KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKRİLİK TOW ELYAF KURUTUCUSUNUN TERMODİNAMİK ANALİZİ

GAMZE SUNAR

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKRİLİK TOW ELYAF KURUTUCUSUNUN TERMODİNAMİK ANALİZİ

GAMZE SUNAR

Prof. Dr. İlhan Tekin ÖZTÜRK		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Doç. Dr. Hasan KARABAY		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Doç. Dr. Derya B. Tümer ÖZKAN		
Jüri Üyesi,	**Yıldız Teknik Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.06.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Enerjinin verimli kullanılması, enerji kullanan üretimlerin üretim maliyetini düşürmekle birlikle enerji kaynaklarının tüketimini geciktirmesi ve çevrenin korunması için oldukça önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmelidir. Bu çalışmada Akrilik elyaf tow bantlarının kurutulmasında kullanılan kurutucular Termodinamik olarak incelenmiş ve kurutucunun veriminin iyileştirilmesi incelenmiştir.

Öncelikli olarak danışmanım Prof. Dr. İlhan Öztürk'e bu tez çalışması esnasında bana yeni ufuklar açtığı, yardım ve destek olduğu için ve tecrübelerinden yararlanmamı sağladığı için teşekkür ederim.

Bu yapılan çalışmalar ve ölçümler Aksa Akrilik Kimya San. A.Ş. Tekstil Direktörlüğü bünyesinde yer alan elyaf tow kurutucularında yapılmıştır. Bu projenin gözlemlendiği alanın, makinanın kullanılmasına ve ölçümlerinin yapılmasına izin verdiği için çalışmaktan gurur duyduğum Aksa Akrilik Kimya Sanayi A.Ş. firmasına teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan aileme de sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Ocak – 2016 Gamze SUNAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET vii
ABSTRACT viii
GİRİŞ 1
1. TEKSTİL LİFLERİ KURUTMA PROSESİ 3
1.1. Tekstil Sanayinde Kullanılan Lifler 3
1.1.1. Akrilik elyaf 4
1.2. Tekstil Malzemeleri Kuruma Süreci 5
1.2.1. İplikte bulunan nemin durumu 7
1.2.2. Tekstilde nem tanımlamaları 7
1.3. Endüstriyel Kurutma Sistemleri 8
1.4. Akrilik Elyaf Kurutma Makinaları 9
1.4.1. Serpantinlerde kurutmayı etkileyen faktörler 11
1.4.2. Kurutucularda kurutma havası kullanımı 12
2. LİTERATÜRDE KURUTMA PROSESLERİ İÇİN YAPILAN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ ARAŞTIRMALARI 13
3. KURUTUCUNUN TERMODİNAMİK ANALİZİ 18
3.1. Akrilik Kurutma Prosesinde Kütle Dengesi ve Termodinamiğin I. Kanunu Analizi 18
3.1.1. Kütle dengesi 18
3.1.2. Akrilik tow kurutma proses parametreleri 19
3.1.3. Psikrometrik diyagramın kurutmada kullanımı 21
3.1.4. Termodinamiğin 1. kanunu 22
3.1.5. Kurutucunun belirli noktalarındaki entalpilerin hesaplanması 23
3.1.6. Tow kurutucusu için enerji dengesi 26
3.1.7. Enerji dengesi hesaplama sonuçları 26
3.1.8. Yüzeylerden kayıp enerjinin hesaplanması 27
3.1.9. Makina duruşlarından dolayı oluşan enerji kayıpları 31
3.2. Akrilik Tow Kurutma Prosesinin Ekserji Analizi 31
3.2.1. Ekserjinin tanımı 31
3.2.2. Tersinir iş ve tersinmezlik 32
3.2.3. Kurutucunun belirli noktalarındaki ekserjilerin hesaplanması 33
3.2.4. Ekserji dengesi 38
4. TOW KURUTUCUSUNUN MEVCUT DURUMUYLA İLGİLİ BULGULAR VE TARTIŞMA 39
4.1. Birinci Kanun Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 39
4.2. Birinci Kanun Analizi Sonuçlarının Sankey Diyagramı Yardımıyla Açıklanması 39
4.3. Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi 40

4.4. Ekserji Analizi Sonuçlarının Sankey Diyagramı Yardımıyla Açıklanması 41
5. TOW KURUTUCUSU İÇİN ÖNERİLEN VERİM İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ 42
5.1. Enerji Verimliliği İyileştirme Yöntemleri ve Verimlere Katkılarının Hesaplamaları 42
5.2. İyileştirme Sonrası Enerji ve Ekserji Dengesi 54
6. ELDE EDİLEN BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞILMASI 56
6.1. İyileştirme Sonrası Verimlilik Sonuçları 57
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 59
KAYNAKLAR 60
EKLER 63
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 68
ÖZGEÇMİŞ 69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Akrilik elyafa ait bir görünüm 5
Şekil 1.2. Kurutma hızının zamana göre değişimi 6
Şekil 1.3. Tow kurutucusunun ön ve arkadan görünüşü 10
Şekil 1.4. Kurutucu içersinde fanın havayı yönlendirme şekli 11
Şekil 1.5. Akrilik tow kurutucusunun çalışma prensibi 11
Şekil 2.1. Ekserjinin üçgeni 14
Şekil 3.1. Kurutucunun kütle ve enerji dengesi şematik görüntüsü 19
Şekil 3.2. Kurutucu yan yüzeyde termal kamera görüntüsü 30
Şekil 3.3. Kurutucu yan yüzeyde termal kamera ile elde edilen sıcaklık dağılımı 30
Şekil 3.4. Kurutucu üst yüzeyde termal kamera görüntüsü 30
Şekil 3.5. Kurutucu üst yüzeyde termal kamera ile elde edilen sıcaklık dağılımı 30
Şekil 4.1. Tow kurutucusunun mevcut durumu için enerji sankey diyagramı 40
Şekil 4.2. Tow kurutucusunun mevcut durumu için ekserji sankey diyagramı 41
Şekil 5.1. Tow kurutucusunun tasarlanan ısı geri kazanım cihazı (ısı değiştirgecinin) şematik görüntüsü 45
Şekil 5.2. Plakalı-kanatlı ısı değiştirgeci şematik akış görüntüsü 46
Şekil 5.3. Isı değiştirgeci sıcaklık dağılımı 47
Şekil 5.4. Cihazın farklı sıcaklıklara göre maliyet grafikleri 53
Şekil 6.1. Tow kurutucusunun iyileştirme sonrası için enerji sankey diyagramı 57
Şekil 6.2. Tow kurutucusunun iyileştirme sonrası için ekserji sankey diyagramı 58

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Değişik tekstil malzemelerin özgül ısıları....6
Tablo 3.1. Baca gazı ölçüm değerleri....20
Tablo 3.2. Kurutucuda kütle akış durumu....20
Tablo 3.3. Kurutucuda kullanılan nemli havanın entalpi değerleri....23
Tablo 3.4. Fanların güç değerleri....25
Tablo 3.5. Kurutucunun enerji dengesi....27
Tablo 3.6. Kurutucu yüzeyinden ısı kaybı....29
Tablo 3.7. Ekserji dengesi....38
Tablo 4.1. Tow kurutucusunun mevcut durumu için I. kanun sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler....39
Tablo 4.2. Tow kurutucusunun mevcut durumu için ekserji sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler....41
Tablo 5.1. Kurutucu fan çalışma kapasiteleri....44
Tablo 5.2. Isı değiştirgecinde baca gazı (sıcak akışkan) verileri....48
Tablo 5.3. Isı değiştirgecinde temiz hava (soğuk akışkan) verileri....48
Tablo 5.4. Isı değiştirgecinin tasarım parametreleri....48
Tablo 5.5. Baca gazı diğer çıkış sıcaklıklarından yapılan tasarruf miktarı....51
Tablo 5.6. Baca gazı ısı değiştirgeci ile ilgili maliyetler....53
Tablo 5.7. Enerji verimliliği tedbirleri uygulandıktan sonra enerji dengesi....54
Tablo 5.8. Enerji verimliliği tedbirleri uygulandıktan sonra ekserji dengesi....55
Tablo 6.1. İyileştirme yöntemleri sonucunda elde edilen işletme kazançları....56
Tablo 6.2. İyileştirme yöntemleri sonucunda yatırımın geri ödeme süreleri....56
Tablo 6.3. İyileştirme sonrası I. kanun sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler....57
Tablo 6.4. İyileştirme sonrası ekserji sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler....58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A : Yüzey alanı, (m^2)
a_r : Sıcaklık faktörü
c_p : Sabit basınçtaki özgül ısı, ($kJ\ kg^{-1}K^{-1}$)
c_r : Işınım katsayısı
d : Çap, (mm)
e : Özgül ekserji, (kJ/kg)
$\dot{E}$: Ekserji akışı, (kJ/h) (kW)
F : Maliyet, ($/yıl)
g : Yerçekimi ivmesi, (m/s^2)
h : Özgül Entalpi, (kJ/kg), Isı taşınım katsayısı, ($kJ\ m^{-2}h^{-1}°C^{-1}$)
H : Duvar yüksekliği, (m)
K : Toplam ısı geçiş katsayısı, ($kJ\ m^{-2}h^{-1}°C^{-1}$)
$\dot{m}$: Kütle, (kg/h)
P : Basınç, (kPa)
Pr : Prandl sayısı
R : Gaz sabiti, (kJ/kg-K)
Re : Reynolds sayısı
$\dot{Q}$: Isıl güç (ısı akışı), (kJ/h) (kW)
s : Özgül entropi (kJ/kg-K)
T : Sıcaklık, (K)
T_0 : Referans sıcaklık, (K)
T_∞ : Dış ortam sıcaklığı, (K)
$\dot{W}$: Güç, (kJ/h) (kW)
v : Hız, (m/s)
z : Yükseklik, (m)
ε : Isı değiştirgeci etkenliği
ϵ : Işınım yayma katsayısı
θ : Yüzey sıcaklığı, (K)
μ : Dinamik vizkozite, (Pa.s)
η : Verim, (%)
ρ : Yoğunluk, (kg/m^3)
σ : Stephan Boltzman sabiti, ($Wm^{-2}K^{-4}$)
φ : Bağıl nem, (%)
ω : Özgül nem, (kg H_2O/kg kuru hava)
ς : Daralmadaki ve genişlemedeki yerel kayıp katsayısı

Kısaltmalar

DN : Diameter Nominal (Nominal Çap)
GÖS : Geri Ödeme Süresi
kteks : kiloteks

AKRİLİK TOW ELYAF KURUTUCUSUNUN TERMODİNAMİK ANALİZİ

ÖZET

Tekstil işletmelerinde elyafın kurutulması, iplik oluşum aşamasına kadar kaliteyi ve verimliliği birinci dereceden etkileyen bir parametredir. Aynı zamanda kurutma prosesi, boyamada enerji tüketiminde yüksek bir maliyete sahiptir. Bu çalışmanın amacı, tow kurutucusunun enerji tasarruf potansiyeli olan noktalarının belirlenmesi ve değerlendirilmesidir. Bu amaca yönelik, mevcut halde çalışır durumdaki bir akrilik elyaf kurutucusunun üzerinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerler yardımıyla termodinamiğin I. kanunu ve ekserji analizine göre kurutucunun performansı belirlendi. Daha sonra kurutucu üzerinde yapılabilecek; kurutucunun sıcak yüzeylerinin ısıya karşı yalıtılması, egzost gazının enerjisinin geri kazanılması, duruş sürelerinin kısaltılması, hava debisinin klapeler ile ayarlanması gibi enerji tasarrufu tedbirleri uygulanması sonucu kurutucunun verimini iyileştirebilecek yöntemler değerlendirildi. Bu iyileştirmeler sonucu kurutucunun termodinamiğin I. kanun verimi %35 ve II. kanun verimi %61 civarında arttırıldı. Ayrıca kurutucu için yapılan enerji tasarrufu tedbirlerinin en fazla 15 ay içinde kendini geri ödeyebilecekleri görüldü.

Anahtar Kelimeler: Akrilik Tow, Kurutucular, Termodinamik Analiz.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ACRYLIC TOW FIBER DRYER

ABSTRACT

Drying of fibre is the most dominant parameter that affects the quality and productivity of yarn in the textile industry. At the same time, drying process has a high cost in energy consumption in the dyeing. In fact, the purpose of this study is to determine the point of energy saving potential in the acrylic drier. For this purpose, the performance of an acrylic fibre drier currently operating was calculated based on the actual operating conditions data obtained from the drier with the help of the first law of thermodynamic and exergy analysis. Subsequently, as a result of energy saving measures on the driers; such as shortening the downtimes, recovering the energy of the exhaust air, insulating of the hot surfaces of the dryers for heat losses, adjusting the air flow with dryer dampers, the methods that could be improved efficiency of the dryer were evaluated. As a result of these improvements, efficiency is increased nearly 35% based on the first law of thermodynamics and 61% based on the exergy analysis. Furthermore, it is calculated that the energy saving measures on the dryer payback the relevant investment within 15 months.

Keywords: Acrylic Tow, Dryers, Termodynamic Analysis.

GİRİŞ

Son yıllarda kurutma proseslerinde, artan enerji fiyatları, azalan fosil yakıt kaynakları, çevresel kaygılar ve yüksek kaliteli ürün talepleri nedeniyle, enerji ve ekserji analizlerine artan bir önem verilmiştir. Ekserji analizi, süreçteki verimsiz aşamaları ve bunların nedenlerini ortaya çıkarmakta kullanılmaktadır.

Kurutma işlemi, genelde katı malzemelerden ısıl olarak suyun uzaklaştırılmasını içeren bir süreci tanımlamak için kullanılır [1]. Materyaldeki nemin uzaklaştırılması değişik yöntemlerle yapılır. Kurutma tekniğinde, mamulün cinsi, yapısı, ortam şartları, havanın hızı gibi faktörler etkili olurlar [2].

Kurutma mekanizması konusunda literatürde sayısız teorik ve deneysel araştırmalar yapılmıştır. Tekstil endüstrisinde ürünlerin kurutulması, malzemeden nemin alınış şekline göre mekanik kurutma ve ısıl kurutma olarak sınıflandırılır. Isıl kurutma olarak bilinen ısı enerjisiyle kurutmada, maliyeti düşürmek için yaş tekstil ürünleri önce santrifüj, merdane ile sıkma vs gibi yöntemlerle ön (mekanik) kurutmaya sonrasında ısıl kurutmaya gönderilmektedir [3]. Isı enerjisiyle yapılan kurutmalarda ısı transferi yöntemine de bağlı olarak sınıflandırma yapılabilir: Bunlar konveksiyonlu kurutma, ısı iletimli kurutma, ışımayla kurutmalardır. Tekstil mamullerinin kurutulmasında en fazla kullanılanı, konveksiyonlu kurutma yöntemidir [2].

Bu tez çalışması kapsamında; öncelikle kurutma ve kurutma prosesi prensiplerinin tekstil ürünlerinde nasıl uygulandığı kapsamında kısa bir literatür araştırması yapılmıştır. Mevcut projeye konu olan kurutucu prosesi tanımlanmıştır. Kurutma prosesinin Enerji ve Ekserji analizleri konularında yapılan çalışmaların detaylı literatür araştırması yapılmıştır. Daha sonra kurutma prosesinde enerji ve ekserji analizlerinin ve teorik hesaplamalarının yapılmasında kullanılan ifadeler açıklanarak tez konusu kapsamındaki kurutucu için uygulaması yapılmıştır.

