca tekrarlamak için yoğuşturucuya yönlendirilir.

Şekil 4.2’de deneyler boyunca toplanan dataların şeması gösterilmiştir. Tambur içerisinde tekstil üzerinden nem alma prosesinin incelenmesi için hava ve soğutkan taraflarında sıcaklık, nem ve debi datalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Gerçekleştirilen deneylerde hibrit makine olarak Beko DPHR8PB561W hibrit kurutma makinesi kullanılmıştır. Bu kurutma makinesinde Şekil 4.1’de gösterildiği üzere fan ve tambur motorları ayrıştırılmıştır.



Şekil 4.2 : Denei düzeneği data toplama diyagramı

Deneilerde kullanılan çeyrek yük pamuk ve polyester tekstiller EN 61121 Avrupa kurutucu standartına [1] uygun hazırlanmıştır. Şekil 4.3'te gösterildiği üzere %100 pamuk 2 kg (çeyrek yük) için dağılım 4 adet yastık kılıfı ve 9 adet havlu şeklindedir. Şekil 4.4'te gösterildiği üzere %100 polyester 2 kg çeyrek yük için dağılım 6 adet yastık kılıfı ve 5 adet gömlek şeklindedir.

Required test load mass kg ^a	Number of sheets	Number of pillowcases	Number of towels ^b
1	0	2	5
1,5	0	3	7
2	0	4	9
2,5	0	5	12
3	2	4	5
3,5	2	4	10
4	2	4	14
4,5	2	6	15
5	2	6	19

Şekil 4.3 : % 100 Pamuk yük oranları[1]

Required test load mass kg	Number of shirts	Number of pillowcases
1	3	3
1,5	4	4
2	5	6
2,5	7	6
3	8	8
3,5	9	9
4	11	11
4,5	12	12
5	14	13

Şekil 4.4 : % 100 Polyester yük oranları [1]

2 kg çeyrek yük tekstiller hazırlandıktan sonra test öncesi çamaşır makinesine atılırlar ve standart günlük 30°C programında yıkanılırlar. Daha sonrasında kuru ağırlığı bilinen tekstiller ıslak olarak tartılır ve nem değerinin %60 olması sağlanır. Bu şekilde tekstiller teste hazır hale getirilir.

Bu tez kapsamında kullanılan deney düzeneği ve ölçme cihazları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Deney sürelerinin ve tüketilen enerjinin kayıt altına alınması için veri toplama sistemi kullanılmıştır. Tüm deneylerde sabit parametre olarak belirlenen toplam güç takibi veri toplama sistemi üzerinden kontrol edilmiştir. Bu kapsamda sisteme voltaj regülatörü kullanılarak sabit 400W gücünde ısıtıcı ile ısı sağlanmıştır. Buna ek olarak tüm testlerde kompresör soğutma fanı kompresör kafa sıcaklığı 80°C'ye geldiğinde açılmıştır ve tüm testler 45 dakika yapılmıştır. Bu sayede testlerde kurutma sonu nemindeki değişikliklerin yani nem alma hızının sadece tekstil tipi, tambur hızı ve hava debisi parametrelerine bağlı değişmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.5 : Veri toplama sistemi(1), data logger(2), nem ölçme cihazı(3), debi ölçme cihazı(4)

Sıcaklık datalarının toplanması için data logger sistemi kullanılmıştır. Hem buharlaştırıcı ve yoğuşturucu üzerinden hem de hava geçiş noktalarından sıcaklık dataları alınmıştır. Sıcaklığı ölçmek ve veri toplamak için T tipi termokupllar ve KEYSIGHT 34970A veri kaydedici kullanılmıştır. Kurutucu üzerinde 14 farklı noktadan (Çizelge 4.1) sıcaklık değerleri alınmıştır. Bunlardan 10 adedi kompresör, buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda ki soğutucu akışkan sıcaklık değerlerini, 4 adedi ise tambur giriş ve çıkışındaki, buharlaştırıcı girişindeki ve yoğuşturucu çıkışındaki hava sıcaklık değerlerini ölçecek şekilde yerleştirilmiştir.

Çizelge 4.1 : Termokupl bölgeleri

Hava Tarafı	Soğutkan Tarafı
111 Buharlaştırıcı giriş	101 Eva Giriş
	102 Eva 4p
112 Eva – Kon hava sıcaklığı	104 Eva 8p
	104 Eva 11p
113 Yoğuşturucu çıkış	105 Eva 14p
114 Isıtıcıdan sonra	106 Eva Çıkış
	107 Kon Giriş
	108 Kond Orta
	109 Kond Çıkış
	110 Kompresör Kafa

Isı ve kütle geçişi hesaplarında kullanılacak özgül nemi hesaplamak için bağıl nem değerlerine ihtiyaç vardır. Bu deneysel kurulumda yoğuşturucu çıkışı ve buharlaştırıcı girişindeki iki noktadan veri almak için bağıl nem sensörü kullanılmıştır. Sensörden veri toplamak için ARDUINO NANO ve COOLTERM arayüzü kullanılmıştır. Bağıl nem, 1atm alınan basınç ve buralardaki sıcaklık değerleri ile hesaplanan özgül nem değerleri Excel eklentisi olan PSYCHROM ile hesaplanmıştır.

Hibrit kurutucuda gerçekleştirilen debi ölçümleri bir adet Şekil 4.6'da gösterilen Arduino Nano ve debi sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Sistem, yoğuşturucu çıkışından ve buharlaştırıcı ile yoğuşturucu arasından çıkan iki standart borunun debi sensörüne bağlanması ve burada okunan basınç farkı değerlerinin arduino tarafından okunup Agilent VEE Pro ara yüzünde hem basınç farkı hem de debi değerinin görüntülenmesi şeklinde çalışmaktadır.



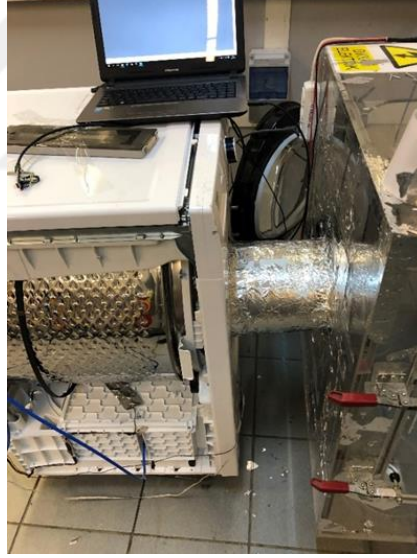
Şekil 4.6 : Debi ölçme cihazı

Deneylerin yapılacağı Hibrit kurutucuda kullanılan Sensirion marka debi sensörü Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Sensörün iki çıkışı vardır. Bu çıkışlardan bir tanesi yoğuşturucu çıkışına diğeri ise buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasına bağlanmıştır. Sensör bu iki nokta arasındaki basınç farkını ölçmektedir.



Şekil 4.7 : Debi sensörü

Debi ölçümlerinin doğru gerçekleştirilmesi için debi sensörünün kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bunun için hibrit kurutucu Şekil 4.8’de gösterilen rüzgâr tüneline sokulup fan çalıştırıldı ve debisi ölçüldü. Daha sonra da sensörün ölçtüğü değer kalibre edildi.

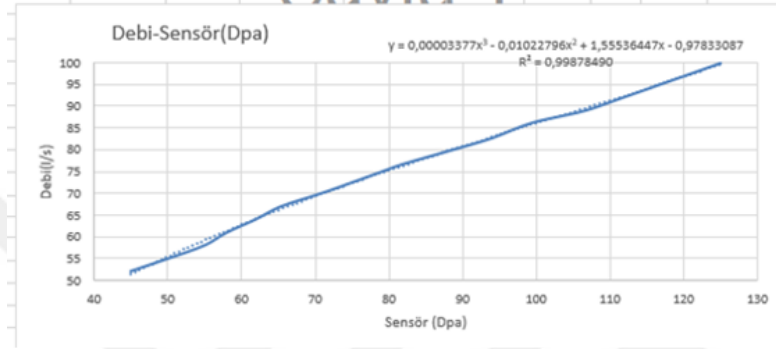


Şekil 4.8 : Rüzgar tüneli test düzeneği

Standartlara göre yapılan bu deney sonucunda ölçülen basınç farkları ile debiler belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar ile debi ve basınç farkı grafiği çizilmiştir.

Rüzgâr tüneline elde edilen Şekil 4.9’da gösterilen grafikteki denklem ile debi sensörünün kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için Agilent VEE Pro arayüzü kullanılmıştır.

Devir (Rpm)	Debi (l/s)	Sensör (Dpa)	Debi Hesaplanan (l/s)
2000	52,24	45	51,38
2100	55,08	50	55,44
2200	58,13	55	59,25
2300	61,07	58	61,41
2400	64,15	62	64,19
2500	67,15	65,5	66,51
2600	70,45	71,5	70,29
2700	74,99	79	74,71
2800	76,78	82	76,41
2900	81,38	91,5	81,58
3000	83	94,5	83,16
3100	86,22	99,5	85,79
3200	88,93	106,5	89,45
3300	92,12	112	92,37
3400	99,85	125	99,69



Şekil 4.9 : Rüzgar tüneli test sonuç grafiği

4.2 Deneş Sonuçları

Tez kapsamında tamburlu kurutma makinelerinde tekstil üzerinden nem alma parametrelerinin incelenmesi amacıyla bölüm 4.1’de açıklanan deney düzeneği oluşturulmuştur. Gerçekleştiren literatür araştırması sonrası tekstilden nem alma prosesi 3 farklı parametre üzerinden incelenmiştir. Bu parametreler tekstil tipi, tambur devri ve hava debisi olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.2).