Kurutma proseslerinde amaç, minimum enerji harcayarak maksimum nem giderirken istenilen kalitede ürün elde etmektir. Kurutma prosesinde, malzemelerdeki su buharlaşırken, gereken yüksek buharlaşma ısısı ve düşük ısıl verimli kurutucular nedeniyle enerji girdisi yüksektir. Analiz edilen tesisteki boyama prosesinde yapılan ölçümlerde tüketilen toplam buhar miktarının yaklaşık %55'inin akrilik elyaf kurutuculardа kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu sebepten kurutma prosesinde kaliteli ürünler için enerji girdi maliyetini azaltmak çok önemlidir. Kurutucuların enerji ve ekserji analizlerinin yapılması, kurutucuların daha verimli çalıştırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu tezin amacı, prosesde kullanılan mevcut akrilik tow kurutucusunun, termodinamiğin I. kanunu ve ekserji analizleri yapılarak verimlerini belirlemek, mevcut duruma göre iyileştirme yöntemlerini araştırmak ve iyileştirme öncesi ve sonrası maliyetleri hesaplayarak yatırımın geri dönüşüm sürelerini bulmak ve iyileştirme yöntemlerinin projeye katkılarını belirlemektir.

1. TEKSTİL LİFLERİ KURUTMA PROSESİ

Tez konusu kapsamında bu bölümde, tekstil lifleri, kurutma süreci, kurutucu mekanizması ve mevcut akrilik tow kurutucu prosesi hakkında kısa genel bilgiler verilecektir.

1.1. Tekstil Sanayinde Kullanılan Lifler

Belirli uzunluğu, inceliği ve mukavemeti olan, eğrilme ve bükülme kabiliyetine sahip, boyanabilen ve tekstil endüstrisinde kullanılmaya uygun materyallere lif denmektedir. Elyaf ise lif kelimesinin çoğuluna denir. Tekstil endüstrisinde kullanılmaya elverişli materyallerin değeri bu materyallerin sahip olduğu özelliklere bağlıdır. Bu özellikler, o tekstil materyalinin değerini artırır. Kaliteli bir tekstil materyalinin aşağıda belirtilen özelliklere sahip olması gerekir [4];

- İncelik, uzunluk, parlaklık
- Yoğunluk, dayanıklılık, eğrilme yeteneği
- Uzama ve esneme kabiliyeti
- Nem çekme yeteneği
- Isıdan ve ışıktan, kimyasallardan etkilenme özelliği
- Elektriksel özelliği

Tekstil sanayinde kullanılan lifler elde edildikleri kaynaklara ve yapılarına göre farklılıklar gösterirler. Lifler doğal lifler ve yapay lifler olmak üzere iki kısma ayrılırlar.

Doğal lifler: Doğada var olan bu lifler en çok tüketilen liflerdir. Üretilen doğal liflerin %90'ını pamuk, %8'ini ise yün ve ipek oluşturmaktadır. Doğal lifler üçe ayrılmaktadır. Bunlar; bitkisel lifler, hayvansal lifler, anorganik liflerdir [4].

Yapay lifler: Kimyasal işlemler sonucu elde edilen lifler, yapay lifler olarak adlandırılır. Yapay lifler ikiye ayrılmaktadır. Bunlar;

• Rejenere lifler: Genelde kumaş/giysi kesilip biçilirken çıkan firelerin toplanıp, harmanlanıp, tamburlu büyük makinelerde tekrar elyaf haline getirilmesi ile yapılırlar (Viskoz lifleri, selüloz nitrat, selüloz asetat lifleri, bakır amonyum lifleri).

• Sentetik lifler: Sentetik lifler doğada, lif halinde bulunmayan bileşiklerden meydana getirilmişlerdir. Sentetik lifler, kömür, petrol, su, azot gibi son derecede basit maddelerden kimyasal olarak değişik şekillerde birleştirilerek lif haline dönüştürülürler (Polyester lifi, poliamid, poliüretan, polivinil lifleri) [4].

1.1.1. Akrilik elyaf

Akrilik lifleri, diğer sentetik liflere göre daha ucuz olması, boyama işlemlerinin çok karmaşık olmaması ve yün lifleri ile rahatlıkla harmanlanabilmesi gibi özellikleri sayesinde tekstil için halen çok önemli bir yer teşkil etmektedir [5].

Akrilik lifler, pek çok önemli uygulamalarda özellikle el örgü ve çorap giysiler içinde, yünün yerini almıştır. Örgü ipliklerin çoğunluğu genellikle kazak, çorap vb. imalatına giden ipliklerdir. Battaniye ve halı, yüksek elastikiyet, renk, parlaklık, hacimlilik, yıkama kolaylığı, boncuklanmaya direnç ve iyi ışık ve renk haslığı nedeniyle akrilik elyafın yün ile yarıştığı diğer uygulamalardır. Bu özelliklerinden dolayı akrilik elyaf 1950 yılında Dupont (ABD) tarafından tanıtımından bu yana muazzam bir büyüme yaşamıştır.

Akrilik elyaf, ana monomerlerden biri olan Akrilonitril kullanılarak yapılır. Vinil monomerler içinde akrilonitril, sentetik elyaf üretimi için kullanılan tek monomerdir [6]. Saf poliakrilonitril lifleri oldukça yüksek dayanıklılık göstermekte ise de kopolimer içeren akrilik lifleri, yan zincirlerin etkisiyle daha düşük dayanıklılık göstermektedir ancak tekstilde kullanım için yeterli mukavemet değerlerine sahiptirler. Islandıklarında dayanıklılıkları bir miktar azalır. %20-36 oranında uzama gösterirler. En önemli özellikleri, uzamanın dayanıklı olmaması ve buharlama yapıldığında tekrar eski boyutlarını geri kazanmalarıdır [5]. Şekil 1.1.'de taranmış akrilik elyaf görünümü yeralmaktadır.



Şekil 1.1. Akrilik elyafa ait bir görünüm

1.2. Tekstil Malzemeleri Kuruma Süreci

Tekstil malzemeleri gibi gözenekli higroskopik malzemelerin kurutulması, eş zamanlı ısı ve kütle transferini ihtiva eden karmaşık bir prosestir. Yapılmış olan çalışmaların birçoğunda, kuruyan malzeme içerisinde ve bu malzeme ile malzemenin etrafını çevreleyen kurutma havası arasında meydana gelen ısı ve kütle geçişi genellikle enerji ve kütle transferi denklemleri yardımı ile ifade edilmektedir [4].

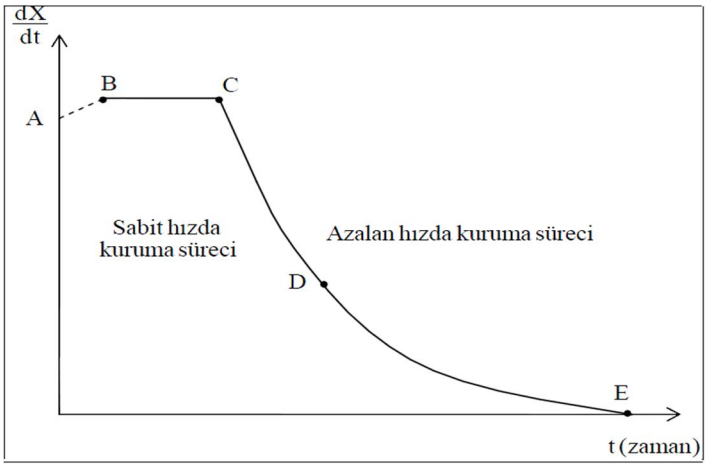
Tüm tekstil malzemeleri farklı yapısı örneğin, ısı yalıtımı, yumuşaklık, sıvı emme ve diğer dokunsal özellikleri gibi tekstil temel özelliklerinden bazılarına katkı sağlayan boşluk alanlara ya da gözeneklere sahiptir. Bu yapının kurutma süreci, boyut ve şekil açısından büyük karmaşıklık gösterir. Böyle muazzam bir karmaşıklık, malzeme taşıma olgusunu incelemek için gözenek boyutu dağılımı gibi içyapısal özelliklerini açıklayan istatistik veya olasılık yaklaşımları gerektirmektedir. Isı transferinin üç temel fiziksel mekanizması vardır bunlar, iletim, taşınım ve ışımadır. Isı taşınımı, sadece normal bir katı madde yüzeyi ile çevresindeki akışkan arasında veya iki akışkan arasında meydana gelir [7].

Termodinamik hesaplamalarda kullanılan bazı tekstil malzemelerin özgül ısı değerleri Tablo 1.1.'de verilmiştir. Hesaplamalarda akrilik elyafın özgül ısısı 1,3 $kJkg^{-1}K^{-1}$ olarak alınmıştır.

Tablo 1.1. Degişik tekstil malzemelerin özgül ısıları [7]

Elyaf	Özgül ısı (kJ $kg^{-1}K^{-1}$)
Pamuk	1,21
Rayon	1,26
Yün	1,36
İpek	1,38
Naylon 6	1,43
Polyester	1,34
Asbest	1,05
Cam	0,80

Kurutma işlemine tabi tutulan nemli bir malzemenin kuruma süreci Şekil 1.2.'de gösterilmektedir. Başlangıçta ani sıcaklık yükselmesinden dolayı kurutma hızının arttığı (AB) ve daha sonrasında belli bir zaman süresince sabit hızda kurutmanın devam ettiği görülür (BC). Bu mekanizma "Sabit Hızda Kuruma Süreci" olarak adlandırılmaktadır. Bu süreç, madde yüzeyinden buharlaşmayı sağlayacak miktarda nemin, iç kısımlardan madde yüzeyine transferi gerçekleştiği sürece devam eder. Madde yüzeyinin sıcaklığı, temas ettiği havanın yaş termometre sıcaklığına eşittir. Kuruma ilerledikçe katı içerisindeki nem miktarında devamlı olarak azalma meydana gelir. Yüzeyde ilk kuru noktanın görülmesi sabit kuruma hızı sürecinin sonunu belirler. Bu andaki nem içeriği (C) kritik nem olarak adlandırılır. Sabit kuruma hızı sürecini, buharlaşma hızının sürekli olarak değiştiği "Azalan Hızda Kuruma Süreci" (CD) takip eder. Bu kuruma hızını, katı maddenin iç gözenek yapısı ve içerisindeki nemin yüzeye akış modeli belirler [4].



Şekil 1.2. Kuruma hızının zamana göre değişimi [4]

Sabit hızda kuruma sürecinde hava akımının nemi, sıcaklığı ve hızı gibi dış etkenler belirleyici iken, azalan hızda kuruma sürecinde, malzeme yapısı ve içerisindeki nem ve enerji aktarımı gibi faktörler etkilidir. Suyun büyük bir kısmı sabit hızda kuruma sürecinde uzaklaştırılır. Fakat malzeme içerisindeki nemin istenen seviyeye kadar düşürülebilmesi için gerekli olan zaman azalan hızda kuruma sürecine bağlıdır [4].

1.2.1. İplikte bulunan nemin durumu

Bir tekstil ürünü, ağırlığının yaklaşık olarak %150-300'ü kadar su tutabilir. Suyun, tekstil ürünüyle arasındaki bağ durumuna göre, aşağıdaki ayrımlar yapılabilir.

a) Damlayan su: Liflere hiçbir şekilde bağlı olmayan bu su kısmı, kendi ağırlığının etkisiyle aşağıya doğru akar ve tekstil ürününün alt tarafından damlar.

b) Yüzey suyu: İpliklerin yüzeyine adezyon kuvvetleriyle bağlı olan bu suyun tamamı ön kurutma sırasında uzaklaştırılabilir.

c) Kapiler su: İpliklerin içerisinde liflerin yüzeyine adezyon kuvvetleriyle bağlı olan bu suyun ön kurutma sonucu ancak bir kısmı uzaklaştırılabilir.

d) Şişme suyu: Liflerin içerisinde miseller arasında bulunan bu şişme suyu liflerden ancak ısı enerjisi yardımıyla uzaklaştırılabilir.

e) Higroskopik su: Liflerin içerisinde miseller arasında bulunan bu su, kuru bir tekstil mamulünde bulunması gereken nemdir. Bu nedenle, iyi bir kurutmanın sonunda, bu su kısmının liflerde kalması sağlanmalıdır.

Tekstil mamullerinin kurutulmaları sırasında unutulmaması gereken önemli nokta, suyun ısı enerjisi yardımıyla uzaklaştırılmasının, mekanik kuvvetler yardımıyla uzaklaştırmaya nazaran çok daha pahalı olduğu konusudur. Kapiler suyunun diğer kısmı ile şişme suyu ısı enerjisi yoluyla uzaklaştırılabilmektedir [4].

1.2.2. Tekstilde nem tanımlamaları

Bir maddede bulunan nem miktarı, ya ıslak ağırlık esas alınarak ya da kuru ağırlık esas alınarak ifade edilebilir. Islak bazda nemlilik ($M_{ıb}$); nemli maddenin birim ağırlığındaki mevcut nem miktarıdır ve Denklem (1.1) ile ifade edilmiştir;

$$M_{ıb} = \frac{m_w - m_a}{m_w} \tag{1.1}$$

Kuru bazda nemlilik (M_{kb}); kuru maddenin birim ağırlığındaki mevcut nem miktarıdır.

$$M_{kb} = \frac{m_w - m_a}{m_a} \tag{1.2}$$

Burada, m_w: nemli maddenin ağırlığı, m_a: maddenin kuru ağırlığıdır.

Katı bir maddenin hava ile kurutulmasına dış şartların etkisini inceleyen çalışmalardan elde edilen deneysel bilgiler, sabit kurutma şartları altında katıya ait rutubet miktarının, zamanın bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuştur.

1.3. Endüstriyel Kurutma Sistemleri

Kurutma prosesi bilinen en eski yöntemtir. Sanayileşmiş dünyada, kurutma, kimyasal tarım, biyoteknoloji, polimer, seramik, ilaç, kağıt hamuru ve kağıt, mineral işleme ve ahşap endüstrisinde önemli bir işlemdir. Güneş enerjisi, ucuz, kolay ve kullanışlı olması nedeniyle dünyada kurutmanın en yaygın olarak uygulanan şeklidir [8]. Ancak güneşle kurutmada, hava şartına bağımlı olmak, kurutma sırasında yeterli kontrol eksikliği, uzun bir kurutma süresi, büyük yer gereksinimi gibi birçok sorunlar nedeniyle kurutma işleminde yeni teknoloji kullanımını gerektirir. Bu sorunlar endüstriyel kurutucular kullanılarak aşılabilir. Günümüzde, kurutucular farklı gıdalar ve endüstriyel malzemelerin korunması ve prosesi için sektörde önemli bir konuma sahiptir [9].

Isıl kurutma, ısı geçiş durumuna göre iletimle (kondüksiyon), ışınımla (radyasyon), yüksek frekansla ve taşınımla (konveksiyon) kurutma olmak üzere başlıca dört farklı biçimde gerçekleştirilmektedir.

İletimle kurutma: Ürünün, buhar veya kızgın yağ ile ısıtılmış silindir veya levhalarla teması sağlanarak ürün bünyesindeki suyun buharlaşması ile kurutma gerçekleşmektedir. İletimle kurutmanın en büyük dezavantajı, yüksek sıcaklıklarla çalışıldığında mamülün higroskobik neminin uzaklaştırılması riskinin bulunmasıdır.