Tüm deneylerde, 2 kg çeyrek yük kullanılmıştır, ısı pompası sisteminde kompresör sabit devirde çalışmıştır, kompresör soğutma fanı kompresör sıcaklığı 80°ye geldiğinde devreye girmiştir, tambur girişinde bulunan ısıtıcı sabit 400W gücünde test boyunca devrede kalmıştır, test süreleri 45 dk. olarak belirlenmiştir.

Bu bilgiler ışığında test boyunca sıcaklık, bağıl nem, güç, debi dataları toplanarak, test sonrasında bu değerler nem alma hesaplamalarında ve deney sonuçlarının analizinde kullanılmıştır. Her deney sonrasında tekstiller tartılarak tekstil üzerinden ne kadar su buharlaştırıldığı kayıt altına alınmıştır.

Bölüm 4.1’de açıklanan tekstiller deneye hazır hale getirildikten sonra Çizelge 4.2’de belirlenen parametreler değiştirilerek 2 tekrarlı olacak şekilde 36 test gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2 : Deney test parametreleri

Tekstil Tipi	Tambur Devri (rpm)	Hava Debisi (rpm)
%100 Pamuk	42	2400
%100 Polyester	52	2800
	62	3200

Deneyle sonrasında nem alma hesaplaması için suyun buharlaştırıcıda ki yoğuşma miktarı hesaplanmıştır. Bu hesap için buharlaştırıcı girişindeki ve yoğuşturucu çıkışında ki özgül nem değerleri bu noktalardan saniyede bir toplanan bağıl nem ve sıcaklık değerleri kullanılarak denlem 3.4 kullanılarak psikrometrik diyagram üzerinden hesaplanmıştır. Buharlaştırıcıdan geçen hava debisi de anlık olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Bu bilgiler ile buharlaştırıcıda gerçekleşen su buharının yoğuşma işlemi denklemler 4.1 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_b = x\dot{m}_h[\omega_{giriş} - \omega_{çıkış}] \quad (4.1)$$

\dot{m}_b : Buharlaşma kütleli debisi [kg/s]

\dot{m}_h : Hava kütleli debi [kg/s]

$\omega_{giriş}$: Hava buharlaştırıcı girişi özgül nemi [kgsb/kgkh]

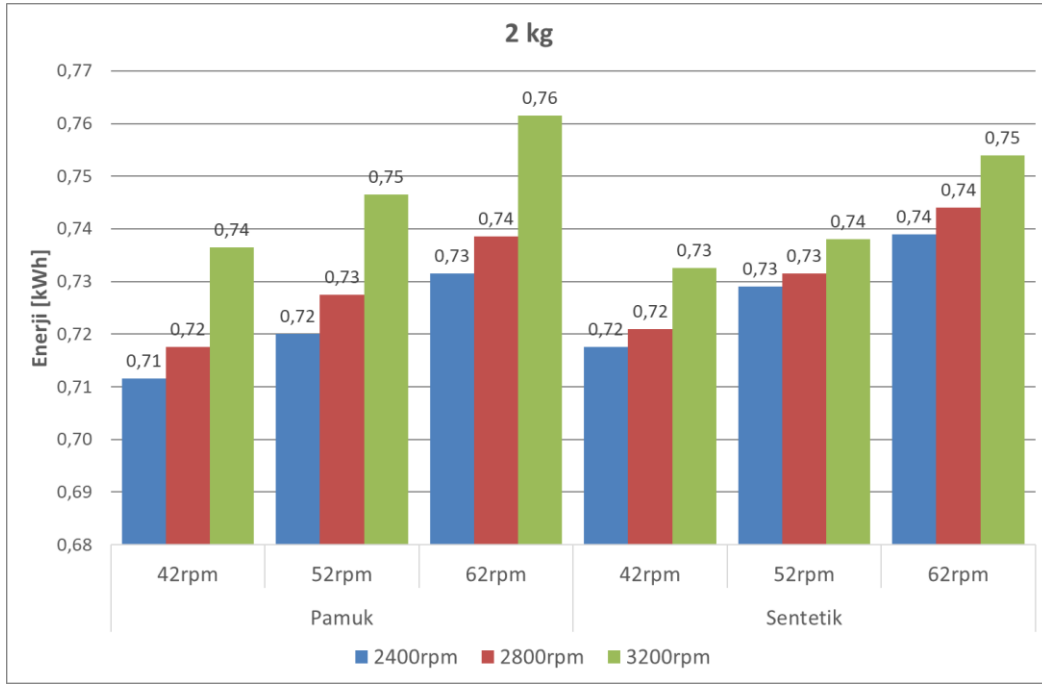
$\omega_{çıkış}$: Hava yoğuşturucu çıkışı özgül nemi [kgsb/kgkh]

Tekstil türünün, tambur devrinin ve hava debisinin kurutma performansına etkisinin anlaşılması için deneylerde tekstillere aynı miktarda ısı enerjisi uygulanması önem arz etmektedir. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere veri toplama sistemi ile kWh olarak alınan enerji değerlerinin Çizelge 4.2’de belirtilen tüm testlerde benzer değerlerde olduğu görülmektedir. Bu sayede belirlenen parametrelerin etkisi deney sonuçlarında görülmüştür.

Şekil 4.8’te 42, 52,62 rpm tambur devrini, 2400, 2800, 3200 fan motor devirlerini göstermektedir ve grafik pamuk, sentetik için olarak ikiye ayrılmıştır. Grafik

incelendiğinde sabit tambur devrinde fan devri arttıkça, sabit fan devrinde de tambur devri arttıkça enerji tüketim oranlarında çok az artışlar görülmektedir. Bu artışa sebep olarak ise motorların devirleri yükseldikçe çektikleri akımın artması yol açmaktadır. Bu sebeple sisteme verilen ısıl gücün sabit olduğu doğrulanmaktadır.

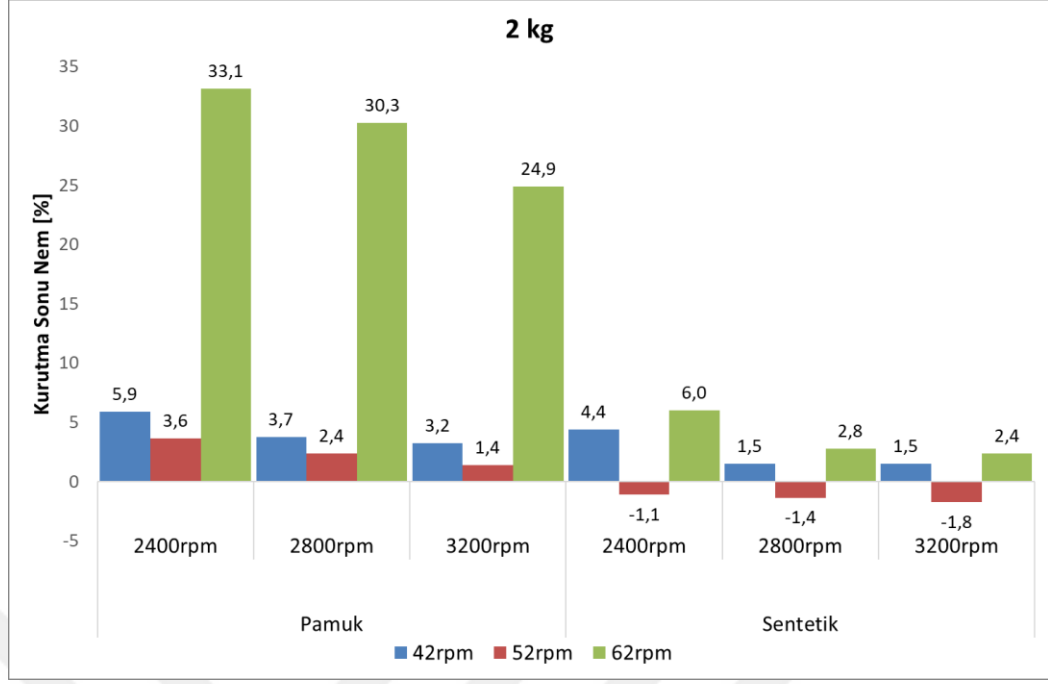
Pamuk ve sentetik tekstillerinde aynı tambur devri ve fan devirlerinde gerçekleştirilen testlerde benzer enerji tüketim değerleri elde edildiği Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10 : Deneilerin enerji tüketim değerleri [kWh]

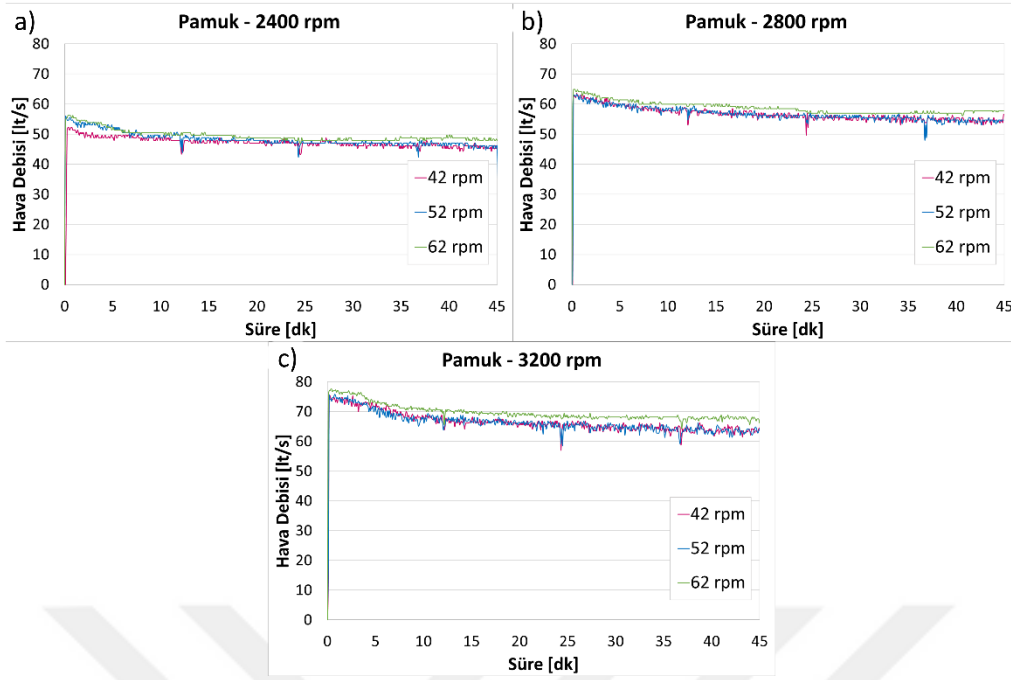
4.2.1 Tambur devrinin kurutma performansına etkisi

Tambur devrinin kurutma performansına etkisini incelemek için tekstil tipi ve motor fan devirleri sabit tutularak kurutma sonu nemleri incelenmiştir ve 2 tekrarlı deneylerin ortalama sonuçları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde tüm kurutma parametrelerinde en iyi kurutma sonu nem değerinin 52 rpm tambur devrinde elde edildiği görülmektedir. En kötü değer ise 62 rpm'de olduğu görülmektedir.

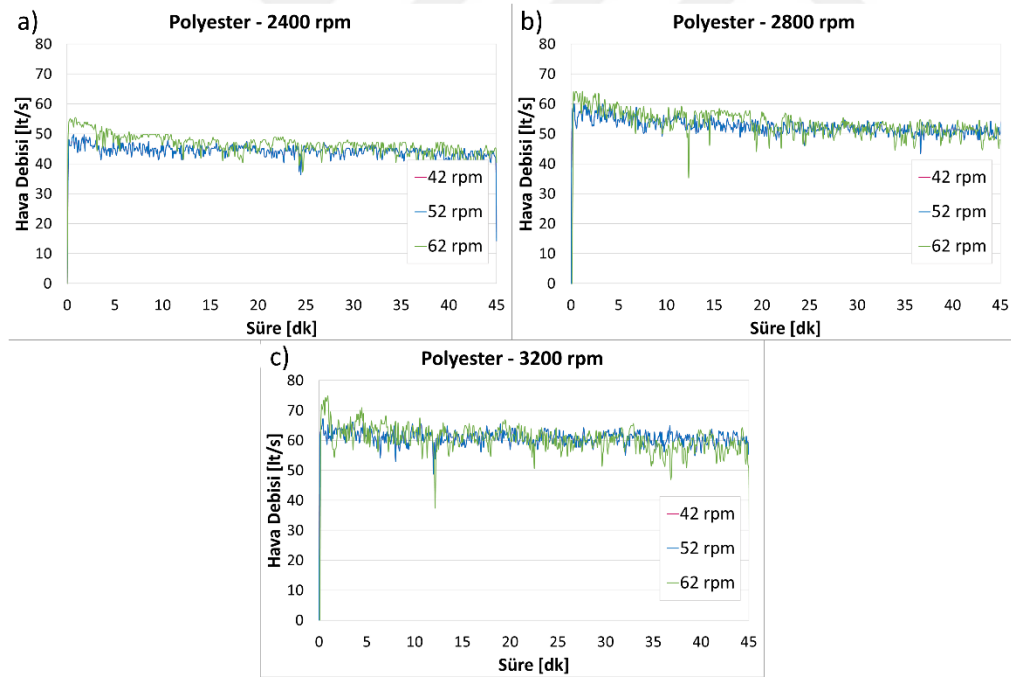


Şekil 4.11 : Tambur devrine bağlı kurutma sonu nem değerleri [%]

Tambur devrinin kurutma performansının tekil etkisinin belirlenebilmesi için öncelikle tambur devrinin hava debisine etkisi pamuk için Şekil 4.12’de, polyester için Şekil 4.13’de 2400, 2800, 3200 rpm fan motor devirleri için incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde her bir fan motor devrinde ve her iki tekstil tipinde tambur devri arttıkça kurutma süresince hava debisinde benzer eğriler oluşmaktadır. Tüm tambur devirlerinde ki ortalama hava değişimleri incelendiğinde ise tambur devri 42 rpm’den 62 rpm’e arttığında hava debisindeki değişimler %1 civarındadır. Sonuç olarak sabit fan motor devrinde tambur devri arttıkça hava debisinin nem alma hızına etkisi olmamaktadır kabulü yapılmaktadır.



Şekil 4.12 : Tambur devrine bağlı pamuk anlık hava debi değerleri [lt/s]







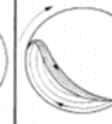
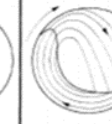
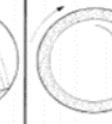
Şekil 4.13 : Tambur devrine bağlı polyester anlık hava debi değerleri [lt/s]

52 rpm'de en iyi sonucun elde edilmesinin sebebi tambur devrinin tekstilin tambur içerisinde taradığı alanı belirlemesidir. Temelde, katılar dönen silindir içerisinde kayma hareketi, yuvarlanma hareketi, ezme hareketi ve santrifüj hareketi

gerçekleştirmektedir [9].tambur devirlerine göre Froude sayısı (denklem 2.2) hesaplanmıştır ve Çizelge 4.3'te paylaşılmıştır. Testlerin gerçekleştirildiği tambur çapı 0.6 m'dir. Froude sayıları Şekil 4.14 [9] ile birlikte incelendiğinde 42 ve 52 rpm değerlerinde ezme hareketi 62 rpm değerinde santrifüj hareketi yaptığı tespit edilmiştir. Deney sürecinde tekstil hareketi takip edildiğinde 62 rpm'de tekstillerin çepere yapıştığı, 42 ve 52 rpm'de ise tekstillerin belirli bir noktadan düşerek ezme hareketi yaptığı tespit edilmiştir. Froude sayısı 52 rpm değerinde 0.91 olarak, 42 rpm değerinde ise 0.59 olarak hesaplanmıştır. 0.91 değeri 52 rpm'de tekstillerin daha yüksek bir noktadan düşme hareketi yaptığını göstermektedir. 42 rpm'de ise tekstiller yuvarlanma hareketine daha yakın bir noktadan düşme hareketi yapmaktadır.

Çizelge 4.3 : Deney test parametreleri

Tambur Devri (rpm)	Tambur Devri (rad/s)	Tambur Yarıçapı (m)	Fr Sayısı
42	4,4	0,3	0,59
52	5,45	0,3	0,91
62	6,49	0,3	1,29

Basic form	Slipping motion		Cascading ("tumbling") motion			Cataracting motion	
	Sliding	Surging	Slumping	Rolling	Cascading	Cataracting	Centrifuging
Schematic							
Physical process	Slipping		Mixing			Crushing	Centrifuging
Froude number Fr [-]	$0 < Fr < 10^{-4}$		$10^{-5} < Fr < 10^{-3}$	$10^{-4} < Fr < 10^{-2}$	$10^{-3} < Fr < 10^{-1}$	$0.1 < Fr < 1$	$Fr \geq 1$
Filling degree f [-]	$f < 0.1$	$f > 0.1$	$f < 0.1$	$f > 0.1$		$f > 0.2$	
Wall friction coeff. μ_w [-]	$\mu_w < \mu_{w,c}$	$\mu_w \geq \mu_{w,c}$	$\mu_w > \mu_{w,c}$			$\mu_w > \mu_{w,c}$	
Application	no use		Rotary kilns and reactors; rotary dryers and coolers; mixing drums			Ball mills	no use

Şekil 4.14 : Tamburlarda katıların enine hareket biçimleri [9]

Froude sayısı ile açıklanan tekstil hareketinin kurutma performansına etkileri incelendiğinde, tekstillerin ezme hareketi yaptırılarak kurutulması sonucunda en iyi kurutma performansı elde edildiği görülmüştür. Ezme hareketi yaptığı tespit edilen 42 ve 52 rpm karşılaştırıldığında ise 52 rpm'de daha yüksek bir noktadan düşme hareketine başlayan tekstiller daha hızlı bir şekilde kurutulmaktadır. Sebep olarak ise

daha yüksek noktadan düşme hareketine başlayan tekstiller tambur hacmi içerisinde açılmaya başlamaktalar ve kurutma havası ile tekstiller arasındaki temas yüzey alanı artmaktadır. Bu sayede tekstil yüzeyinde bulunan suyun buharlaşma oranı artmaktadır ve bu sebeple en hızlı kurutma 52 rpm’de elde edilmiştir. Ezme hareketi yapan tekstil daha iyi karışmaktadır ve bu sayede tambur girişinden gelen sıcak hava tekstilin daha fazla noktasına temas etmekte, bu sayede de ısı ve kütle transferi için gerekli yüzey alanının artması sağlanmış olmaktadır [7].