Işınımla kurutma: Yüksek sıcaklıkta bulunan yüzeyden nemli tekstil malzemesine ısının elektromanyetik dalgalar şeklinde transferi ile gerçekleşen ışınımla kurutma

yönteminde, iki tarafında ışınlayıcıların olduğu dikey bir kanal içerisinden ürünün geçirilerek kurutulması sağlanmaktadır.

Yüksek frekansla kurutma: Bu kurutma yönteminde, tekstil malzemesine dışarıdan ısı transferi yapılmamaktadır. Yaş tekstil malzemesinin yüksek frekanslı alternatif akıma bağlı iki kondansatör levhası arasından geçirilmesi ile kurutma işlemi yapılmaktadır. Bunun sonucunda su moleküllerinin sürtünmeleri nedeniyle meydana gelen ısı, ürün üzerindeki suyun buharlaşmasını sağlamaktadır. Bu tip kurutucular, tekstil endüstrisinde gittikçe yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Taşınımla kurutma: Taşınımla kurutmanın prensibi ısıtılmış ve nem içeriği az olan havanın, kurutulacak nemli tekstil mamülü ile irtibatlandırılarak kurutulmasıdır. Nemli tekstil mamülünden havaya kütle transferinin gerçekleştiği taşınımla kurutma, özellikle hassas yüzeyli kumaşların kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kurutma esnasında iki süreç oluşur; sıcak gazdan, katı bünyesinden buharlaşan sıvıya doğru "ısı transferi" olayı ve katının iç kısımlarından dış yüzeyine doğru, sıvı ya da buhar olarak; dış yüzeyden sıcak gaz içine doğru ise sadece buhar olarak "kütle transferi" işlemleri gerçekleşmektedir. Bu işlemleri belirleyen koşullar aynı zamanda kurutma işlemini de belirleyen koşullardır.

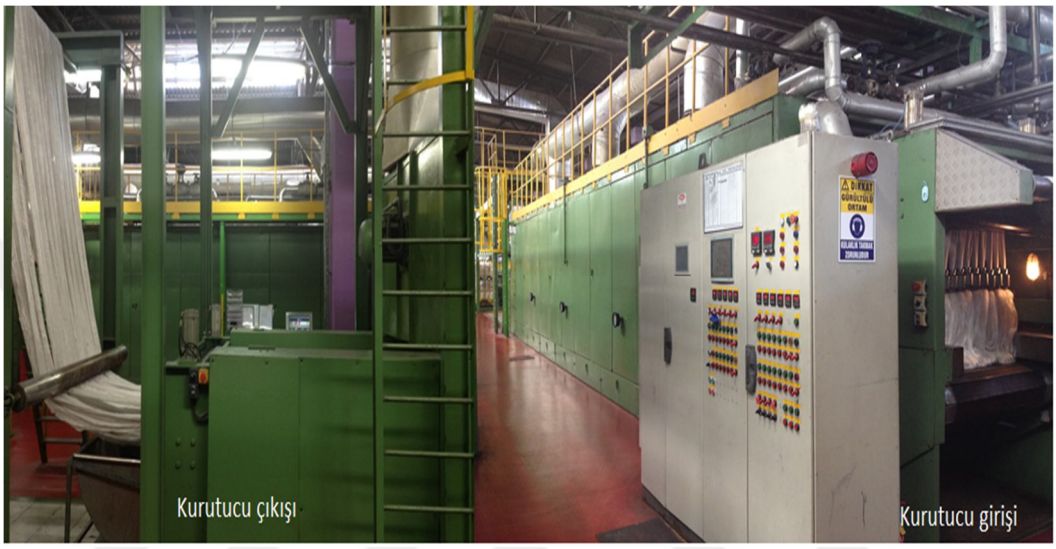
Projenin incelendiği üretim tesisinde taşınımla kurutma makinaları mevcuttur. Çoğunluk tekstil işletmelerinde kısaca RF kurutucu diye belirtilen frekanslı kurutma makinaları kullanılmaktadır. Fakat bu makinalar tek bant akrilik elyaf kurutması yapmaktadır. Sürekli boyama prosesinde 12 bant boyama ve kurutma prosesi mevcut olduğu için RF kurutuculardа randıman sağlanamamış ve ürünün kaliteli çıkartılması mümkün olmamıştır. Taşınımla kurutma makinalarının verimliliği arttırılarak kullanımı, kalite ve randıman açısından daha avantajlı görülmektedir.

1.4. Akrilik Elyaf Kurutma Makinaları

Bu proje kapsamında incelenen kurutma makinaları, konveksiyon kurutma prensibine göre çalışan taşıma bantlı kurutuculardır. Akrilik Tow bantları, sürekli boyama makinasında boyama işlemi için fular boyama, fikseleme, yıkama ve kurutma işlemlerinden geçmektedir. Kurutma işlemi, boyanan ıslak elyafın yıkama

sonrası ön kurutma denilen basınçlı merdanelerde iyice sıkıldıktan ve sıcak hava verilen nozullarla iyice açıldıktan sonra girdiği son işlemdir.

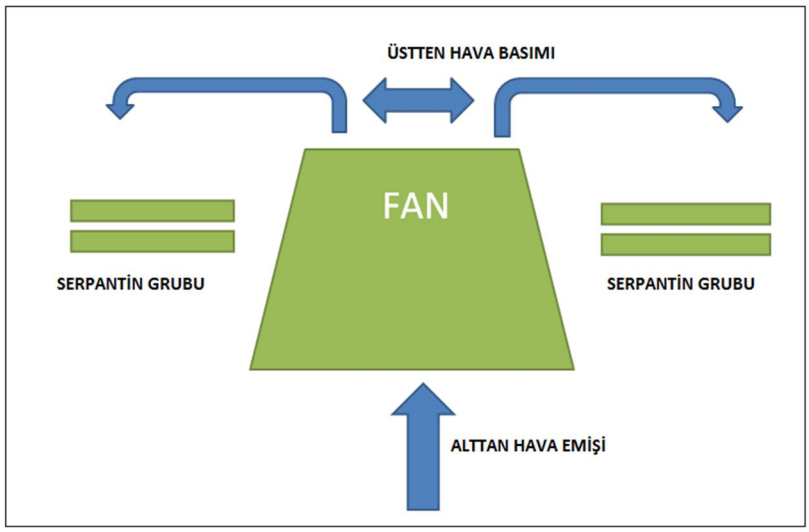
Kurutucu içerisine akrilik tow bantları 12 bant halinde yan yana serbest serilerek beslenmektedir (Şekil 1.3.). Tekstil mamulü kıvrımlı bir halde, raylar üzerinde dönen delikli taşıyıcı paletler üzerine yığılarak kurutucu boyunca taşınır.



Şekil 1.3. Tow kurutucusunun ön ve arkadan görünüşü

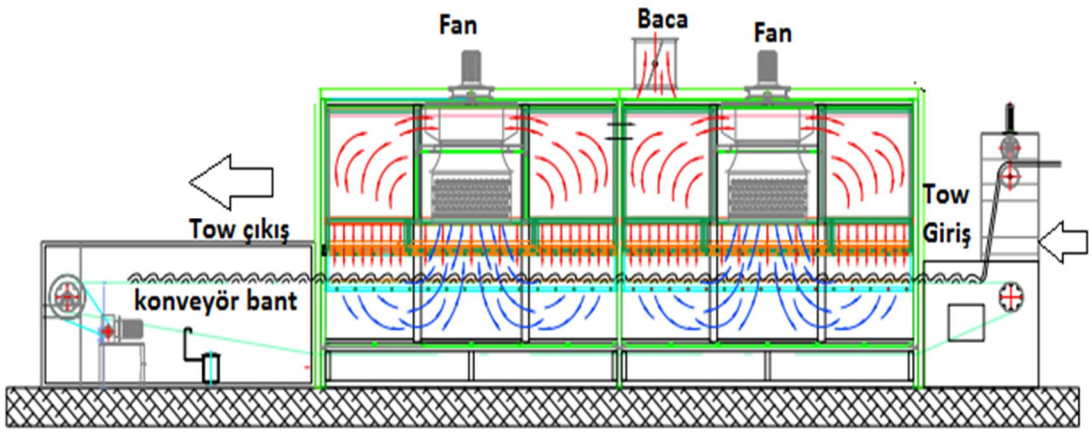
Buhar kazanından beslenen 21 bar basıncındaki buhar, buhar kolektöründe 8 bar basınç ve sıcaklıktaki buhara dönüştürülerek kurutma makinelerinde kullanılmaktadır. Kurutucuda, serpantinlerden geçen buhar vasıtasıyla ısıtılan ve dışardan alınan hava ile karıştırılarak elde edilen sıcak kurutma havası, fanlar ile palet üzerindeki tow üzerine basılır.

Kurutucu fırını, 4 bölümden oluşmaktadır. Kurutucu içersine buhar, herbir bölümde 2 grup halinde bulunan serpantinler içersinden geçirilmektedir. Kurutucunun her bir bölümünde bir tane fan olup toplamda 4 adet fan mevcuttur. Kurutucu çıkışında bir adet soğutma fanı vardır. Bölümler birbirine üstten fan bölgesindeki deliklerle bağlanır ve alt kısımda akrilik towun taşındığı kanal mevcuttur. Fanlar vasıtasıyla içerdeki havanın emilip basılması sağlanmaktadır. Şekil 1.4.'de fanın havayı yönlendirme şekli gösterilmektedir. Fırın içersindeki hava, istenilen sıcaklık değerine set edilmektedir.



Şekil 1.4. Kurutucu içersinde fanın havayı yönlendirme şekli

Kurutucu içinde oluşan nemli hava, kurutucunun üzerinde bulunan bacalar vasıtasıyla dışarıya atılmaktadır. Çevreden alınan taze hava, kurutulan malzemeden nem alarak kurutucu dışına çıkarken, çevreden tekrar yeni taze hava emilip ısıtılarak kurutucuya verilir. Dışarıya atılan havanın miktarı, baca içersindeki klapeler vasıtasıyla ayarlanmaktadır. Elyaf kurutma prosesi ve kurutucu şematik olarak Şekil 1.5.'de gösterilmiştir. Şekilde fanın havayı emmesi mavi, havayı basması kırmızı çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Akrilik tow kurutucusunun çalışma prensibi

1.4.1. Serpantinlerde kurutmayı etkileyen faktörler

Isıtma yüzeyi: Isıtma serpantinin yüzeyine "ısıtma yüzeyi" denir. Buhardan, ısıtılacak maddeye ısı aktarımını sağlamak için ısıtma yüzeyinin her metrekaresini çok iyi değerlendirmek gerekir. Buhardan ısıtılacak maddeye iletilen toplam ısı

miktarını belirleyen üç etkenden biri ısı geçişini sağlayan yüzeydir. Buhar ile ısıtılacak yüzeyin sıcaklık farkı ikinci etkendir. Toplam ısı akışına etki eden üçüncü etken ısı taşınım katsayısıdır.

Isı geçişine mani olan maddeler: Isı transferi yüzeylerinin iç ve dış kısımlarında pas, kir, su damlaları meydana gelebilir veya kazandan katı partiküller gelebilir. Yoğuşma, su damlacıkları veya ani bir su filmini getirebilir. İnce bir su filmi bile kayda değer bir direnç gösterir. Isı transferi yüzeylerinde katılaşan tabakaların devamlı temizlenmesi ile ısı geçişine olan direnç bir ölçüde giderilecektir.

1.4.2. Kurutucularda kurutma havası kullanımı

Hava akımından yararlanılarak yapılan kurutma işlemlerinde hava, kurutulacak malzeme ile karşılaştığında, daha yüksek sıcaklıkta olduğu için malzemeye ısı transferi sağlar. Havadan malzemeye geçen ısı, suyun buharlaşması için buharlaşma gizli ısısı olarak kullanılır. Kurutucularda, malzemenin kuruma sırasındaki yüzey sıcaklığı tam olarak bilinmemekle birlikte, havanın yaş termometre sıcaklığında olduğu kabul edilir. Bu durumda, malzemedeki su, havanın yaş termometre sıcaklığında buharlaşacaktır. Kuruma havasının kurutucu içinden geçerken uğradığı durum değişmeleri, psikrometrik diyagramdan yeterli bir hassasiyette bulunabilir.

Bu çalışmada yer alan ölçümler ve analizlerde psikrometrik diyagramdan yararlanılmıştır. Kurutucuda dolaşım havasının kullanımı için bacalara takılan klapeler vasıtasıyla dışarı atılan havanın miktarı değiştirilebilmektedir. Hava miktarının ayarlanması malzemenin kurutma verimliliği ve kalitesi üzerinde de önemli bir etkisi vardır.

2. LİTERATÜRDE KURUTMA PROSESLERİ İÇİN YAPILAN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ ARAŞTIRMALARI

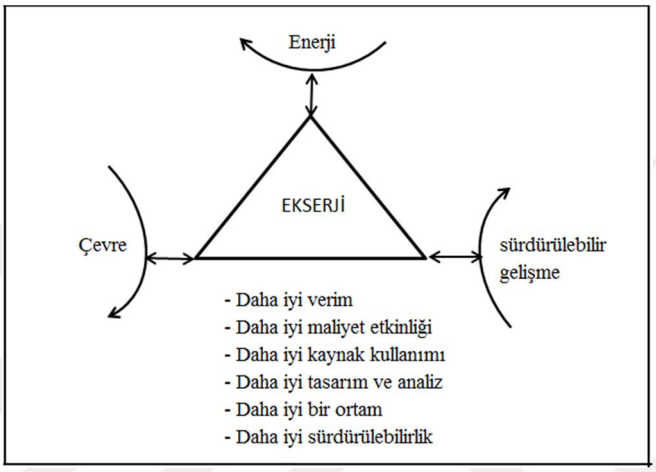
Tez konusu kapsamında bu bölümde, literatür taraması yapılarak kurutma prosesinde enerji ve ekserji analizleri çalışmalarının faydaları ve sonuçlarına bakılmıştır.

Kurutma, buharlaşma yüksek gizli ısısı ve kurutma ortamı olarak en sık uygulanan sıcak hava kullanılmasının doğasında verimsizliği nedeniyle en enerji yoğun bir endüstriyel prosesdir. Kurutma prosesi, büyük miktarlarda enerji tüketir ve çevreye önemli miktarda karbondioksit salan prosesdir. Bu durumda, kurutma teknolojisinin önemli konulardan biri, kurutulan ürünlerin kalitesini ve kurutma tesisleri etkinliğini geliştirmek için enerji maliyetini azaltmaktır. Öte yandan, daha düşük maliyet ve daha yüksek verim için enerji yoğun sisteminin tasarımı, sürdürülebilir gelişme için gerekli yaklaşımlardan biridir. Enerji analizi, çeşitli enerji dönüşüm süreçlerini tahmin etmek için temel ve geleneksel bir yaklaşımdır [9].