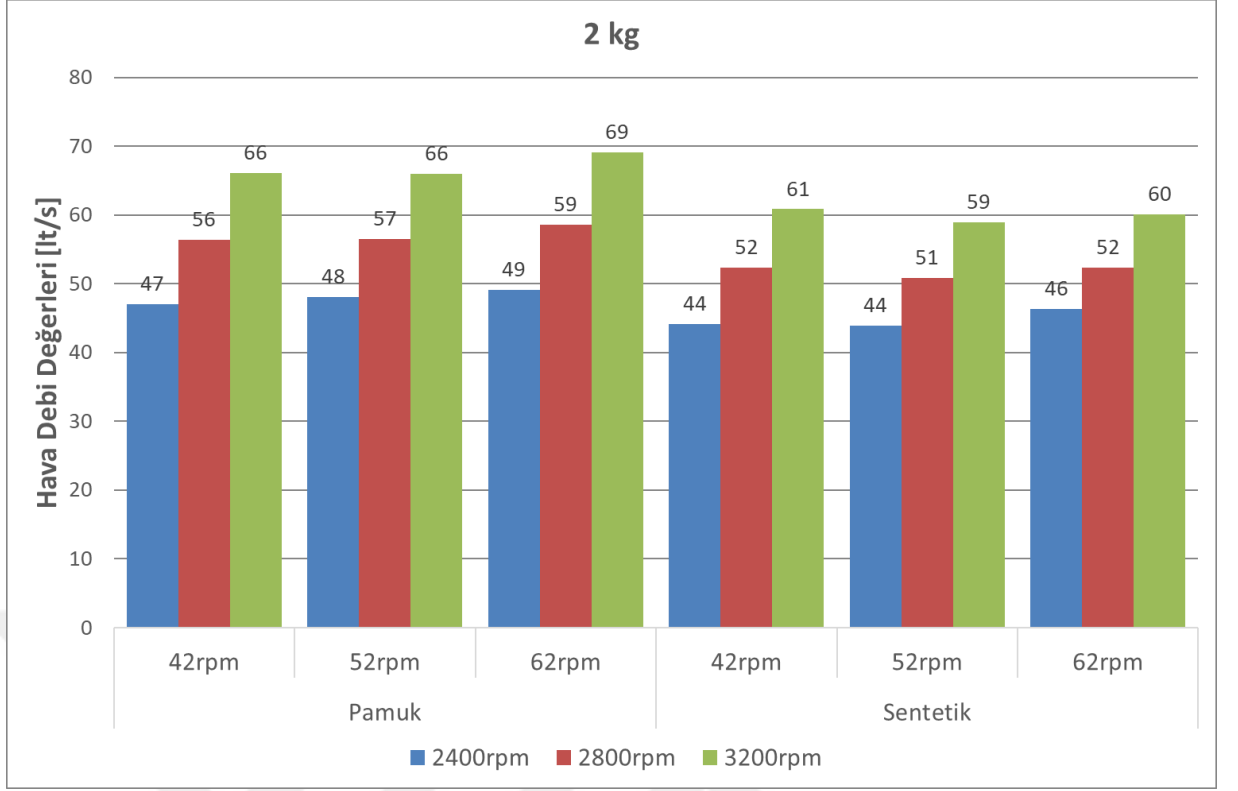
62 rpm’de santrifüj hareketi tekstillerin çepere yapışmasını sağlamaktadır. Çepere yapışan tekstiller tambur yüzeyi boyunca bir bütün olarak hareket etmektedirler. Bu durumda tekstiller açılmamakta ve kurutma havasının tekstil üzerine temas ettiği yüzey alanı azalmaktadır. Buharlaşma tekstil yüzeyinden gerçekleştiği için yüzeyden su buharlaştırıldıktan sonra tekstilin iç kısmında kalan ve kurutma havasına temas edemeyen yüzeylerinde bulunan suyun tekstil üzerinden difüzyon yoluyla hava ile temas eden yüzeye transferi gerçekleşmektedir. 62 rpm’de sabit süre ile gerçekleştirilen testlerde bu sebeple daha yüksek kurutma sonu nem değeri elde edilmiştir.

Sonuç olarak pamuk ve polyester için kurutma algoritmalarında optimum tambur devrinin 52 rpm olduğu belirlenmiştir. Pamuk ve polyester arasında farklı oranlarda oluşan kurutma sonu nem değerlerinin incelenmesi 4.2.3 bölümünde açıklanmıştır.

4.2.2 Hava debisinin kurutma performansına etkisi

Hava debisinin kurutma performansına etkisi, tekstil tipi ve tambur devirleri sabit tutularak 2 tekrarlı deneylerin ortalama sonuçları üzerinden incelenmiştir.

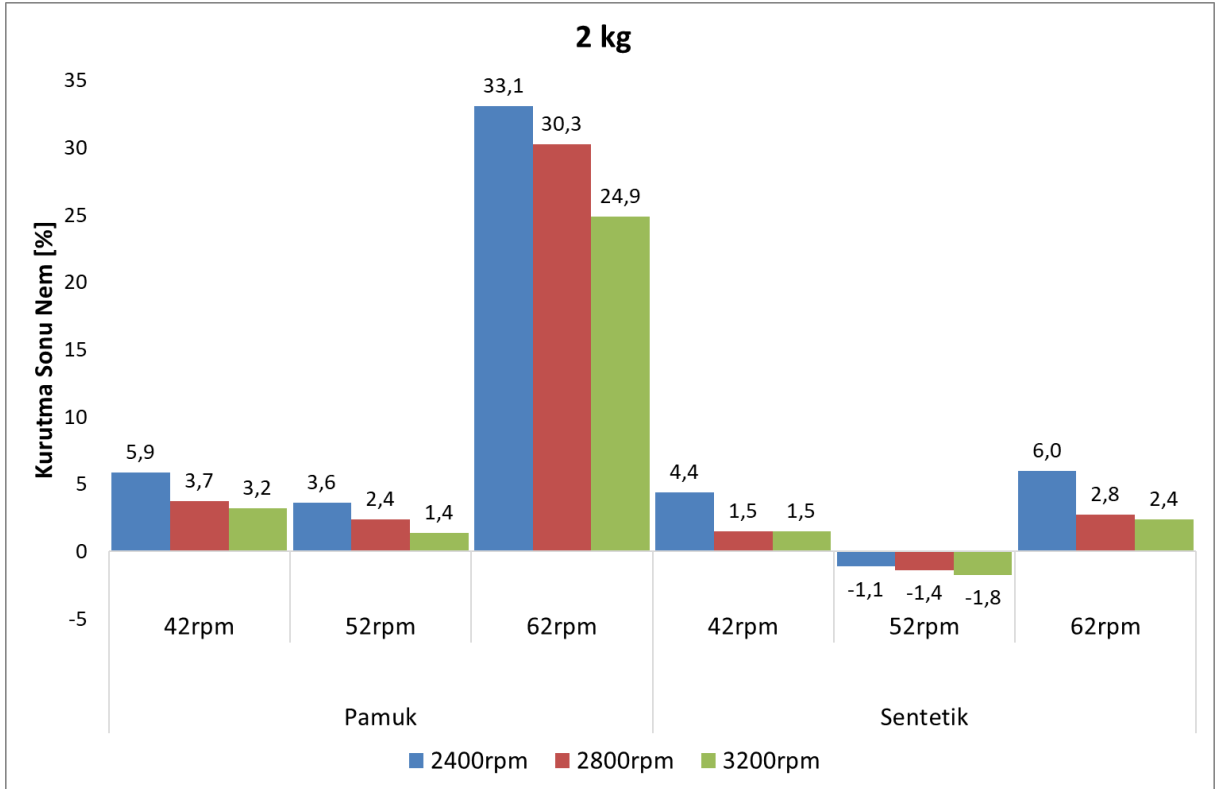
Öncelikle fan motor devri olarak belirlenen 2400, 2800 ve 3200 rpm motor devirleri sonucunda pamuk ve polyester için ortalama hava debileri incelenmiştir (Şekil 4.15). Deney sonuçları incelendiğinde her 400 rpm motor devri artışı ile sabit tambur devirlerinde pamuk için yaklaşık 9-10 lt/s, polyester için yaklaşık 7-9 lt/sn debi artışları olduğu kaydedilmiştir. Hava debisinde kaydedilen bu artışların kurutma performansına etkisi Şekil 4.15’te incelenmiştir.



Şekil 4.15 : Ortalama hava debi değerleri [lt/s]

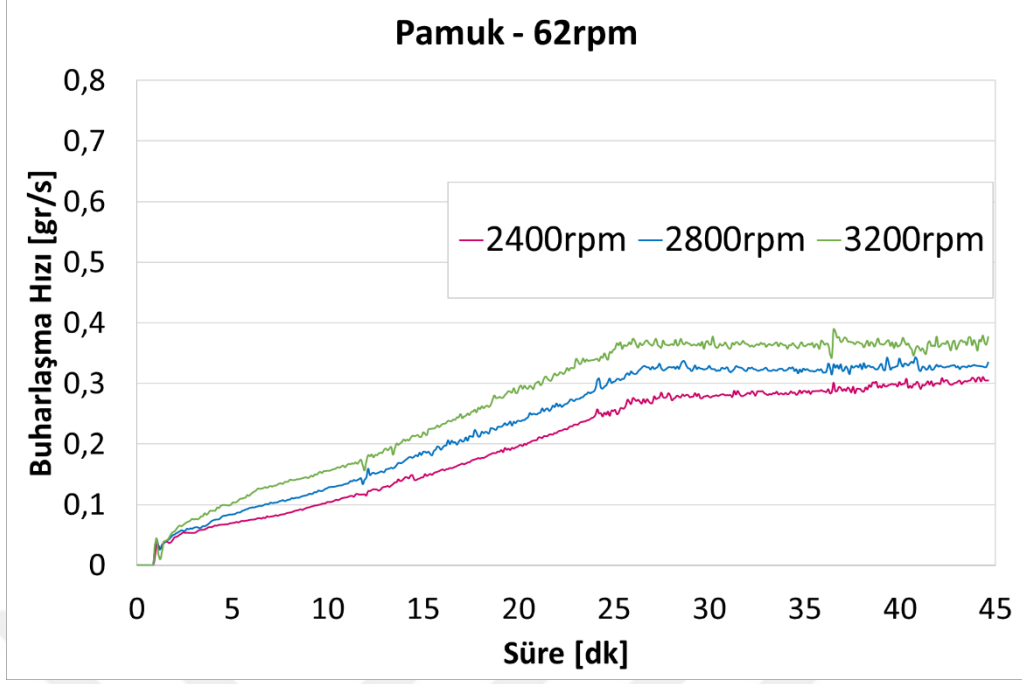
Hava debisine bağlı sonuçlar incelendiğinde hava debisi arttıkça kurutma sonu nem değerlerinde iyileşmeler gözükmemektedir. Hava debisinin artması ile birlikte ısı ve kütle geçiş katsayısı artmaktadır [8]. Etken olarak tekstil üzerinden geçen havanın hızının artması tekstilin buharlaşması için gerçekleşecek kütle transfer katsayısını artırmaktadır. Şekil 4.16 incelendiğinde hava debisinin kurutma sonu nem değerine etkisi 62 rpm’de daha net bir şekilde görülmektedir. 42 ve 52 rpm’de ise bu değerler yüzde olarak daha yakın olarak gözükmemektedir. Buharlaştırılan su miktarı olarak düşünüldüğünde %60 şartlandırılan 2 kg tekstilde 1200 gram su bulunmaktadır ve % 1’lik değişim 20 gram su buharı anlamına gelmektedir. Avrupa kurutucu standartına [1] göre tekstiller %8 nem değerine ulaştıklarında ütü kuruluğuna girmektedir. Bu aşamaya gelindiğinde tekstil üzerinde hala bir miktar su bulunmaktadır ve bu su molekülleri doğrudan tekstil ile kimyasal bağ oluşturacak şekilde emilmiştir, bir diğer bağ türü ise su moleküllerinin kılcal gözenekler tarafından tutulması şeklindedir. Serbest haldeki su moleküllerini buharlaştırmaya göre bu bağları koparıp buharlaştırmak çok daha zordur [10]. Islak temas alanının azalmasıyla birlikte kurutma süresinin uzatılması durumunda dahi kurutma sonu nemleri birbirine yakınsayacaktır. 45 dakika kurutma süresi boyunca 42

ve 52 rpm tambur devirlerinde ütü kuruluşunun altına inildiği için kurutma sonu nemleri yakınsamıştır.



Şekil 4.16 : Hava debisine bağlı kurutma sonu nem değerleri [%]

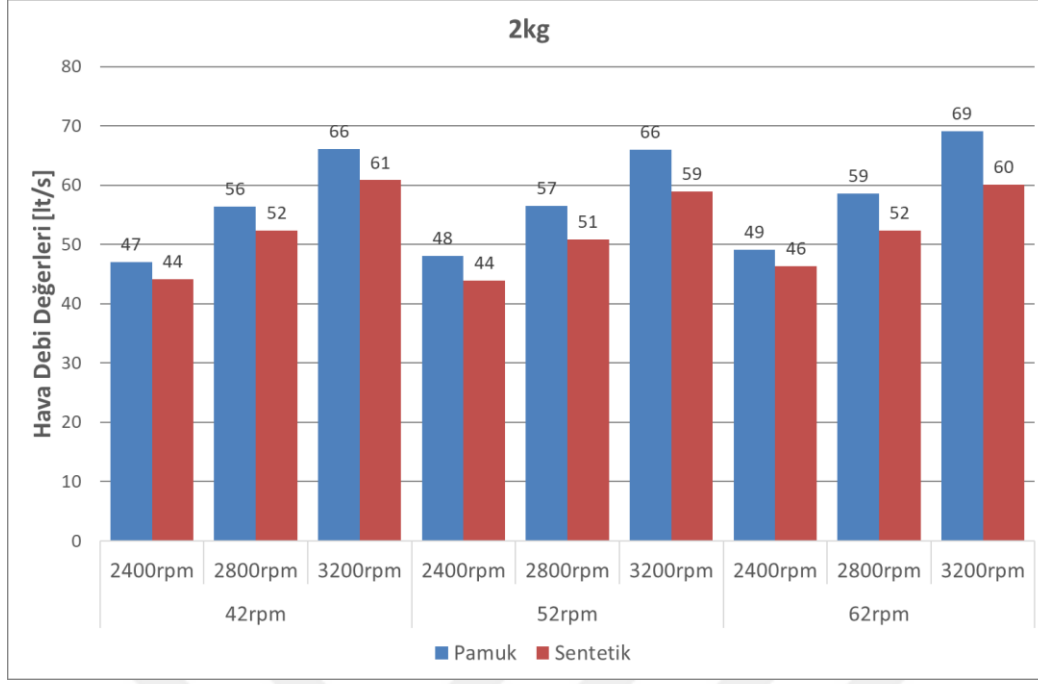
Hava debisinin nem alma hızına etkisi en iyi şekilde pamuk 62 rpm’de görülmüştür. Çünkü 45 dakika kurtuma sonunda buharlaştırılacak su hala tekstil yüzeyindedir. 62 rpm’de tekstiller çepere yapışıp oldukları için kurutma boyunca sabit bir katı gibi hareket etmektedirler ve bu sayede hava sürekli aynı geometri üzerinden geçerek su buharlaştırılmıştır. Bu sayede hava debisinin kurutma performansı üzerine etkisi daha doğru bir şekilde açıklanabilmektedir. Şekil 4.17’de 62 rpm’de denklem 4.1 ile hesaplanan zamana bağlı buharlaşma oranı gösterilmiştir. Şekil 4.16’da görüldüğü üzere 25 dakikadan sonra buharlaşma hızı sabit hale gelmektedir. Bu noktada tekstil üzerinde serbest halde olan su moleküllerinin azalmasıyla birlikte tekstil yüzeyinde ıslak temas alanı azalması ile birlikte sabit kurutma aşamasına girilmiştir [10].



Şekil 4.17 : Hava debisine bağlı buharlaşma hızı [gr/s]

4.2.3 Tekstil tipinin kurutma performansına etkisi

Tekstil tipinin kurutma performansına etkisi, hava debisi ve tambur devirleri sabit tutularak 2 tekrarlı deneylerin ortalama sonuçları üzerinden incelenmiştir. Öncelikle tambur devri ve fan motor devri sabit değerde çalışırken pamuk ve sentetikte hava debi değerleri incelenmiştir. Şekil 4.18 incelendiğinde aynı tambur devri ve fan motor devrinde ortalama debi değerlerinin pamuk tekstilinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Farklı debi değerlerinin oluşma sebebi, temelde teskillerinin yüzey alanları ile ilgilidir. Avrupa kurutucu satandartından [1] ve Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 gösterilen 2 kg pamuk ve sentetik yük dağılımının toplam alanı analiz edilmiştir. Yapılan çalışma sonrasında 2 kg pamuk yükte toplam $5.2 m^2$, 2 kg sentetik yükte toplam $6.8 m^2$ yüzey alanı olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak sabit hacimli tamburda sentetik yükünün yüzey alanının daha fazla olmasından dolayı hava debi değerleri aynı yükteki pamuğa göre daha düşük olmaktadır.