Termodinamik, bir türden diğer türe enerjinin dönüşümünde sistemler için davranış, performans ve verimlilik tanımlanmasına olanak verir. Konveksiyonel termodinamik analizler, öncelikle termodinamiğin birinci kanununa dayanır. Enerji dönüşüm sisteminin enerji analizi, esasen giren ve çıkan enerjinin muhasebesidir. Verimlilik, enerji miktarının oranları olarak değerlendirilir ve sık sık çeşitli sistemleri karşılaştırmak ve belirlemek için kullanılır. Ancak, enerji verimliliği sistemin ideale yaklaşma performansını belirlemeye her zaman yeterli olmaz. Sistem içinde meydana gelen termodinamik kayıplar, enerji analizi ile tanımlanamaz [10]. Enerji analizi, enerjinin korunumu ilkesini ifade eden termodinamiğin birinci yasasına dayanmaktadır. Ancak bu termodinamik süreçlerin tersinmezlik yönleri hakkında hiçbir bilgi vermez.

Enerji analizi eksiklikleri nedeniyle, sistemlerin ve süreçlerin daha gerçekçi bir görünümünü sağlayan ekserji analizi, mühendislik değerlendirmeleri için daha güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Ekserji, tersinir işlemler vasıtasıyla doğal çevrenin

denge durumuna getirildiğinde kütle, ısı veya iş akışından elde edilebilen azami iş miktarı potansiyelinin ölçüsüdür. Ekserji analizleri, iyileştirmeler için yeni fikirler verebilir ve süreçleri değerlendirme ve optimizasyon amaçlı uygulanabilir. Kurutma sistemlerinin ekserji analizinin amacı, en uygun kurutma parametrelerini belirlemek, kurutma sistemlerinin çevresel etkisini azaltmak, verimsizlik kaynaklarını belirlemek, sürecin net bir görüntüsünü elde etmektir. Ekserji ve enerji arasındaki bağıntılar ve çevresel etki bir üçgen olarak Şekil 2.1.'de açıklanmıştır [11].



Şekil 2.1. Ekserjinin üçgeni [11]

Ekserji verimliliğini artırmak, çevreye etkisini azaltır ve sürdürülebilirliği artırır [11]. Mujumdar'a göre [8] kurutma makineleri, imalat işlemlerinde kullanılan toplam enerjinin (ortalama %12) lik gibi önemli bir kısmını kullanır. Şu anda, kurutma teknolojisindeki eğilim, daha düşük enerji tüketimi ve ekserji ve ekonomi kavramları birleştirilerek yani eksergoekonomik yöntemi kullanılarak, ürünlerin kaliteli üretilmesi için hem cihazların optimum boyutlandırılması ve hem de optimum enerji tüketilmesini sağlayan tasarımlar yapmaktır.

Kurutma sistemlerinin enerji ve ekserji analizi, literatürde yayınlanan çalışmalara dayalı farklı kategorilerde sınıflandırılır: Toplu veya tepsi kurutma, sürekli veya endüstriyel kurutma, ısı pompası destekli kurutma sistemleri, akışkan yataklı kurutma, güneş enerjili kurutma, sprey kurutma, dondurarak kurutma, vakumlu kurutma ve flaş kurutma. Genellikle bu sistemler gıda ürünleri, ahşap yığınları, kağıt kurutulması, tekstil ürünleri içindir. Birçok araştırmacılar farklı kurutma sistemleri kullanarak ürünlerin kurutulmasında pek çok enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Bunlardan biri Ndubisi A. ve arkadaşları [12] tarafından bir tepsi kurutucusunda doğal nişasta kurutulmasında enerji ve ekserji analizi için, enerji kullanım oranı, enerji verimliliği, ekserji girişi ve çıkışı, ekserji kaybı ve yorumlama ile ilgili verimlilik açısından sistemin performansını değerlendirmek için yapılmıştır.

S. Syahrul ve arkadaşlarının [13] çalışmasında, mısır ürünü için elde edilen literatür değerleri, deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Proses ısı verimliliği üzerine malzemenin iç nem içeriği ve hava hızı, hava sıcaklığı etkilerini incelemek için parametrik araştırma yapılmıştır. Malzemeden nem transferi, hava sıcaklığı, hava hızı ve malzemenin içeriğindeki nem değerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

I. Dinçer ve A.Z. Şahin [14] çalışmalarında, kurutma prosesinde ekserji açısından termodinamik analiz için yeni bir model sunmuşlardır. Ekserji verimliliğini, ısı ve kütle transferi parametrelerinin fonsiyonu olarak elde etmişlerdir. Mevcut modeli doğrulamak ve farklı proseslere modelin uygulanabilirliğini göstermek için örnek uygulama yapılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, kurutma proseslerinin termodinamik değerlendirmelerinde ekserji analizinin sadece yararlılığını göstermek için değil, onların performans ve verimliliği hakkında bilgi sağlamak için de kullanılmıştır.

Proje ile bağlantılı olarak sürekli kurutucular için literatürde yapılan çalışmalardan biri Holmberg ve Ahtila tarafından biyoyakıt kurutulması üzerine bir çalışma olup, enerji ve ekserji analizi için parametre olan tersinmezlik oranını kullanmışlardır. Tersinmezlik oranı, ısı kaynağının sıcaklığına bağlıdır. Tersinmezlik oranı değerini azaltmak için daha düşük uygulanabilir kurutma sıcaklığı ve küçük sıcaklık farkları ile çalışılmasını önermişlerdir [15].

Özgener tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel makarna kurutma sisteminde kurutucu duvarlarından hava kaçakları nedeniyle ısı kaybı, toplam ekserji kaybında en önemli bileşen olmuştur. Kurutma odaları yalıtımının iyileştirilmesi ve egzost havası enerjisinin geri kazanımı, kurutma prosesini geliştirmek için çözüm olarak önerilmiştir [16].

Mançuhan tarafından yapılan çalışmada, yaş tuğla kurutulan bir tünel kurutucudan alınan ölçüm değerleri kullanılarak toplam enerji girdisi, ekserji verimi ve ekserji

kaybı hesaplanmıştır. Tünel kurutucunun ekserji verimi %47,3 olarak belirlenmiştir [17].

Coskun ve arkadaşları tarafından, bir endüstriyel talaş kurutma prosesi için bir ısı eşanjörünün kullanılması ile ekserji verimliliğinin önemli ölçüde arttırıldığı rapor edilmiştir [18].

Kurutma koşullarının ürün kalitesine etkisinin araştırıldığı çalışmada, Yang-mei Chen ve arkadaşları, buğday samanı lif özelliklerinin etkilendiğini, kurutma sıcaklığı veya süresinin artışı ile selülozun kristalliği ve laktonların içeriğinin arttığı ve lifin su tutma değerinin azaldığını belirlemişlerdir [19].

Çay ve arkadaşları tarafından bir tekstil terbiye fabrikasında Ram kurutucusunda Tekstil ürünlerinin gerçek operasyonel verilere dayalı enerji ve ekserji performansı incelenmiştir. Sistemin toplam ekserji verimliliği %34,4 saptanmış iken, Ram ve kızgın yağ kazanı ekserji verimliliği; sırasıyla %28,7 ve %34,7 olarak bulunmuştur. Giriş ekserjinin önemli bir kısmının Ramların nemli egzost hava yoluyla çevreye atıldığı belirtilmiştir. Egzost havasının nem oranı, kurutma işleminin ekserji verimliliğini artırmak için yükseltilmelidir [20].

Çay ve arkadaşları tarafından bir Ram ve konveyör bant kurutucu içeren endüstriyel tekstil kurutucusunun egzost nem oranının bir fonksiyonu olarak Ekserji analizini gerçekleştirmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Deneysel kullanılan kurutucu sıcaklığı T=150-160 °C dir. Sonuç olarak, ram ve konveyör bant kurutucusunun ekserji verimliliği; 0,1 (kg su / kg kuru hava) olan egzost özgül nemi için, %13,7 ve %14,3 olarak bulunmuştur. Ekserji verimliliği, hem ram hem de konveyör bant makinesi için egzost havası nem oranının artması ile artarken buna bağlı olarak ekserji yıkımı da azalmıştır. Aynı zamanda ölü hal şartlarının seçimi, ekserji performans hesaplamalarında önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır [21].

Çay ve arkadaşları tarafından, Ramlarda taşınım ile kurutmada, ekserji analizi için yeni bir model sunmak ve her bölümü için ekserji parametrelerinin değişimlerini incelemek amacıyla farklı bir çalışmaları mevcuttur. Deneysel değişkenler; kurutma sıcaklığı T=150 °C, farklı kurutma odaları (Altı bölümlü) ve doğrudan gaz ısıtmalı ve sıcak yağ ısıtmalı ramlardır. Sonuç: Doğrudan gaz ısıtmalı her odanın ekserji

verimliliği değerleri, sırasıyla 10,9-14,9-15,3-12,2-9,8-5,3 olarak hesaplanmıştır. Ramların her bölmesi için ekserji parametrelerin varyasyonları yanı sıra, son odası için ekserji verimliliği düşük nem buharlaşması nedeniyle önemli ölçüde azalmış olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, kızgın yağ ısıtmalı kazanları daha yüksek sıcaklıkta çalıştığı için toplam ekserji yıkımı oranı, direkt gaz ısıtmalıya göre daha yüksektir [22].

Çay ve arkadaşları tarafından, Ram verimliliği ve ekserji yıkımı üzerine kurutma havasının sıcaklığı, kumaş çıkışının nem içeriği ve egzost havası nem oranı etkilerini araştırmak amacıyla başka bir çalışma yapmışlardır. Deneysel değişkenler; kurutma sıcaklığı T=120-170 °C, kumaş nem içeriği, kurutma odası (altı odalı), egzost havası nem oranı ve doğrudan gaz ısıtmalı ve sıcak yağ ısıtmalı ramlardır. Sonuç olarak; doğrudan gaz ısıtmalı ramlar ve sıcak yağ ısıtmalı ramların ekserji verimleri, incelenen kurutma şartlarında sırasıyla, %8,5'dan %17,5'a ve %6,8'den %14,0'e değiştiği görülmüştür. Egzost havasının artan nem oranı, ekserji yıkım oranında bir azalmaya yol açar. Artan kurutma sıcaklığı, yakıt tüketimini artırarak düşük ekserji verimliliğinden sorumludur [23].

Kurutucudan dışarıya atılan egzost havasının tekrar kullanımı, ısı geri kazanım sistemi (ısı değiştirici, ısı pompası, vb.), aşırı kurutmadan kaçınmak, elektromanyetik dalga enerjisi uygulamak, kurutulan malzemeye ön işlem, çevreye ısı kaybını önlemek için kurutma bölmelerinin yalıtım sistemleri kullanmak vb. kurutma işleminin ekserji verimliliğini artırmak için yollar olarak kullanılabildiği görülmüştür.

Akrilik tow kurutucusunun enerji ve ekserji analizleri konusunda literatür araştırması sonucu herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Bu tez çalışmasında, tow kurutucusunun mevcut termodinamik performansı elde edilerek, kurutucunun enerji tasarruf potansiyeli noktaları belirlenip, bu tasarruf ve iyileştirme yöntemleri uygulanarak elde edilen yeni durum için termodinamik analiz yapılarak sonuçlar mevcut durum ile karşılaştırılacaktır.

3. KURUTUCUNUN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Tez konusu kapsamında bu bölümde, tow kurutucusunun kurutma prosesinin enerji ve ekserji analizlerinin nasıl yapıldığı açıklanmıştır.

3.1. Akrilik Kurutma Prosesinde Kütle Dengesi ve Termodinamiğin I. Kanunu Analizi

Bu bölümde, bir Akrilik Tow kurutucusunun çalışır durumda üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla, kurutucu için kütle korunumu, enerji dengesi kontrol edilerek termodinamiğin 1. kanununa göre analizi yapılmıştır.

3.1.1. Kütle dengesi

Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez. Kütlenin korunumu ilkesi uyarınca kontrol hacmine giren toplam kütle, kontrol hacminden çıkan toplam kütleye eşittir. Çoklu girişi ve çıkışı olan sürekli akış olan sistemde kütle korunumu ilkesi Denklem (3.1)'de yazıldığı gibidir [24];

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \tag{3.1}$$

Kurutma işlemlerinin analizi için giriş ve çıkış şartları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

1. Ürünleri kurutmak için kurutma bölmesine kurutma havası girişi,
2. Ürünlerden uzaklaştırılan veya buharlaşan nemi içeren nemli havanın çıkışı.
3. Fırın içinde kurutulacak nemli ürünlerin girişi.
4. İstenen düzeye indirgenmiş nem içeriğine sahip kuru ürün çıkışı.
5-6. Ürünü taşıyan taşıyıcı paletlerin girişi ve çıkışı.
7. Kurutma prosesi için buhar girişi.
8. Kondens çıkışı.

Şekil 3.1.'de tow kurutucusunun kütle ve enerji akış hatları ve diğer enerji akışı detaylı bir şekilde verilmiştir. Kurutucu için;

Hava dengesi;

$$\dot{m}_{h1} = \dot{m}_{h2} = \dot{m}_{h} \tag{3.2}$$

Ürün (Akrilik elyaf) dengesi;

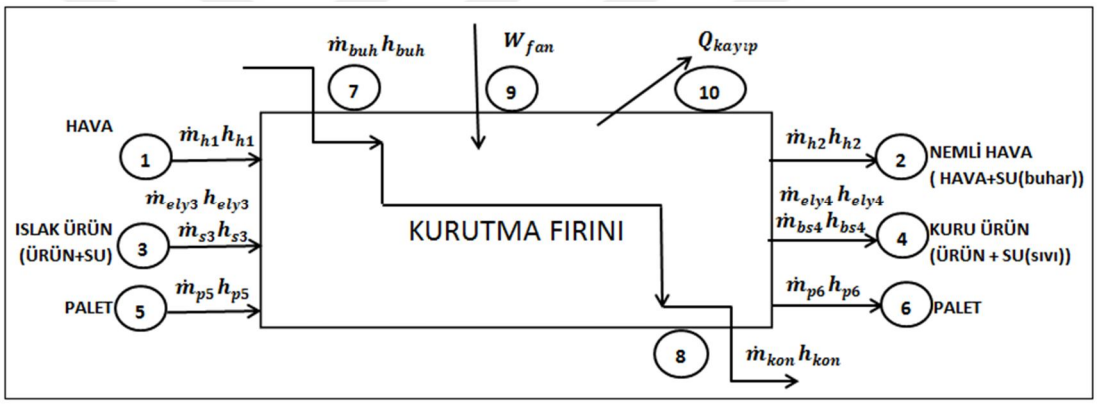
$$\dot{m}_{ely3} = \dot{m}_{ely4} = \dot{m}_{ely} \tag{3.3}$$

Su dengesi;

$$\omega_1 \dot{m}_{h1} + \dot{m}_{s3} = \omega_2 \dot{m}_{h2} + \dot{m}_{bs4} \tag{3.4}$$

Palet dengesi;

$$\dot{m}_{p5} = \dot{m}_{p6} = \dot{m}_{p} \tag{3.5}$$



Şekil 3.1. Kurutucunun kütle ve enerji dengesi şematik görüntüsü

3.1.2. Akrilik tow kurutma proses parametreleri

Kurutucunun termodinamik analizlerinin yapılabilmesi için giren ve çıkan malzemelerin proses parametreleri belirlenmiştir.

• Kurutucuya towlar 12 bant olarak herbir bant 98 gr/m. olarak beslenmektedir. Kurutucu bant hızı 3,0 m/dak. olup bantlar palet üzerine yığılmaktadır.

• Akrilik elyaf yaklaşık 35 °C'de kütlesel %32 neme sahip kurutucu ön ısıtma (nozul) bölgesine beslenir.

• Kurutucunun girişinde bulunan nozullardan sonra, elyaf kütlesel %30 neme sahip olarak kurutucu içersine girer. Akrilik tow, yaklaşık 65 °C sıcaklıkta %1 neme sahip

kuru tow olarak kurutucudan çıkmaktadır. Towun kuru ve ıslak halde ağırlıkları ölçülerek kütlesel nem değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 3.2.'de verilmiştir.

• Bir kurutucu pilot makine seçilerek baca gazından atılan havanın proses değerleri ölçülmüştür. Bunun için KIMO AMI 300 portatif test ölçüm cihazı ile havanın debi (m^3/h), hız (m/s), bağıl nem (%) ve kuru termometre sıcaklık (^oC) değerleri ölçülmüştür. Bu değerler mayıs-eylül 2015 dönemine ait değerlerdir. Öncelikle yapılan ölçümlerde bacanın dirsekten 1 m. mesafede ölçüm noktası belirlenmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri alınmıştır. Kurutucunun bacasından atılan havanın ölçümleri Tablo 3.1. ve 3.2.'de verilmiştir. Bu ölçüm verileri kullanılarak psikrometrik diyagramdan özgül nem ve özgül hacim değerleri bulunmuştur. Buna göre kütlesel debileri hesaplanmıştır.

• Pilot kurutucu makinasında yer alan buhar tüketimlerinin alındığı ve hergün takibinin yapıldığı sayaç değiştirilmiş ve kompanzasyonlu (sıcaklık ve basınca ayarlı) sayaç, kalibrasyonu yapılarak takılmıştır. Her gün üretime göre günlük tüketim değerleri takip edilmiştir.

Tablo 3.1. Baca gazı ölçüm değerleri

	1. Baca Tahliye	2. Baca Tahliye	3. Baca Tahliye
Debi (ṁ) (m^3/h)	2.080	3.850	840
Hız (V) (m/s)	4	7,16	1,8
Sıcaklık (T) (˚C)	105	115	60
Bağıl nem (%)	13	7	10

Tablo 3.2. Kurutucuda kütle akış durumu

	KURUTUCU KABİNDE KÜTLE AKIŞI	Kütle debisi (kg / h)
$\dot{m}_{ely}$	Akrilik elyaf ürün	635
$\dot{m}_{p}$	Taşıyıcı paletler	6.780
$\dot{m}_{h}$	Hava	5.420
$\dot{m}_{s}$	Elyaf ile gelen su	190
$\dot{m}_{ss}$	Elyaftan çıkan serbest su	180
$\dot{m}_{bs}$	Elyafa bağlı su	10
$\dot{m}_{buh}$	Buhar tüketimi	750

3.1.3. Psikrometrik diyagramın kurutmada kullanımı

Kurutucunun termodinamik hesaplamalarında psikrometrik diyagramdan yararlanılmıştır. Kurutma için gerekli olan terimlerin tanımları aşağıdadır.

Kuru termometre sıcaklığı (T_{kuru}): Normal bir termometre (yani haznesinin etrafı kuru olup hava ile temas halinde olan termometre) ile ölçülen hava sıcaklığına denir.

Yaş termometre sıcaklığı ($T_{yaş}$): Yaş termometre sıcaklığını ölçmek için termometrenin sıcaklığı algılayan kısmının ıslak olması ve üzerinden havanın belirli bir hızla akıtılması gerekir. Yaş termometre sıcaklığı, havanın içerdiği nem miktarı hakkında bilgi verir. Bu nem miktarı, bağıl nem (φ) veya özgül nem (ω) şeklinde ifade edilebilir [25].

Özgül nem (ω) ve Bağıl nem (φ): Özgül nem, birim miktardaki kuru havada bulunan nem miktarına denir. Bağıl nem, sabit sıcalıkta, nemli hava içersindeki su buharı kısmi basıncının doymuş durumdaki kısmi basıncına oranına denir. Özgül nem Denklem (3.6) ve Bağıl nem Denklem (3.7) ile tanımlanır;

$$\omega = \frac{m_b}{m_{khava}} \tag{3.6}$$

$$\varphi = \left(\frac{P_b}{P_d}\right)_{T\ =\ sbt} \tag{3.7}$$

m_b : Nemli hava içindeki su buharının kütlesi,
m_{khava} : Nemli hava içindeki kuru havanın kütlesi.

Özgül hacim: Islak havanın hacminin, havanın ağırlığına oranına denir (m^3/ kg).

Duyulur ısı: Herhangi bir cismin sıcaklığını yükseltmek için verilen ısı miktarıdır. Havanın nem miktarını değiştirmeden sıcaklığını değiştiren ısıya duyulur ısı denir. Bir sisteme ısı verildiğinde sıcaklık artışını termometre ile ölçmek mümkün oluyorsa duyulur ısı artıyor denir.

Gizli ısı: Herhangi bir cismin sıcaklığı değişmeksizin faz durumunu değiştirmek için verilen veya alınan ısı miktarına gizli ısı denir.

Psikrometrik diyagram: Psikrometrik diyagramlar, kuru termometre sıcaklığı, yaş termometre sıcaklığı, bağıl nem, özgül nem ve entalpi arasındaki ilişkinin grafiksel olarak verildiği diyagramlardır [25].

3.1.4. Termodinamiğin 1. kanunu

Enerji, termodinamiğin temel bir kavramıdır ve mühendislik analizinin en önemli yönlerinden biridir. Enerji, bir formdan başka bir forma dönüştürülebilir ve sistemler arasında transfer edilebilir [26].

Termodinamiğin 1. kanunu veya enerjinin korunumu ilkesi enerjinin var veya yok edilemeyeceğini ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini vurgular. İncelenen sistem, sınırlarından kütle geçişi olduğu için bir kontrol hacmi veya açık sistem şeklinde değerlendirilir.

Birim kütle için toplam enerji;

$$e = u + ke + pe = u + \frac{v^2}{2} + gz \tag{3.8}$$

Denklem (3.8) şeklinde yazılabilir, bu denklemdeki enerjiler ise özgül iç enerji u, özgül kinetik enerji ($v^2/2$) ve özgül potansiyel enerji gz şeklinde ifade edilir.

Kütlenin kontrol hacmine girebilmesi ve kontrol hacminden çıkabilmesi için bir iş yapılması gerekir. Bu iş akış enerjisi diye bilinir;

$$w_{akış} = pv \tag{3.9}$$

İç enerji u, basınç p ve özgül hacim v ile ilgili bir özellik olarak tanımlanan entalpi;

$$h = u + pv \tag{3.10}$$

Denklem (3.10) ile hesaplanır [27].

Sürekli akışlı ve sürekli açık sistem için termodinamiğin I. kanunu, Denklem (3.11) şeklinde yazılır ve kinetik ve potansiyel enerjilerindeki değişimler genellikle ihmal edilecek düzeydedir.

$$Q - W = \sum_{ç} m\left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{g} m\left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3.11)$$

Q ile gösterilen miktar, proses esnasında sisteme aktarılan enerji miktarıdır. Bu tür bir enerji transferi, sadece sistem ve çevresi arasında bir sıcaklık farkının bir sonucu olarak ortaya çıkar ve sadece sıcaklığın azalması yönünde meydana gelir. Enerji transferinin bu anlamı ısı ile enerji transferi olarak adlandırılır.

W ve Q miktarları, enerji transferinin miktarlarıdır. İş ve ısı terimleri enerji transferinde farklı anlamları ifade eder. İş ve ısı sisteme ait özellikler değildir [26].

3.1.5. Kurutucunun belirli noktalarındaki entalpilerin hesaplanması

1-2- Nemli havanın entalpi denklemi;

Kurutma havası olarak kullanılan ve sisteme T_{h1} sıcaklığında giren ve T_{h2} sıcaklığında çıkan (bacadan atılan) havanın entalpileri Denklem (3.12) kullanılarak hesaplanır. c_p değeri her iki sıcaklığın ortalama değerindeki özgül ısıdır.

$$h_h = c_{ph}\left(T - T_0\right) + \omega\left(c_{pbuh}\left(T - T_0\right) + 2.501{,}6\right) \quad (3.12)$$

Referans sıcaklık, T_0=25 °C alınmıştır. Ölçülen sıcaklık değerlerinde özgül ısı c_{ph} ve c_{pbuh} değerleri termodinamik tablodan ve özgül nem (ω) değerleri psikrometrik diyagramdan alınmıştır.

Tablo 3.3. Kurutucuda kullanılan nemli havanın entalpi değerleri

Kurutucu Nemli havası	Kütle denge no	T °C	c_{ph} kJ/(kg-K)	c_{pbuh} kJ/(kg-K)	ω kg H_2O/kg kuru hava	h_h kJ/kg
Dışarıdan alınan hava	1	25	1,005	1,87	0,013	32,5
1. Bacadan atılan Hava	2	105	1,01	1,88	0,114	383,1
2. Bacadan atılan Hava	2	115	1,013	1,89	0,082	311,1
3. Bacadan atılan Hava	2	60	1,007	1,875	0,0124	67,1

Akrilik elyaf, taşıyıcı paletler, tow ve serbest veya bağlı suyu için entalpi Denklem (3.13) ile elde edilir; c_p değeri her iki sıcaklığın ortalama değerindeki özgül ısıdır.

$$h_i = c_p \, \Delta T_i \tag{3.13}$$

$$\Delta T_i = T_i - T_0 \tag{3.14}$$

3- Akrilik elyaf :

Akrilik tow 35 °C sıcaklıkta girmekte ve 65 ºC sıcaklıkta çıkmaktadır.

Giren akrilik elyaf özgül entalpisi :

$$h_{ely3} = c_{pely} \, \Delta T_{ely3} = 1{,}3\,(308 - 298) = 13 \text{ kJ/kg}$$

Çıkan akrilik elyaf özgül entalpisi :

$$h_{ely4} = c_{pely} \, \Delta T_{ely4} = 1{,}3\,(338 - 298) = 52 \text{ kJ/kg}$$

4- Su :

Elyafla birlikte taşınan su, 35 °C sıcaklıkta girmekte ve 65 ºC sıcaklıkta çıkmaktadır.

Giren akrilik elyaf ile taşınan suyun özgül entalpisi :

$$h_{s3} = c_{ps} \, \Delta T_{s3} = 4{,}18\,(308 - 298) = 41{,}8 \text{ kJ/kg}$$

Çıkan akrilik elyaf ile taşınan suyun özgül entalpisi :

$$h_{bs4} = c_{ps} \, \Delta T_{bs4} = 4{,}18\,(338 - 298) = 167{,}2 \text{ kJ/kg}$$

5- Palet :

Kurutucu içersine paletler 44 °C sıcaklıkta girmekte ve 65 ºC sıcaklıkta çıkmaktadır.

Giren paletlerin özgül entalpisi :

$$h_{p5} = c_{pp} \, \Delta T_{p5} = 0{,}46\ (317 - 298) = 8{,}7 \text{ kJ/kg}$$

Çıkan paletlerin özgül entalpisi :

$h_{p6} = c_{pp}\ \Delta T_{p6} = 0{,}46\ (338 - 298) = 18{,}4$ kJ/kg

7- Kurutucu içersine verilen buharın entalpisi :

7,8 barda buharın ölçülen sıcaklığı 200-210 °C'dir. Buharın kızgın buhar entalpisi, termodinamik tablodan [29] bulunur;

$h_{buh} = 2.850{,}0$ kJ/kg

8- Kurutucudan çıkan kondensin entalpisi :

Kurutucu serpantinlerinden geçerek çıkan kondens suyunun sıcaklığı 100 °C'dir. Kondensin entalpisi, termodinamik tablodan [29] bulunur;

$h_{kon} = 419{,}0$ kJ/kg

9- Fanlar :

Fanlardan gelen enerji: (W_{fan}). Kurutucu içindeki fanlar, 11 kW kurulu güce sahip olup %95-90 kapasite ile çalıştırıldığı zaman çektiği akım değerleri (I) ölçülmüştür. Bu değerler vasıtasıyla çekilen güç, Denklem (3.15) yardımıyla hesaplanır;

$$P = U \cdot I \cdot \cos\phi \qquad (3.15)$$

(Şebeke gerilimi U=380 volt, Cihazın güç faktörü $\cos\phi = 0{,}96$ olarak alınmıştır.) Bu ölçülen akım değerlerine göre fiili güç Tablo 3.4.'de belirtilmişitir.

Tablo 3.4. Fanların güç değerleri

Techizat Adı	Çalışma Kapasitesi	Kurulu güç (Kw)	Ölçülen fiili güç (Kw)
Kurutucu Fan 1	95%	11	10,1
Kurutucu Fan 2	95%	11	10,15
Kurutucu Fan 3	90%	11	9,3
Kurutucu Fan 4	90%	11	9,3
Soğutucu Fan	60%	5,5	2,8

Toplam fiili güç = (W_{fan}) = 41,65 kW = 149.940 kJ/h

3.1.6. Tow kurutucusu için enerji dengesi

Yaş tow kurutulan bir kurutucuda kütle ve enerji dengesi için varsayımlar:

• Sistemde sürekli akışlı olup, herhangi bir noktada zamana bağlı değişim yoktur.

• Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

• Sistemin çevreyle olan ısı alışverişi ihmal edilmiştir.

• Referans Sıcaklığı 25 °C, basınç 101,325 kPa kabul edilmiştir.

Bu sistem için genel enerji korunumu Şekil 3.1.'e göre Denklem (3.16) ve (3.17) gibi yazılabilir;

$$\sum \dot{m}_g h_g + \dot{W}_{fan} + \dot{Q}_{buh} = \sum \dot{m}_ç h_ç + \dot{Q}_{kon} + \dot{Q}_{kayip} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned} &\left(\dot{m}_{h1} h_{h1} + \dot{m}_{ely3} h_{ely3} + \dot{m}_{s3} h_{s3} + \dot{m}_{p5} h_{p5}\right)_g + \dot{Q}_{buh7} + \dot{W}_{fan9} = \\ &\left(\dot{m}_{h2} h_{h2} + \dot{m}_{ely4} h_{ely4} + \dot{m}_{bs4} h_{bs4} + \dot{m}_{p6} h_{p6}\right)_ç + \dot{Q}_{kon8} + \dot{Q}_{kayip} \end{aligned} \tag{3.17}$$

3.1.7. Enerji dengesi hesaplama sonuçları

Kurutucu içersine giren ve çıkan malzemelerin taşıdığı ısıl güç : $\left(\dot{Q}_i\right)$

Hava, Akrilik elyaf, palet ve elyaf ile taşınan suyun taşıdığı enerji Denklem (3.18)'de olduğu gibi kütle ile entalpi çarpılarak Tablo 3.5.'de verilmiştir;

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_i \Delta h_i \tag{3.18}$$

$$\Delta h_i = h_i - h_0 \tag{3.19}$$

Kurutucu içersine verilen buharın enerjisi : $\left(\dot{Q}_{buh}\right)$

$$\dot{Q}_{buh7} = \dot{m}_{buh}(h_{buh} - h_0) = 750\ (2.850 - 105) = 2.058.750,0\ \text{kJ/h}$$

Kurutucudan çıkan kondensin enerjisi : $\left(\dot{Q}_{kon}\right)$

$$\dot{Q}_{kon8} = \dot{m}_{kon}(h_{kon} - h_0) = 750\ (419 - 105) = 235.500,0\ \text{kJ/h}$$

şeklinde elde edilir.