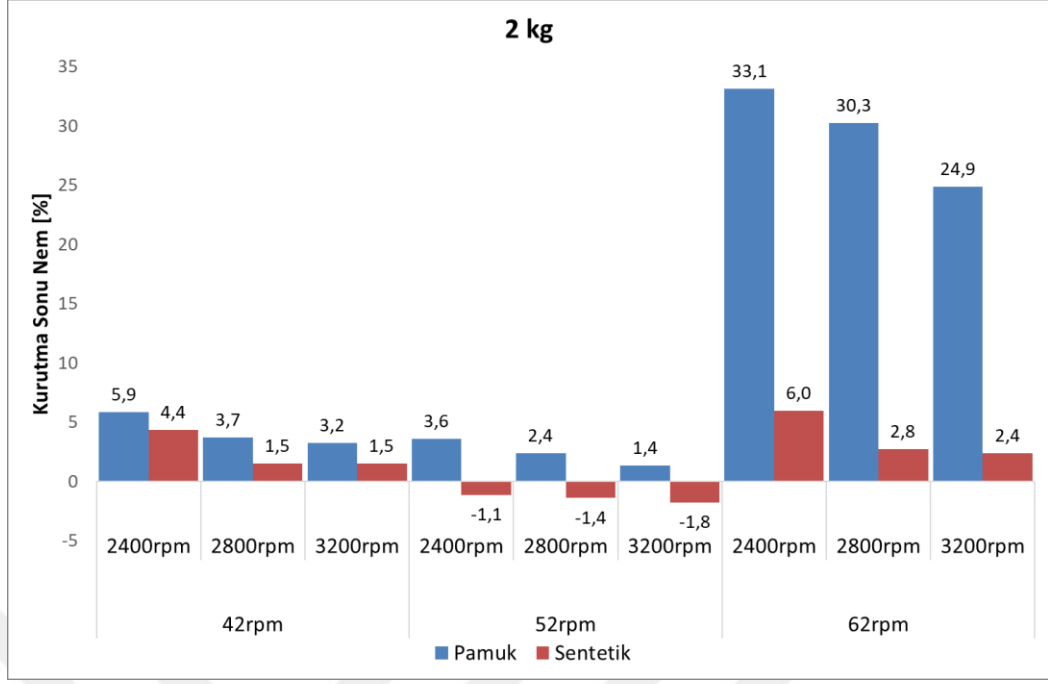


Şekil 4.18 : Ortlama hava debi değerleri [lt/s]

Tekstil tipine bağlı kurutma sonu nem değerlerinin gösterildiği Şekil 4.19 incelendiğinde tüm tambur devirlerinde ve hava debilerinde sentetik kumaşın kurutma sonu nem değerlerinin pamuğa göre daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.17 ile sentetik yükte hava debisinin daha düşük olduğu gösterilmişti ve daha yüksek bir debide daha iyi bir kurutma performansı beklenmektedir. Bu noktada tekstil tipinin kurutma performansına etkisi görülmektedir.

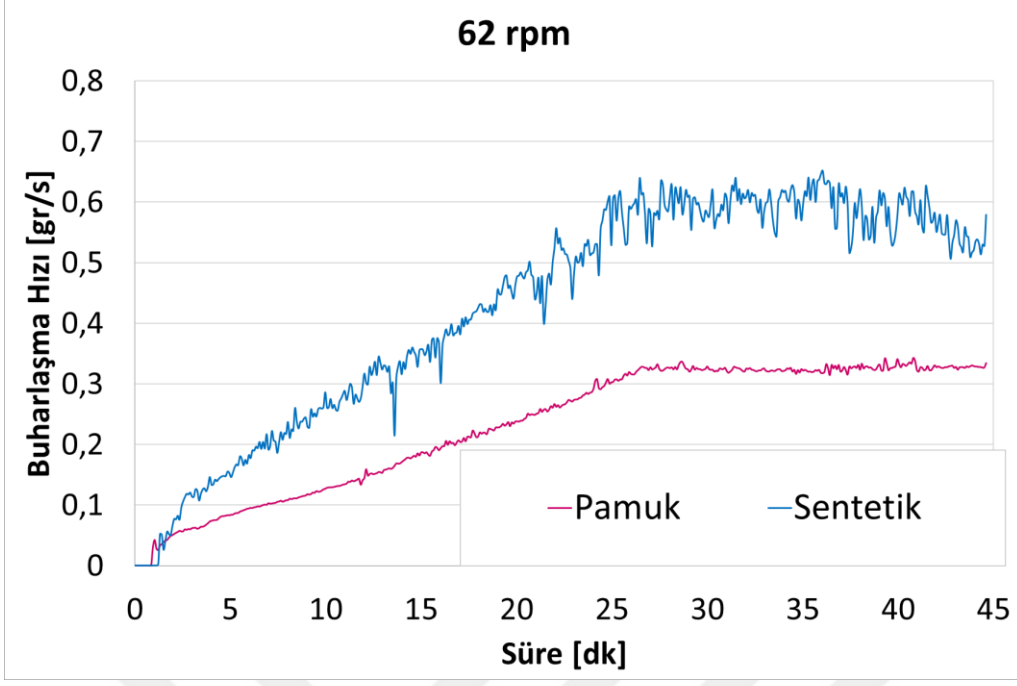
Higroskopik olan pamuk, ipek gibi tekstillerde suyun emilme değeri daha hızlı gerçekleşmekte ve poroz yapı ile su arasında fiziksel bağlar oluşmaktadır. Higroskopik olmayan polyester yapıları tekstillerde ise emilim daha yavaş oluşmakta ve tekstil yapısı ile su arasında fiziksel bağlar oluşmamaktadır [5].

Sentetik tekstilde ütü kuruluşuna kadar kurutma işlemi, suyun serbest halde olmasından dolayı daha kolay gerçekleşmektedir ve su doğrudan buharlaştırılabilir. Pamukta ise bu durum serbest halde olan suyun buharlaşmasına kadar sentetik gibi gerçekleşir. Ancak kurutma devam ettikçe poroz yapı ile bağ kurmuş olan su moleküllerini buharlaştırmak zorlaşmaktadır [3].



Şekil 4.19 : Tekstil tipine bağlı kurutma sonu nem değerleri [%]

Sonuç olarak yapısal özelliğinden dolayı sentetik kumaşlarda nem alma, aynı kurutma hacminde daha düşük debide olsa dahi pamuğa göre daha kolay gerçekleştirilmektedir, bu durum en net 62 rpm testlerinde görülmektedir. Ütü kuruluşuna henüz girmemiş ve tekstillerin çepere yapışıp bir kütle olarak hareket ettiği durumda zamana bağlı nem alma grafiği Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Grafikte gösterilen eğriler sabit 2800 rpm fan motor devrine aittir. Grafik incelendiğinde, sentetik hava debisi yaklaşık 7 litre/saniye düşük olmasına rağmen buharlaşma hızının pamuğa göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu grafik yukarıda sebepleri açıklanan su moleküllerinin pamuk teskilinde daha kolay emilmesinden dolayı buharlaşmanın daha yavaş bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.20 : Tekstil tipine bağlı buharlaşma hızı [gr/s]

5. MODELLEME ÇALIŞMALARI

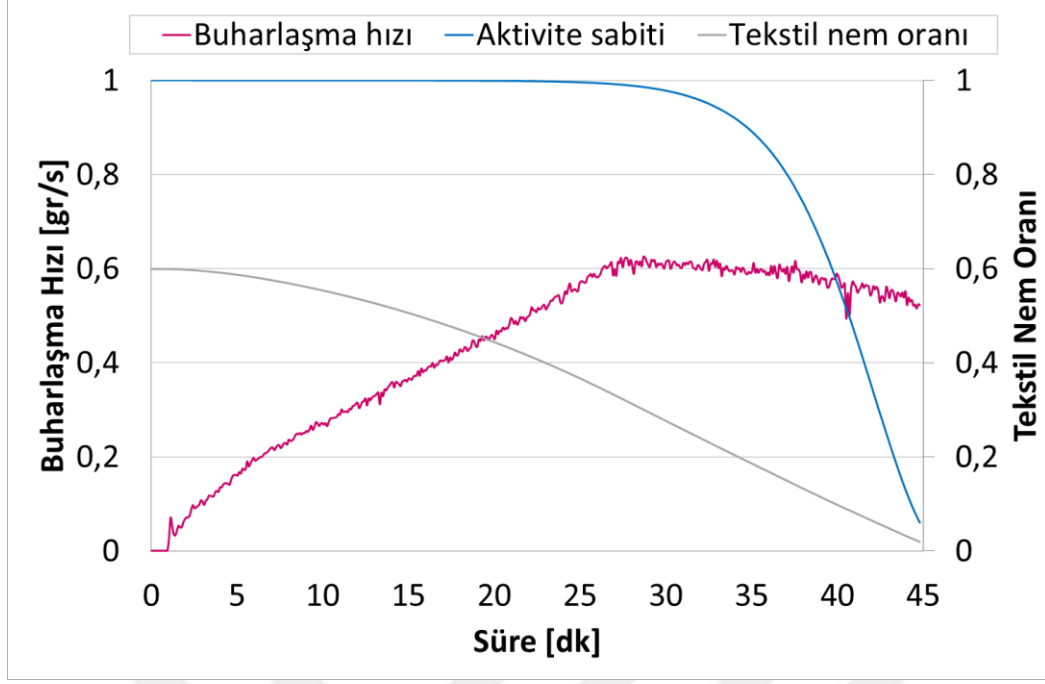
Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar sonucunda matematiksel bir model oluşturulması hedeflenmiştir. Oluşturulan model, farklı tambur devri ve fan motor devirlerinde pamuk için deney gerçekleştirilerek doğrulanmıştır.