Tablo 3.5. Kurutucunun enerji dengesi

MALZEME	KÜTLE (m) (kg / h)		SICAKLIK (T) (K)		Cp kJ/(kg-K)	Δh (kJ/kg)		ENERJİ AKIŞI Q,W (kJ/h)	
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış		Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
1. Baca Hava Tahliye	5.240	1.625	298	378	-	32,5	383,1	170.409,0	622.583,0
2. Baca Hava Tahliye		2.931		388	-		311,1		911.582,6
3. Baca Hava Tahliye		865		333	-		67,1		58.052,8
Akrilik Tow	635	635	308	338	1,3	13,0	52,0	8.255,0	33.020,0
Taşıyıcı Paletler	6.780	6.780	317	338	0,46	8,7	18,4	59.257,2	124.752,0
Akrilik Tow ile taşınan su	190	10	308	338	4,18	41,8	167,2	7.942,0	1.672,0
W (fanla beslenen enerji)								149.940,0	
Q buhar	750					2.745,0		2.058.750,0	
Q kondens		750					314,0		235.500,0
TOPLAM								2.454.553,2	1.987.162,3

Kurutucudan kayıp olan enerji: ($Q_{kayıp}$)

Enerji dengesini ifade eden Denklem (3.17) ile kayıp enerji;

$$\dot{Q}_{kayip} = 467.390,9 \text{ kJ/h}$$

şeklinde elde edilir.

Bu enerji yüzeylerden taşınım ışınım ve sızıntı havasından dolayı olmaktadır. Bunların detayını elde etmek için aşağıda belirtilen hesaplama yapılacaktır.

3.1.8. Yüzeylerden kayıp enerjinin hesaplanması

Kurutucu yüzeylerinden çevreye taşınım ve ışımayla kaybedilen bir enerji söz konusudur. Bu enerjiyi hesaplamak amacıyla taşınım ile ve ışımayla ısı geçişişleri bağıntıları kullanılacaktır ve bu hesaplamada TS EN ISO 12241 yalıtım standardı esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplama sonucu elde edilen yüzeylerden kaybolan enerji, Enerji dengesinden bulunan kayıp enerji ile karşılaştırılarak, sızıntı yoluyla oluşan enerji kayıpları elde edilecektir. Kurutucunun yüzey sıcaklıkları görüntüleri termal kamera ile elde edilmiştir.

Kurutucu boyutları: en x boy x yükseklik = 2,3 m x 13,2 m x 2,7 m

h yüzey ısı geçiş katsayısı hesaplaması :

TS EN ISO 12241 yalıtım standardında yeralan h ısı taşınım katsayısının hesaplanması için Denklem (3.20) kullanılmıştır [30].

$$h = h_r + h_{cv} \tag{3.20}$$

h_r = ışınım yüzey ısı geçiş katsayısı,
h_{cv} = taşınımla ısı geçiş katsayısı;

Işınım yüzey ısı geçiş katsayısı: h_r ışınım katsayısının hesaplanmasında Denklem (3.21), (3.22) ve (3.23)'deki gibi kullanılır.

$$h_r = a_r \, c_r \tag{3.21}$$

a_r = sıcaklık faktörü, c_r = ışınım katsayısı;

$$a_r = \frac{(T_1)^4 - (T_2)^4}{T_1 - T_2} \tag{3.22}$$

$$c_r = \varepsilon \ \sigma \tag{3.23}$$

$$a_r = \frac{(329)^4 - (298)^4}{329 - 298} = 123.547.215 \ \ K^3$$

$$c_r = (0{,}44)\,(5{,}67.10^{-8}) = 2{,}5.10^{-8} \ \ W/m^2K^4$$

$\sigma = 5{,}67.10^{-8}$ W/m^2K^4 (Stefan-Boltzman sabiti), ϵ =0,44 (Yüzeyin yayması) [30]

$h_r = 3{,}09 \ \ W/m^2K$

Taşınımla ısı geçiş katsayısı: h_{cv}, binaların içinde dikey duvarlar için laminar akış için Denklem (3.24), (3.25) ile hesaplanacaktır.

$$h_{cv} = 1{,}32 \ \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{H}} \tag{3.24}$$

$$\Delta\theta = (\theta_{se} - \theta_a) \tag{3.25}$$

θ_{se} = Duvarın yüzey sıcaklığı

θ_a = Ortam havasının sıcaklığı

H=Duvarın yüksekliği

$$h_{cv} = 1{,}32 \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{H}} = 1{,}32 \sqrt[4]{\frac{31}{2{,}7}} = 2{,}43 \ \text{W/m}^2\text{K}$$

$$h = h_r + h_{cv} = 3{,}09 + 2{,}43 = 5{,}6 \ \text{W/m}^2\text{K}$$

Yüzey boyunca ısı taşınım katsayısı ortalama h= 6 W/m²K olarak kabul edilmiştir. Yüzeyden ısı kaybı, Denklem (3.26) ile elde edilebilir;

$$\dot{Q}_{\text{ısıgeçişi}} = h\,A\left(T_y - T_\infty\right) \tag{3.26}$$

Tüm yüzeyler için ısı kaybı detayları Tablo 3.6.'da verilmiştir.

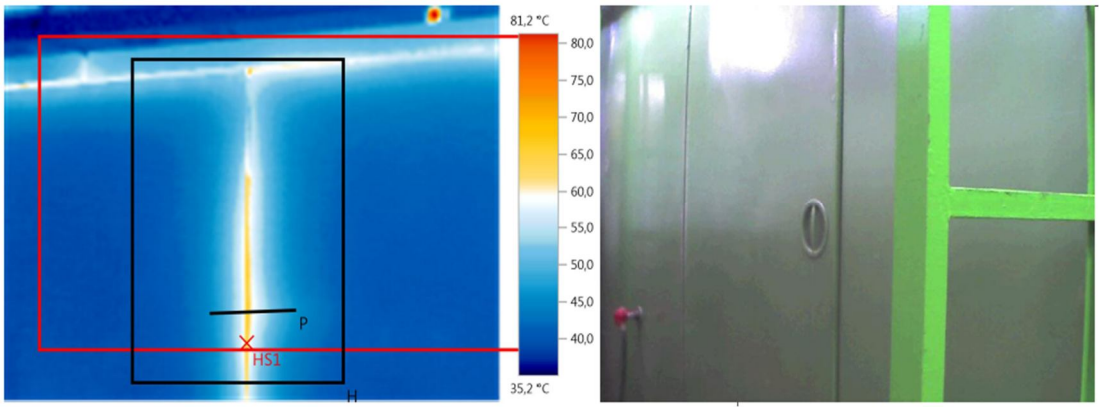
$$\dot{Q}_{\text{ısıgeçişi}} = 102.280{,}3 \ \text{kJ/h}$$

olup toplam ısı kaybı olarak elde edilmiştir.

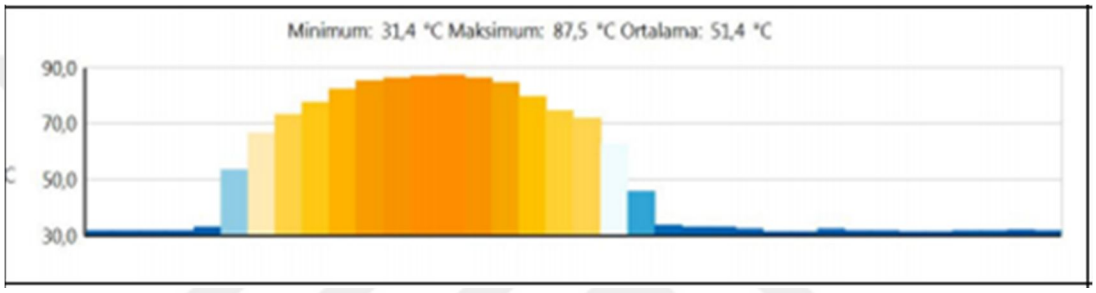
Tablo 3.6. Kurutucu yüzeyinden ısı kaybı

	SICAKLIK T (K)		A	h	ISI KAYBI $\dot{Q}$	
	Kabin. Sıc.	Çevre sıc.	m²	W/m²K	W	kJ/h
1. Ön yüzey	65	25	6,2	6	1.490,4	5.365,4
2. Ön yüzey	45	25	6,2	6	745,2	2.682,7
1. Yan yüzey	50	25	35,6	6	5.346,0	19.245,6
2. Yan yüzey	50	25	35,6	6	5.346,0	19.245,6
1. Üst yüzey	60	25	30,4	6	6.375,6	22.952,2
2. Alt Yüzey	75	25	30,4	6	9.108,0	32.788,8
TOPLAM					28.411,2	102.280,3

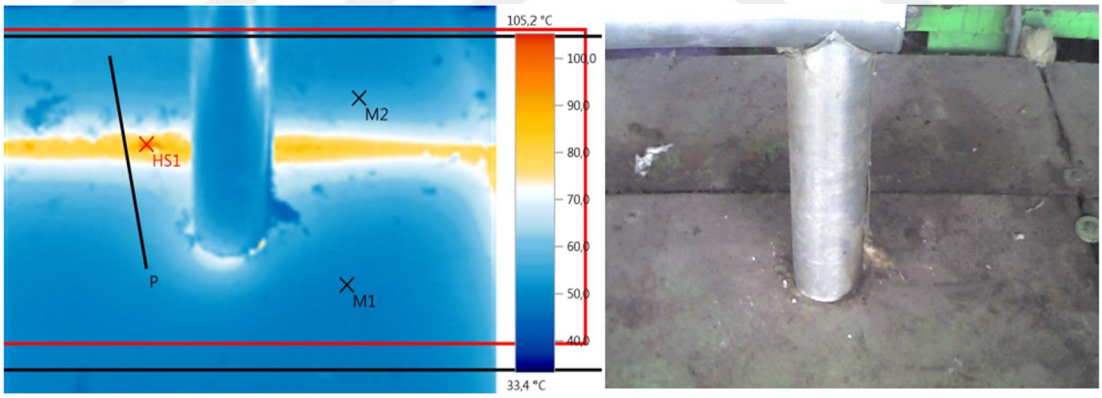
Kurutucu üzerinde yapılan termal ölçümlerin bazılarının görüntüleri ve sıcaklık dağılımı Şekil 3.3.-3.4. ve Şekil 3.5.-3.6.'da gösterilmiştir.



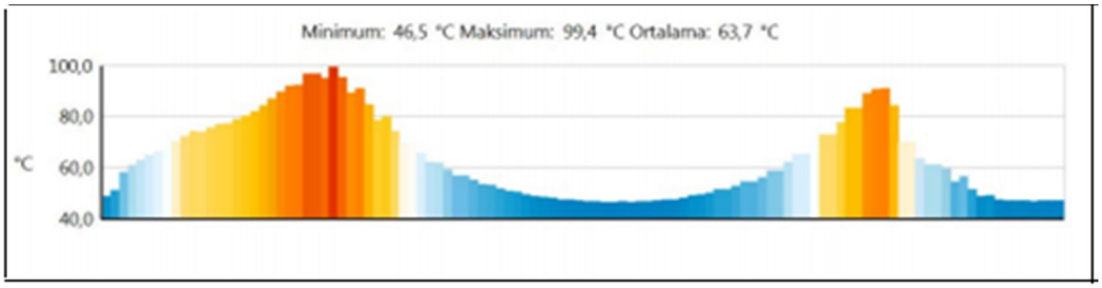
Şekil 3.2. Kurutucu yan yüzeyde termal kamera görüntüsü



Şekil 3.3. Kurutucu yan yüzeyde termal kamera ile elde edilen sıcaklık dağılımı



Şekil 3.4 Kurutucu üst yüzeyde termal kamera görüntüsü



Şekil 3.5. Kurutucu üst yüzeyde termal kamera ile elde edilen sıcaklık dağılımı

Mevcut tüm kurutucu yüzeyleri üzerinde termal kamera ile sıcaklık taraması yapılmıştır. Yalıtımın iyi olduğu noktalarda sıcaklık değeri ortalama 35-40 °C civarında olmalıdır. Isı köprülerinin olduğu noktalarda sıcaklıklar daha yüksektir. Yüzey üzerinde yüksek sıcaklıklar görülen yalıtımın kötü olduğu noktalarda iyileştirme çalışmaları yapılacaktır.

3.1.9. Makina duruşlarından dolayı oluşan enerji kayıpları

Gün içerisinde kurutucu prosesinde duruşlar yaşanabilmektedir. Kurutucu, duruş esnasında buhar harcamamaktadır. Fakat makine devreye girerken duruş süresi ve makina soğumasına bağlı olarak buhar tüketmektedir. Yapılan ölçümlerde devreye girişlerde uzun duruş sonrası yaklaşık 300 kg, kısa duruşlar sonrası 90 kg buhar harcamaları olup ortalama günde 120 kg/saat buhar harcamaktadır. Makinanın duruş sayısının farklılığına göre bu değer değişmektedir. Bu durumda duruşlardan dolayı;

$$\dot{Q}_{duruş} = \dot{m}_{bh} h_{fg} = (120)(2.047{,}5) = 245.700 \quad kJ/h$$

enerji tüketimi olmaktadır.

3.2. Akrilik Tow Kurutma Prosesinin Ekserji Analizi

3.2.1. Ekserjinin tanımı

Termodinamiğin ikinci yasası; enerji geçişlerinin ancak belli bir yönde gerçekleşebileceğini, gerçek olayların olduğu gibi geriye dönülemeyecek şekilde meydana geldiğini bu nedenle de her geçişte enerjinin kullanılabilir iş kapasitesinin neden azaldığını açıklayan, enerjinin niteliği ile ilgili bilgiler sağlayan yasadır. En önemlisi, enerji korunumu hesabına göre uygun olduğu halde işlemlerin gerçekleşip gerçekleşemeyeceği konusunda bize yol göstermektedir.

Ekserji, kullanılabilir maksimum enerji olarak tanımlanmaktadır. Termodinamiğin birinci yasasına göre yapılan enerji analizi kullanılabilir maksimum enerji miktarını görmek açısından yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle herhangi bir sistemde kullanılabilir maksimum enerjiyi görmek açısından, termodinamiğin ikinci yasasına dayalı ekserji analizinin yapılması zorunludur. Böylelikle sistemden daha fazla ne kadar iş elde edilebileceği görülür. Bu sayede sistemde iyileştirme yapmak mümkün olabilir [31]. En büyük iş elbette bir sistemin tersinir hal değiştirmesiyle elde

edilebilir. Bir sistemin bulunduğu halden tamamen tersinir şekilde çevre ile dengeye gelinceye kadar yani ölü hale kadar hal değiştirmesi sağlanırsa sistem en büyük teorik yararlı işi yapmış olur. Buna kullanılabilirlik ya da ekserji adı verilir.

3.2.2. Tersinir iş ve tersinmezlik

Tersinir iş, bir sistem belirli bir başlangıç hali ve son hal arasında bir hal değişimi geçirdiğinde, üretilebilen yararlı işin en fazla miktarı (veya sağlanması gereken en az iş) olarak tanımlanır. Bu başlangıç hali ve son hal arasındaki hal değişimi, tamamen tersinir bir yolla gerçekleştirilirse, kazanılan yararlı iş çıktısıdır (veya girdisidir). Son hal ölü hal olduğunda tersinir iş ekserjiye eşit olur.