Modelleme çalışmalarında denklem 3.4 kullanılmıştır. Pamuk üzerinden nem alma işlemi, aktivite katsayısına (denklem 3.8), tekstilin yüzey alanına ve kütle transfer katsayısına bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Literatürde, bu çalışmalar pamuk için gerçekleştirildiği için aktivite katsayısına ait değerler pamuk için belirlenmiştir ve tekstilin nem değerine bağlı aktivite katsayısının kurutma boyunca değişimi 52 rpm tambur devri ve 2800 rpm fan motor devrinde Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Şekil 5.1 incelendiğinde tekstil nem oranına bağlı değişen aktivite katsayısı ilk 25 dakikada tekstil nem oranı düşmesine rağmen, denklem 3.8 yapısı ve pamuğa ait katsayıları gereği 1’e yakın değerler almaktadır. Bu süreçte buharlaşma hızı da artmaktadır. Kurutmanın bu aşamasında buharlaşma hızı, su moleküllerinin serbest yapıda olmaları ve kolay bir şekilde buhar haline dönüştürülebilmelerinden dolayı en yüksek değerine ulaşmaktadır [10].

25 . dakikadan sonra tekstil nem oranı düşmeye devam etmektedir ve aktivite katsayısı da paralelde düşmeye başlamaktadır. Bu noktadan sonra buharlaşma hızı da azalmaya başlamaktadır. Tekstil yüzeyinde bulunan su moleküllerinin buharlaşması sonrası ıslak temas yüzeyinin azalması ve buharlaşma hızına etkisi tekstil nem değerine bağlı aktivite katsayısı ile bu şekilde açıklanmaktadır.



Şekil 5.1 : 52 rpm – 2800 rpm buharlaşma hızı ve aktivite katsayısı grafiği

Denklem 3.4 ile oluşturulmak istenen modelde aktivite katsayısı ile birlikte bir diğer önemli parametre denklem 3.9 ile gösterilen kütle transfer katsayısıdır. Isı transferi katsayısına, özgül ısı değerine ve Lewis sayısına bağlı olan bu değer kurutma boyunca anlık olarak hesaplanması çok zor bir hesaplamadır. Sebep olarak ise tambur içerisinde dönerk hareket eden tekstiller her an farklı geometriler oluşturmaktadır ve birbirleri ile içe girdikleri için ayrı katı kütleler olarak düşünülemez. Bu sebeple kütle transfer katsayısının doğrudan hesabı yapılamamıştır. Gerçekleştirilen deney sonuçları olduğu için kütle transfer katsayısı deney verilerinden denklem 3.4 ile hesaplanmıştır.

Tambur içerisindeki buharlaşmanın modellenmesi için Buckingham Pi Teoremi kullanılarak kurutma modeli oluşturulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda Çizelge 5.1'de gösterilen ve literatürden ve yapılan çalışma sonrası belirlenen kurutma modelinde etkili olan parametreler kullanılmıştır. Bu kapsamda kütle transfer katsayısı, tambur çevresel hızı, tambur alanı içerisindeki hava akış hızı, tambur içerisindeki havanın kütlesi ve buharlaşan su miktarı parametre olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.1 : Buckingham pi teoremi parametreler

Parametreler	Birim	Temel Birimler
Kütle transfer katsayısı	k	LT^{-1}
Tambur çevresel hızı	V_t	LT^{-1}
Hava akış hızı	V_h	LT^{-1}
Tambur içerisindeki hava kütlesi (1 atm)	m_h	M
Buharlaştırılan su kütlesi	m_b	M
Total	K = 5 parametre sayısı	R=2

LT^{-1} ve M referans boyutlar olmuştur. İlk bilinmeyen olarak denklem 5.1 belirlenmiştir. Denklem 5.2 çözülerek denklem 5.1’de yerine konulmuştur ve denklem 5.3 ilk boyutsuz sayı olmuştur.

$$\prod 1 = m_b * m_h^a * V_t^b \quad (5.1)$$

$$(M)(M)^a(LT^{-1})^b = (M)^0(LT^{-1})^0 \quad (5.2)$$

$$\prod 1 = \frac{m_b}{m_h} \quad (5.3)$$

İkinci boyutsuz sayı için hava hızı kullanılmıştır. Denklem 5.5 çözülerek denklem 5.4’te yerine konarak denklem 5.6 elde edilmiştir.

$$\prod 2 = V_h * m_h^a * V_t^b \quad (5.4)$$

$$(LT^{-1})(M)^a(LT^{-1})^b = (M)^0(LT^{-1})^0 \quad (5.5)$$

$$\prod 2 = \frac{V_h}{V_t} \quad (5.6)$$

Üçüncü boyutsuz sayı için kütle transfer katsayısı kullanılmıştır. Denklem 5.8 çözülerek denklem 5.7’de yerine konarak denklem 5.9 elde edilmiştir.

$$\prod 3 = k * m_h^a * V_t^b \quad (5.7)$$

$$(LT^{-1})(M)^a(LT^{-1})^b = (M)^0(LT^{-1})^0 \quad (5.8)$$

$$\prod 3 = \frac{k}{V_t} \quad (5.9)$$

Deneyde toplanan veriler ile tambur girişinde ve çıkışında basınca, sıcaklığa, bağlı neme bağlı özgül nemler hesaplanarak denklem 3.4 ile kütle transfer katsayısı her deney durumu için hesaplanmıştır.

Tambur çapının 0.6 metre olarak bilinmesi ve rpm değerinden açısal hız değeri hesaplanarak tambur çevresel hızı hesaplanmıştır. Tambur içerisinde hava akışının tüm alana yayıldığı kabulü yapılmıştır ve bu şekilde debi değerinden hava hızı değerine geçilmiştir. Tambur içerisindeki havanın basıncı 1 atm kabul edilerek sıcaklığa bağlı yoğunluk değerine göre sabit tambur hacminde ortalama hava ağırlığı hesaplanmıştır. Denklem 4.1 ile hesaplanan buharlaşma debisi kurutma süresi ile çarpılarak toplam buharlaşan su kütlesi belirlenmiştir.

Tüm veriler belirlendikten sonra her bir test grubu için 3 boyutsuz sayı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Daha sonra Minitab yazılımı ile 3 boyutsuz parametre sayısal olarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda Çizelge 5.2'de gösterildiği şekilde %97.7 oranında R^2 değeri elde edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Minitab analiz sonucu

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,175300	98,47%	98,26%	97,77%

Sayısal analiz sonrasında elde edilen formül ile denklem 5.3, denklem 5.6 ve denklem 5.9 cinsinden yazılarak 45 dakika sabit ısı gücü ile kurutma sonrasında, tekstil üzerinden ne kadar su buharlaştırılacağı tahmin edilmiştir.

Oluşturulan matematiksel modelin doğrulanması adına aynı test düzeneğinde farklı parametreler belirlenmiştir ve doğrulanması adına 4 farklı koşul altında 2 tekrarlı testler gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan parametreler Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Doğrulama testleri parameterleri

Tambur Devri (rpm)	Fan Motor Devri (rpm)
46	2600
46	3000
60	2600

Yapılan doğrulama testleri sonrasında tahmin edilen buharlaştırılan su kütleleri ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır ve çizelge 5.4'te paylaşılmıştır. Sonuç olarak ortalama % 4,6 hata ile deneysel veriler modellenmiştir.

Çizelge 5.4 : Doğrulama testleri sonuçları

Tambur Devri (rpm)	Fan Motor Devri (rpm)	Tahmin Edilen Su Kütlesi m_h [kg]	Deney Sonucu Su Kütlesi m_h [kg]	Hata Oranı [%]
46	2600	1,09	1,168	6,69
46	3000	1,12	1,173	4,69
60	2600	0,67	0,628	5,99
60	3000	0,69	0,678	1,16

2 kg pamuk tekstilinin belirlenen çalışma konseptinde kurutma sonu yükü yaklaşık olarak tahmin edilmiştir. Bu sayede test edilmemiş farklı tambur devri ve fan motor devirlerinin kurutma performansları deney yapmadan öngörülebilmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, tekstil tipinin, tambur devrinin ve hava debisinin tekstil üzerinden nem alma performansına etkileri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

Öncelikle tamburlu kurutucularda kurutma performansına etki eden parametrelerin belirlenmesi ve farklı tekstil tiplerinin yapılarının kurutmaya etkisinin anlaşılabilmesi için için literatür araştırması gerçekleştirilmiş ve tez çalışması kapsamında paylaşılmıştır.

Tez deneysel çalışmaları kapsamında tekstil tipi, tambur devri ve hava debisi parametre olarak belirlenmiştir ve 2 kg yükte, sabit ısıda ve sabit sürede testler gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda tambur devrinin hava debisine etkisi, tekstil hareketine etkisi ve tekstil üzerinden nem alma hızına etkisi incelenmiştir. İkinci olarak hava debisinin motor fan değerine göre değişimi ve zamana bağlı nem alma hızına etkisi incelenmiştir. Son olarak ise pamuk ve sentetik tekstillerin aynı çalışma koşullarında hava debisine etkisi ve zamana bağlı nem alma hızına etkisi incelenmiştir.

Gerçekleştirilen deney sonuçları, literatür çalışması ile elde edilen teorik çalışmalar ile incelenmiştir. Pamuk tekstilinin kütle transfer katsayısına, aktivite katsayısına ve tekstil yüzey alanına bağlı buharlaşma debisi incelenmiştir. Aktivite katsayısının tekstil nem oranına bağlı değişiminin buharlaşma debisine etkisi incelenmiştir. Kurutma hızına etkisi belirlenen parametreler ile Buckingham Pi Teorisi kullanılarak boyutsuz değerler elde edilmiştir. Elde edilen boyutsuz değerler deney sonuçları ile hesaplanarak Minitab programı ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal analiz sonucu pamuk tekstilinin tambur devri ve hava debisi giriş parametreleri kullanılarak toplam buharlaştıracak su miktarı tahmin edilmiştir. Yapılan tahminler 4 farklı durum için test edilmiştir ve tahmin ile deneysel veri karşılaştırılmıştır.

Yapılan yüksek lisans tez kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Sabit pamuk, sentetik yükte ve fan motor devrinde, tambur devri 42 rpm'den 62 rpm'e artırıldığında hava debisi yaklaşık 1 litre/saniye mertebelerinde artış göstermektedir. Bu da $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye karşılık geldiği için tambur devrinin hava debisine etkisi ihmal edilmiştir.

- Froude sayısı değerleri hesaplanarak 42, 52 ve 62 rpm’de pamuk ve sentetik tekstil hareketi incelenmiştir. 62 rpm’de çepere yapışma - santrifüj hareketi, 42 ve 52 rpm’de düşme – ezme hareketi yapıldığı tespit edilmiştir.
- 62 rpm santrifüj hareketi en düşük buharlaşma hızının elde edilmesini sağlamıştır. Çepere yapışan tekstiller bir bütün olarak hareket ederek tek bir yüzeyden kütle transferi gerçekleşmektedir. Bu yüzden tekstillerin iç kısmında bulunan su moleküllerinin difüzyon ile tekstil yüzeyine gelmesi için daha fazla süreye ve enerjiye ihtiyaç olmaktadır.
- Ezme hareketi yapılan 42 ve 52 rpm’de en iyi sonuç 52 rpm’de elde edilmiştir. 52 rpm’de, 42 rpm’e göre tekstiller daha yüksek noktadan düşmekte ve bu sayede tambur hacmi içerisinde daha iyi açılarak kurutma havası ile temas eden yüzey alanı daha fazla olmaktadır.
- Hava debisinin tekil etkisinin görülebilmesi için santrifüj hareketi yapan 62 rpm incelenmiştir. Bu koşulda tek bir katı yük gibi davranan tekstil üzerinden geçen hava debisi artırılarak tekil etkisi görülmüştür. Bu koşulda, fan motor devri arttıkça hava debisi artmaktadır ve bu sayede tekstil üzerinden su buharlaştırma debisi artmaktadır.
- Aynı fan motor devirlerinde, pamuk tekstilinin üzerinden geçen hava debisi sentetiğe göre daha yüksektir. Standart 2 kg pamuk ve sentetik yükte, sentetiğin toplam yüzey alanı pamuğa göre % 30 daha fazladır.
- Sentetik yükte, pamuğa göre hava debisi daha düşük olmasına rağmen buharlaşma hızı daha yüksektir. Pamuğun higroskopik yapıda olması ve su emiliminin yüksek olmasından dolayı, sentetiğin de higroskopik yapıda olmaması ve su emilim değerinin düşük olması dolayısıyla suyun yüzeyinde bulunması sebebiyle sentetik tekstiller pamuğa göre daha hızlı bir şekilde kurutulmaktadır.
- Pamuk tekstili üzerindeki suyun tekstil nem oranına bağlı durumu aktivite katsayısı ile tanımlanmıştır. Aktivite katsayısı 1 değerine yakinken su tekstil yüzeyinde bulunmaktadır ve buharlaşma hızı yüzeydeki su bitene kadar artmaktadır ve maksimum noktasına ulaşmaktadır. Tekstil yüzeyindeki suyun bitmesiyle birlikte tekstil yapısında bulunan suyun kurutulması zorlaşmaktadır.

Bu durum aktivite katsayısının düşmesi ile açıklanmaktadır ve bu durumda buharlaşma hızında yavaşlamaktadır.

Bu çalışmaların devamı olarak aşağıdaki çalışmaların yararlı olabileceği düşünülmektedir:

- Oluşturulan model, 2 kg çeyrek yük için yapılmıştır, pamuk tekstilinin tüm standart yüklerde (4 kg ve 8 kg) benzer şekilde modellenmesi ile yük miktarı da parametre olarak eklenebilir. Tüm yük kapasitelerinde kurutma sonu yük değeri tahmin edilebilir ve bu sayede test sayıları azaltılabilir.
- Kütle transfer katsayısının, debiye, sıcaklığa, bağıl nem oranına bağlı olarak hesaplanabilmesi için tekstil hareketinin zamana bağlı olarak çıkarılması, sürekli değişen tekstil geometrilerinin toplamda yaptığı hareketin tek bir geometriye indirilmesi ve sonrasında kütle transfer katsayısının hesaplanması.
- Sabit ısıda gerçekleştirilen deneylere, ısı gücün parametre olarak eklenmesi için farklı kompresör devirlerinde, farklı ısıtıcı güçlerinde kontrollü deneyler yapılması ve ısı gücün farklı tekstil tipleri üzerinde kurutma performansına etkisinin incelenmesi.
- Tekstil mühendisliği alanında ısı gücün, tambur devrinin farklı tekstil tipleri üzerinde oluşturduğu hasarlanmanın çalışılması, bu sayede optimum kurutma algoritmaları belirlenirken tekstil hasarı da göz önünde bulundurulmuş olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **EN 61121 Tumble dryers for household use - Methods for measuring the performance.** (2013). EN 61121
- [2] **HAGHI, A. K.** (2011). Heat & Mass Transfer in Textiles, *WSEAS Press*
- [3] **Adrijan Bejan ve İbrahim Dinçer.** (2004). Porous and Complex Flow Structures in Modern Technologies, *Springer*
- [4] **R.B. Keey.** (1993). The Drying of Textiles, *Rev. Prog. Coloration* 23, 57-72
- [5] **Li Y. ve Luo Z.X.** (2009). Physical Mechanisms of Moisture Diffusion into Hygroscopic Fabrics during Humidity Transients, *Journal of the Textile Institute*
- [6] **Philip W. Gibson.** (1997). Modeling Convection/Diffusion Processes In Porous Textiles With Inclusion Of Humidity-Dependent Air Permeability, *U.S. Army Natick Research, Development and Engineering Center Natick, Massachusetts, USA 01760-5019*
- [7] **Yu X., Li Y. ve Ding X.** (2020). Relationship between drying parameters and drying performance in domestic tumble dryers, *Textile Research Journal*
- [8] **Wei W., Hua J. ve Ding X.** (2016). A mathematical model for simulating heat and moisture transfer within porous cotton fabric drying inside the domestic air-vented drum dryer, *The Journal of The Textile Institute*
- [9] **Mellmann J.** (2001). The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior, *Powder Technology* 118 2001 251–270
- [10] **Wei Y., Gong R.H., Ning L. ve Ding X.** (2017). Enhancing the Energy Efficiency of Domestic Dryer by Drying Process Optimization, *Drying Technology*
- [11] **Yunus A. Çengel, Michael A. Boles.** (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th edition, 732-733
- [12] **V. Yadav, C.G. Moon.** (2007). Fabric-Drying Process In Domestic Dryers, Department of Mechanical Engineering, *The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand*
- [13] **A. J. D. Lambert, F. P. M. Spruit ve J. Claus.** (1991). Modelling as a Tool for Evaluating the Effects of Energy-Saving Measures. Case Study: A Tumbler Drier, *Faculty of Industrial Engineering, University of Technology, PO Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands*
- [14] **Prasertsan, S., Saen-Saby, P., Ngamsritrakul, P., Prateepchaikui, G.** (1996). Heat Pump Dryer. Part 1: Simulation of Models, *Int. J. Energy Res.* 1996, 29, 1067–1079

- [15] **Prasertsan, S., Saen-Saby, P., Ngamsritrakul, P., Prateepchaikui, G.** (1997). Heat Pump Dryer Part 2: Results of the Simulation, *Int. J. Energy Res.*, 21, 1–20.
- [16] **Prasertsan, S., Saen-Saby, P., Ngamsritrakul, P., Prateepchaikui, G.** (1997). Heat Pump Dryer Part 3: Experimental Verification of the Simulation, *Int. J. Energy Res.*, 21, 707–722.
- [17] **Odilio Alves-Filho.** (2016). Theory, Design and Industrial Applications, *Taylor & Francis Group, LLC*
- [18] **Bing-Hung Lee, Rony A. Sian ve Chi-Chuan Wang.** (2018). A rationally based model applicable for heat pump tumble dryer, *Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan*

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Muhammed ERGÜN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği, Isı&Akışkan

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018-2020 yılları arasında ARÇELİK A.Ş. firmasında Merkez AR-GE Temizleme ve Tekstil Bakım Teknolojileri yöneticiliğinde Proje Mühendisi olarak çalıştı.
- 2020 yılından itibaren BMC SAVUNMA A.Ş.'de Yeni Nesil Fırtına Obüs projesinde Proje mühendisi olarak çalışmakta.