Tersinir iş ve yararlı iş arasındaki fark, hal değişimi sırasındaki mevcut tersinmezliklerden kaynaklanır ve bu fark tersinmezlik olarak adlandırılır. Tersinmezlik ekserji yok oluşuna eşittir. Tamamen tersinir bir hal değişimi için, tersinmezlik sıfıra eşittir. İş üreten düzenekler için $W_{tersinir} \geq W_{yararli}$ ve iş tüketen düzenekler için $W_{tersinir} \leq W_{yararli}$ olduğundan, tersinmezlik pozitif bir niceliktir. Tersinmezlik, harcanmış iş potansiyeli veya iş yapmak için kaybedilmiş fırsat olarak görülebilir.

Bir hal değişimi sırasında tersinmezlikler varsa o zaman iş miktarının bir kısmı bu tersinmezlikler nedeniyle harcanacaktır. Entropi artışının sebebinin tersinmezlikler olduğunu söyleyebiliriz. Dolayısıyla iş kayıpları entropi üretiminin referans sıcaklıkla çarpımı sonucu elde edilmektedir [24].

Tersinir işlemleri referans olarak kullanabiliriz. Bu referans çevrim ise iki ısı kaynağı arasında çalışan ve en büyük verime sahip tek ideal çevrim olan Carnot çevrimi'dir. Çevrim yerine tek bir hal değişimi söz konusu olduğunda ikinci yasanın uygulanmasını sağlayan analitik ifade, entropi olarak adlandırılan ve S ile gösterilen bir özellik ile verilir. Bir tersinir hal değişimi için entropi değişimi Denklem (3.27);

$$(s_2 - s_1) = \frac{\delta Q}{T} \text{ Tersinir hal değişimi} \qquad (3.27)$$

şeklinde elde edilir. Gerçek işlemlerde entropi değişimi Denklem (3.28);

$$(s_2 - s_1) > \frac{\delta Q}{T} \text{ Tersinmez hal değişimi} \tag{3.28}$$

olarak elde edilecektir. Bu da entropinin artışı prensibi olarak bilinir. Bu son ifade gerçek işlemlerin meydana gelebilmesi için daima entropinin artıyor olması gerektiğini söylemektedir. Eşitsizliğin sol tarafını;

$$\Delta s_{sistem} = s_2 - s_1 \tag{3.29}$$

olarak yazarsak, entropinin artma prensibini entropi üretimini temsil eden bir terim ekleyerek eşitsizlik olarak değil bir eşitlik olarak kolayca Denklem (3.30) gibi ifade edebiliriz;

$$\Delta s_{sistem} = \frac{Q}{T} + s_{üretim} \tag{3.30}$$

Burada $s_{üretim}$ terimini tersinmezlikler yüzünden meydana gelen entropi artışını temsil etmesi için kullanılır. Tersinmezlikler entropi üretiminin ne kadar olacağını belirler. Ekserji bir özelliktir. Ekserji korunmaz, sistem içinde hal değişimi sırasındaki tersinmezliklerden dolayı yıkıma uğrar. Bu ekserji yıkımı olarak bilinir ve entropi üretimi için Denklem (3.31), (3.32) ile belirtilen ifadeler geçerlidir [27];

$$E_x = T_0 \, s_{üretim} \tag{3.31}$$

$$E_x = T_0 \left(\frac{ds}{dt} + \sum m_i s_i - \sum m_j s_j - \sum \frac{Q}{T} \right) \tag{3.32}$$

Sistemin dışına aktarılan ekserjiye ekserji kaybı denir. Ekserji; ısı, iş ve kütle akışı ile sisteme veya sistemden geçiş yapabilir [31].

3.2.3. Kurutucunun belirli noktalarındaki ekserjilerin hesaplanması

Bir kontrol hacminin ekserji analizini yaparken ilk olarak kütle akışlarına ilişkin ekserji ifadelerine gerek duyarız. Kontrol hacmine kütle akışı nedeniyle aktarılan ekserji, kütlenin taşıdığı ekserji ve akış işinin ekserjisinin toplamına eşittir, buna kısaca akış ekserjisi denilir [28], [31].

Akış halindeki hattın termofiziksel ekserjisi Denklem (3.33) şeklindedir;

$$\dot{E}_{tf} = \dot{m}\left[(h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz\right] \tag{3.33}$$

Isı ile ekserji geçişi: Isı geçişi ile sistem sınırından geçen ekserji Denklem (3.34) gibi hesaplanabilir [28];

$$\dot{E}_{ısı} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\dot{Q} \tag{3.34}$$

İş ile ekserji geçişi: İş doğrudan doğruya ekserji demektir.

Hava, Akrilik elyaf, taşıyıcı paletler ve elyaf serbest veya bağlı suyu için birim kütle akışı ile aktarılan ekserji hesaplamaları (kJ/kg) için Denklem (3.35)'den yapılır;

$$e_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \tag{3.35}$$

Akrilik elyaf, taşıyıcı paletler, tow serbest veya bağlı suyu için ilgili maddelerin özgül ısılar geçerli olmak üzere entropi hesaplamalarında Denklem (3.36) kullanılır;

$$(s_i - s_0) = c_p \ln \frac{T_i}{T_0} \tag{3.36}$$

Nemli hava için entropi [28] Denklemi (3.37) ;

$$(s_h - s_0) = c_{ph} \ln \frac{T_h}{T_0} - R_h \ln \frac{P_h}{P_0} + \omega\left(c_{pbuh} \ln \frac{T_{buh}}{T_0} - R_{buh} \ln \frac{P_{buh}}{P_0}\right) \tag{3.37}$$

kullanılır. Çıkan havadaki serbest su için entropi s_{buh} termodinamik tablodan alınmıştır [29]. Referans Sıcaklık T_0= 298 K olarak alınmıştır. Yukarıdaki denklemde R gaz sabiti P ise basınç değerlerini göstermektedir.
R_{buh}= 0,4615 kJ/kg-K, R_h= 0,287 kJ/kg-K (Termodinamik tablo)

1- Dışardan alınan havanın ekserjisi :

T_{h1}=25 °C, ω_1=0,013 ($kgH_2O/kgkuruhava$)'dır. φ=0,65 P_d=3,1698 kPa (Termodinamik tablo) [29].

$$P_{h1} = 101 - P_{buh1} = 101 - \varphi P_d = 101 - 2{,}06 = 99 \text{ kPa}$$

Denklem (3.37) kullanılarak s_{h1}= 0,008 kJ/(kg-K) bulunur.

$$e_{h1} = h_{h1} - T_0\, s_{h1} = 32{,}52 - 2{,}53 = 30 \text{ kJ/kg}$$

2- Bacadan atılan havanın ekserjisi :

a) 1. Bacadan atılan nemli havanın ekserjisi :

T_{h1}=105 °C, su buharının entropisi s_{buh}=7,295 kJ/(kg-K), ω_2=0,114 (kgH_2O/kgkuruhava), φ=0,13 P_d=120,9 kPa (Termodinamik tablo) [29].

$$P_{h2} = 101 - P_{buh2} = 101 - \varphi\, P_d = 101 - 15{,}71 = 85{,}28 \text{ kPa}$$

Denklem (3.37) kullanılarak; s_{h2}=1,04 kJ/(kg-K)

$$e_{h2} = h_{h2} - T_0\, s_{h2} = 383{,}1 - 308{,}8 = 74{,}4 \text{ kJ/kg}$$

b) 2. Bacadan atılan nemli havanın ekserjisi :

T_{h2}=115 °C, su buharının entropisi s_{buh}=7,20 kJ/(kg-K), ω_2=0,082 (kgH_2O/kgkuruhava), φ=0,07 P_d=169,18 kPa (Termodinamik tablo).

$$P_{h2} = 101 - P_{buh2} = 101 - \varphi\, P_d = 101 - 11{,}84 = 89{,}15 \text{ kPa}$$

Denklem (3.37) kullanılarak; $s_{h2} = 0{,}84$ kJ/(kg-K)

$$e_{h2} = h_{h2} - T_0\, s_{h2} = 311{,}1 - 251{,}6 = 59{,}5 \text{ kJ/kg}$$

c) 3. Bacadan atılan nemli havanın ekserjisi :

T_{h2}=60 °C, su buharının entropisi s_{buh}=7,91 kJ/(kg-K), ω_2=0,0124 (kgH_2O/kgkuruhava), φ=0,10 P_d=19,947 kPa (Termodinamik tablo).

$$P_{h2} = 101 - P_{buh2} = 101 - \varphi\, P_d = 101 - 1{,}99 = 99{,}0 \text{ kPa}$$

Denklem (3.37) kullanılarak; s_{h2}=0,22 kJ/(kg-K)

$$e_{h2} = h_{h2} - T_0\, s_{h2} = 67{,}1 - 65{,}0 = 2{,}1 \text{ kJ/kg}$$

3- Akrilik elyaf :

Giren akrilik elyafın ekserjisi;

Giren akrilik elyafın entropisi :

$$s_{ely3} = (s - s_0) = c_p \ln \frac{T_{ely3}}{T_0} = 1,3 \ln \frac{308}{298} = 0,043 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$e_{ely3} = h_{ely3} - T_0 \, s_{ely3} = 13,0 - 12,8 = 0,21 \text{ kJ/kg}$$

Çıkan akrilik elyafın ekserjisi;

Çıkan akrilik elyafın özgül entropisi :

$$s_{ely4} = (s - s_0) = c_p \ln \frac{T_{ely4}}{T_0} = 1,3 \ln \frac{338}{298} = 0,163 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$e_{ely4} = h_{ely4} - T_0 \, s_{ely4} = 52,0 - 48,8 = 3,2 \text{ kJ/kg}$$

4- Su :

Giren akrilik elyaf ile taşınan suyun ekserjisi;

Giren akrilik elyaf ile taşınan suyun özgül entropisi :

$$s_{s3} = (s - s_0) = c_{ps} \ln \frac{T_{s3}}{T_0} = 4,18 \ln \frac{308}{298} = 0,138 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$e_{s3} = h_{s3} - T_0 \, s_{s3} = 41,8 - 41,1 = 0,69 \text{ kJ/kg}$$

Çıkan akrilik elyaf ile taşınan suyun ekserjisi;

Çıkan akrilik elyaf ile taşınan suyun özgül entropisi :

$$s_{bs4} = (s - s_0) = c_{pbs} \ln \frac{T_{bs4}}{T_0} = 4,18 \ln \frac{338}{298} = 0,526 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$e_{bs4} = h_{bs4} - T_0 \, s_{bs4} = 167,2 - 156,9 = 10,3 \text{ kJ/kg}$$

5- Palet :

Giren paletlerin ekserjisi;

Giren paletlerin özgül entropisi :

$$s_{p5} = (s - s_0) = c_{pp} \ln \frac{T_{p5}}{T_0} = 0{,}46 \ln \frac{317}{298} = 0{,}0284 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$e_{p5} = h_{p5} - T_0 \, s_{p5} = 8{,}7 - 8{,}5 = 0{,}3 \text{ kJ/kg}$$

Çıkan paletlerin ekserjisi;

Çıkan paletlerin özgül entropisi :

$$s_{p6} = (s - s_0) = c_{pp} \ln \frac{T_{p6}}{T_0} = 0{,}46 \ln \frac{338}{298} = 0{,}0579 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$e_{p6} = h_{p6} - T_0 \, s_{p6} = 18{,}4 - 17{,}3 = 1{,}1 \text{ kJ/kg}$$

7- Kurutucu içersine verilen buharın ekserjisi :

s_{buh}=6,8148 kJ/kg-K ve s_0=0,365 kJ/kg-K (Termodinamik tablodan)

$$s_{buh7} = (s - s_0) = 6{,}815 - 0{,}365 = 6{,}45 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$\dot{E}_{buh7} = \dot{m}\left[(h_{buh} - h_0) - T_0 (s_{buh} - s_0)\right] = 617.219{,}7 \text{ kJ/h}$$

8- Kurutucudan çıkan kondensin ekserjisi :

s_{kon}=1,3069 kJ/kg-K ve s_0=0,365 kJ/kg-K (Termodinamik tablodan)

$$s_{kon8} = (s - s_0) = 1{,}3069 - 0{,}365 = 0{,}94 \text{ kJ/(kg - K)}$$

$$\dot{E}_{kon8} = \dot{m}\left[(h_{kon} - h_0) - T_0 (s_{kon} - s_0)\right] = 24.985{,}4 \text{ kJ/h}$$

9- Fanlardan tüketilen ekserji :

$$\dot{W}_{fan} = 149.940 \text{ kJ/h}$$

10- Yüzeyden kayıp olan ısının ekserjisi :

$$\dot{W}_{kayip} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{kayip}}\right) \dot{Q}_{kayip} = \left(1 - \frac{298}{328}\right) 594.794{,}6 = 54.401{,}9 \text{kJ/h}$$

3.2.4. Ekserji dengesi

Genel ekserji denklemi sürekli, çok akışlı, adyabatik durum için Denklem (3.38) ve (3.39)'daki gibi yazılabilir;

$$\sum E_g - \sum E_ç = \sum E_{yok} \tag{3.38}$$

$$\sum \dot{m}_g h_g - T_0 \sum \dot{m}_g s_g + \dot{E}_{buh} + \dot{W}_{fan} = \sum \dot{m}_ç h_ç - T_0 \sum \dot{m}_ç s_ç + \dot{E}_{kon} + \dot{E}_Q + T_0 S_{üret} \tag{3.39}$$

Şekil 3.1 esas alınarak, yaş tow kurutulan bir kurutucu için birim zamanda ekserji yıkımı ayrıntılı olarak Denklem (3.40) olarak yazılır;

$$T_0 S_{üret} = \left(\dot{m}_{h1} e_{h1} + \dot{m}_{ely3} e_{ely3} + \dot{m}_{s3} e_{s3} + \dot{m}_{p5} e_{p5}\right)_g - \left(\dot{m}_{h2} e_{h2} + \dot{m}_{ely4} e_{ely4} + \dot{m}_{bs4} e_{bs4} + \dot{m}_{p6} e_{p6}\right)_ç + \dot{E}_{buh7} + \dot{W}_{fan9} - \dot{E}_{kon8} - \dot{E}_Q \tag{3.40}$$

Ekserji akışları hesaplamaları Tablo 3.7.'de özetlenmiştir

Tablo 3.7. Ekserji dengesi

	Enerji Akışı (mΔh) (kJ/h)		ÇEVRE	Entropi mTo(s-so)		Ekserji Akışı (kJ/h)	
	Giriş	Çıkış	SIC.(K)	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
1. Baca Hava Tahliye	170.409,0	622.583,0	298	13.272,5	501.751,8	157.136,5	120.831,2
2. Baca Hava Tahliye		911.582,6	298		737.294,0		174.288,5
3. Baca Hava Tahliye		58.052,8	298		56.290,6		1.762,1
Akrilik Elyaf	8.255,0	33.020,0	298	8.119,5	30.984,2	135,5	2.035,8
Taşıyıcı Paletler	59.257,2	124.752,0	298	57.444,8	117.060,5	1.812,4	7.691,5
Akrilik elyaf ile taşınan su	7.942,0	1.672,0	298	7.811,7	1.568,9	130,3	103,1
Wfan	149.940,0		298			149.940,0	
E buhar	2.058.750,0		298	1.441.530,3		617.219,7	
E kondens		235.500,0	298		210.514,7		24.985,4
E kayıp		467.390,9	298		424.641,7		42.749,2
TOPLAM	2.454.553,2	2.454.553,2		1.528.178,8	2.080.106,4	926.374,4	374.446,8

Tow kurutma fırını için yok edilen ekserji Denklem (3.40) yardımıyla;

$$\dot{E}_{yikim} = T_0 S_{üret} = 926.374,4 - 374.446,8 = 551.927,6 \text{ kJ/h}$$

olarak elde edilmiştir.

4. TOW KURUTUCUSUNUN MEVCUT DURUMUYLA İLGİLİ BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan analizlere göre tow kurutucusunun Enerji ve Ekserji verimleri elde edilmiş ve bu verilere göre iyileştirme noktaları belirlenmiştir.

4.1. Birinci Kanun Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Verim termodinamikte en çok kullanılan ifadelerden bir tanesi olup enerji dönüşümünün nasıl iyi bir şekilde başarılacağını gösterir [24]. Isıl verim, kurutma makinesi için Denklem (4.1)'deki gibi ifade edilebilir [32];

Verim = Towun kurutulması için gereken min. enerji ⁄ Beslenen enerji (4.1)

Tablo 3.7.'den Tow'un kurutulması için gerekli minimum enerji 545.364 kJ/h ve kurutucuya beslenen toplam enerji 2.454.553,2 kJ/h elde edilir ve yukarıdaki denklemde yerine yazılırsa kurutucunun I. kanun verimi aşağıdaki gibi hesaplanır;

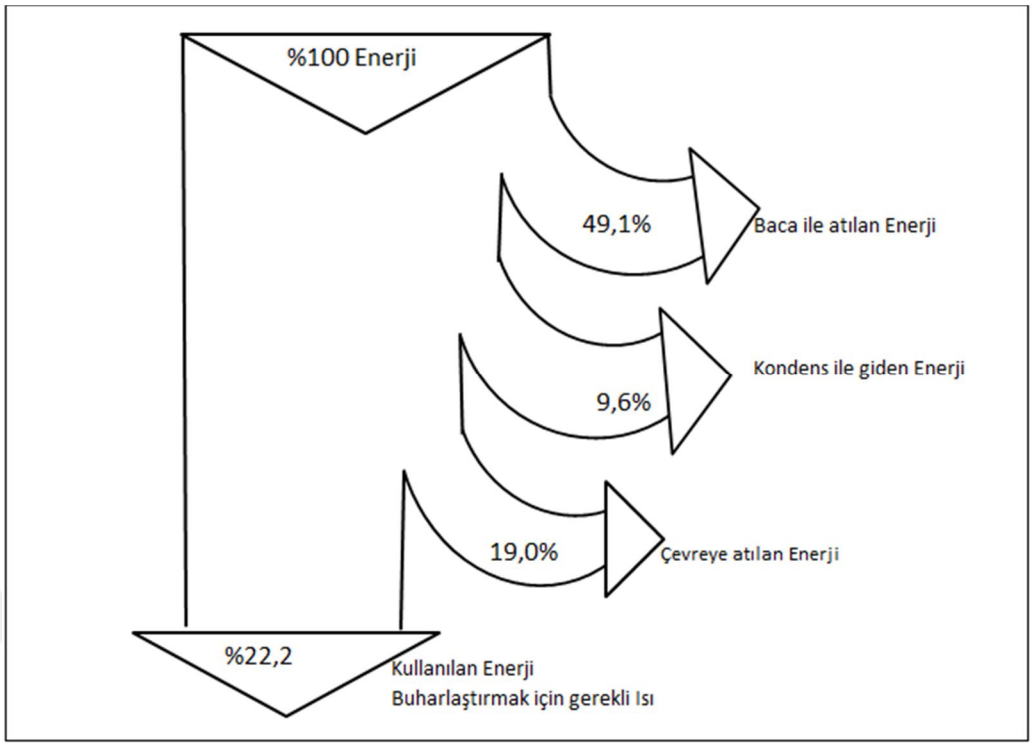
$$\eta = \frac{545.364,0}{2.454.553,2} = \%22,2$$

4.2. Birinci Kanun Analizi Sonuçlarının Sankey Diyagramı Yardımıyla Açıklanması

Sankey diyagramı, makine mühendisliğinde proseslerin izahında kullanılan akış diyagramlarıdır. Enerji denkliği ve termal verime ilişkin sonuçlar Tablo 4.1.'de ve Şekil 4.1.'de sankey enerji diyagramı ile sunulmuştur.

Tablo 4.1. Tow kurutucusunun mevcut durumu için I. kanun sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler

I. KANUN		(kJ/h)	%
Enerji Girdisi	AID	2.454.553,2	100,0
Baca Gazı ile atılan Enerji	Q bg	1.206.298,3	49,1
Kondensden atılan Enerji	Q kon.	235.500,0	9,6
Çevreye olan ısı kaybı	Q_o	467.390,9	19,0
Kurutma için gereken enerji	Q tow	545.364,0	22,2



Şekil 4.1. Tow kurutucusunun mevcut durumu için enerji sankey diyagramı

4.3. Ekserji Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ekserji verimi, Denklem (4.2) yardımıyla hesaplanır;

$$\eta = \frac{\sum E_{ç}}{\sum E_{g}} = \frac{\sum E_{g} - \sum E_{yok}}{\sum E_{g}} = 1 - \frac{\sum E_{yok}}{\sum E_{g}} \tag{4.2}$$

Ekserji verimi kurutucudan çıkan tüm toplam ekserji değerinin, kurutucuya giren tüm akımların toplam ekserji değerine oranı olarak ifade edilebilir.

Tablo 3.7.'den Tow'daki suyun buharlaştırılması için gerekli ekserji 306.712,3 kJ/h ve kurutucuya beslenen toplam ekserji girdisi 926.374,4kJ/h elde edilir. Dolayısıyla kurutucu için ekserji verimi:

$$\eta = \frac{306.712,3}{926.374,4} = \%33,1$$

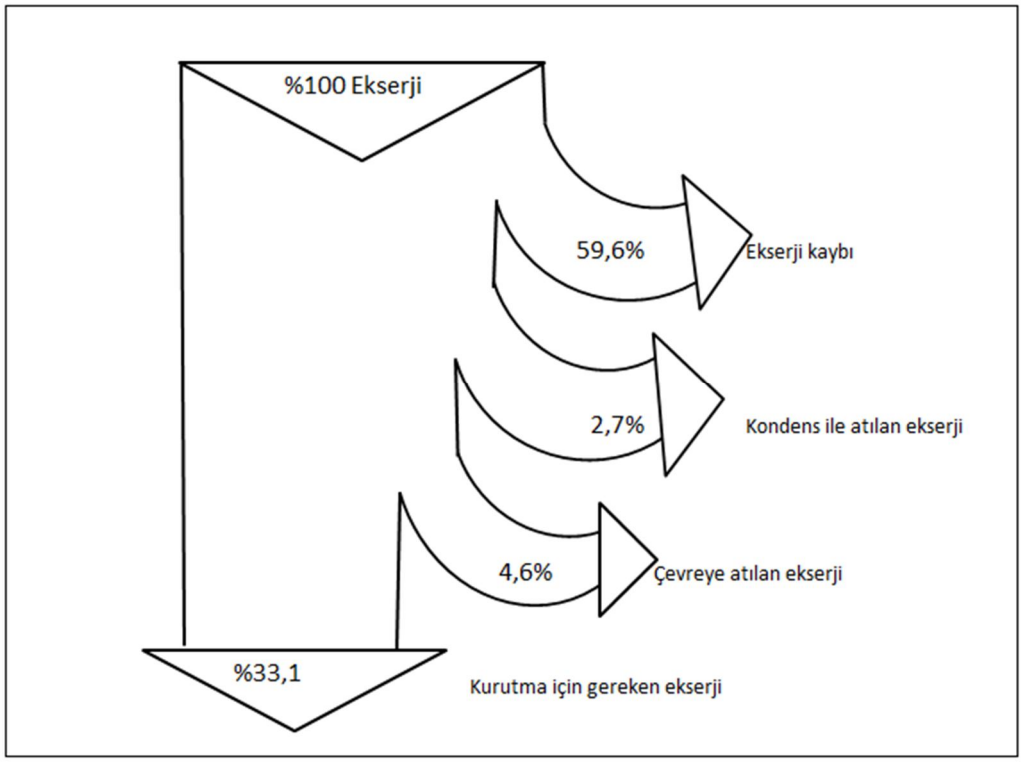
elde edilmiştir.

4.4. Ekserji Analizi Sonuçlarının Sankey Diyagramı Yardımıyla Açıklanması

Ekserji denkliği ve II. kanun verimine ilişkin sonuçlar Tablo 4.2.'de ve Şekil 4.2.'deki sankey diyagramında sunulmuştur.

Tablo 4.2. Tow kurutucusunun mevcut durumu için ekserji sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler

Ekserji	kJ/h	%
Ekserji Girişi- Hava (157.136,5 kJ)- Malzemeler (2.078,3kJ)- Buhar, Fan (767.159,7 kJ)	926.374,4	100,0
Kurutma için gereken Ekserji (kJ)	306.712,3	33,1
Kondensden atılan Ekserji (kJ)	24.985,4	2,7
Çevreye olan ısı kaybı (kJ)	42.749,2	4,6
Ekserji kaybı (kJ)	551.927,6	59,6



Şekil 4.2. Tow kurutucusunun mevcut durumu için ekserji sankey diyagramı

5. TOW KURUTUCUSU İÇİN ÖNERİLEN VERİM İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Bu bölümde, iyileştirme yöntemleri ve bu yöntemlerin uygulanabilirliği tartışması ve verimlilik hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen kazançlar ve yatırımların geri dönüşüm zamanları çıkartılmıştır. Sistem iyileştirmesi sonrasında enerji ve ekserji dengeleri tekrar kurularak verimlilikler tekrar hesaplanmıştır

5.1. Enerji Verimliliği İyileştirme Yöntemleri ve Verimlere Katkılarının Hesaplamaları

Akrilik elyaf kurutucu makinası proses şartları (kurutucu makina hızı, kabin sıcaklık değerleri, fan devirleri, kurutucu baca gazı debisi) optimum değerlerinin belirlenmesi gerekir. Tow kurutucusunun kurutma verimini iyileştirmek için iyileştirme metodları ve katkıları değerlendirilmiş ve aşağıda tartışılmıştır.

a) Kurutucu Klape Ayarlaması: Kurutucuların içersinde dolaştırılan kurutma havasının tahliye edildiği bacalar mevcuttur. Bu bacalardan dışarı atılan nemli kurutma havası debisi, baca içersindeki klapelerle ayarlanmaktadır. Klapeler yardımıyla hava miktarının ayarlanması, hem kurutucu içersindeki nem miktarı hem de bunun sonucunda kurutma verimi ve malzemenin kalitesini de iyileştirmektedir. Bu kelebek tipi klapeler, uzun bir çubuk-kol vasıtasıyla kontrol edilerek açılıp kapanması sağlanmaktadır. Fakat baca içersindeki pozisyonu bilinmediği için bir standart açıklık sağlanamamıştır. Bu nedenle baca klapeleri değiştirilerek giyotin tarzı klapeler takılmıştır. Bu klapelerin pozisyonları için %25–50–75 açıklık ayarları belirlenmiş ve standart bir hale getirilebilmiştir. Baca gazı debisi için ölçüm noktası belirlenmiş ve tüm ölçümler bu noktadan yapılmıştır. Kurutucu baca klapeleri %50 pozisyonuna ayarlanarak tahliye edilen nemli hava debi miktarı yaklaşık 1800-2000 m^3/h değerine ayarlanmıştır. Dışarıya atılan havanın kısılması ve kontrol altına alınması, içerdeki havanın bir miktar daha kullanılmasını sağlayarak enerji tasarrufu sağlamıştır. Hava debisinin daha fazla kısılması kurutulan ürünün kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır.

b) Yüzeylerin yalıtılması: Kurutucu yüzeyinden ısı kaybı iç dengeyi etkilediği için yalıtımların iyi olması gerekir. Fakat bunun için ilave maliyet gerekir. Mevcut kurutucuda yan kapaklarda taş yünü ve üst-alt kısımlarda saçlar mevcuttur. Kurutucuların yüzeylerinde (kurutucu üstü, yan kapaklar vs.) termal kamera ile ölçümler yapılmıştır. Bazı bölümlerde yalıtımların bozulduğu ve sacların çok eskidiği tespit edilmiştir. Kurutucuların bazı bölümlerinde ortalama 55-60 °C, üst yüzeylerde 70-90 °C ye varan sıcaklıklar tespit edilmiştir.

Tow fırınında yalıtım gerektiren noktalar belirlenmiştir. Bu kısımların yalıtımı ile sıcaklıklar 35-40 °C ye düşürülerek dış ortama olan kayıp ısı engellenmelidir. Bunun için kurutucunun yüzey panellerdeki yalıtım malzemesi olan 40 mm taş yünü değiştirilmiştir. Paneller sökülerek 80 mm kalınlığında 110 kg/m^3 yoğunlukta taş yünü dolgu kullanılmasına karar verilmiştir. Üst bölgedeki eskiyen saclar değiştirilmiş ve birleşim yerlerine dolgu mazlemeleri konulmuştur. Amaç ısı köprülerinin en aza indirilmesinin sağlanmasıdır. Böylece panel birleşim yerlerindeki kaçaklar minimuma indirilmiştir. Sıcak yüzeylerin yüzey sıcaklıklarının yalıtımla ortalama 35-40 °C'ye kadar azaltılabildiği durumda taşınım ve ışınım kayıpları hesaplanmıştır. Daha önceki yüzey sıcaklıkları için elde edilen kayıplardan son elde edilen kayıp çıkarılarak yalıtımdan dolayı tasarruf elde edilmiştir.

c) Kurutucu duruşlarının azaltılması: Kurutucuların herhangi bir sebeple durması neticesinde kapaklar açılmakta ve buhar kesildiği için içerisi soğumaktadır. Her devreye girişte sistemin tekrar rejime girmesi için ilave ısı gerekmektedir. Proses gereği oluşan duruşların engellenmesi için iyi bir planlama ve boyama makinasının daha önceki proseslerinin duruşu ile senkronize olarak duran kurutucunun duruşunu engellemek için otomasyon yapılması ile enerji tasarrufu yapılabilecektir.

Makinanın duruş süresi iyi bir otomasyonla yarı yarıya azaltılabilir. Kısa süreli makine duruşlarında (koyu renkler için süre 10 dakika belirlendi) kapakların açılmaması 10 dakikalık bir duruşta 150 kg. buhar kaybını engelleyebilmektedir. Ayrıca yapılan ölçümlerde bazı makinaların 15 dak. da set edilen değeri yakalarken bazı makinaların 30 dak. da bu değeri yakaladığı ve buhar tüketiminin 2 katı olduğu tespit edilmiştir. Bunun için tüm makinaların vana açıklıkları kontrol edilip

standartlaştırılmıştır. Duruşlarda kullanılan buhar miktarının yarı yarıya düşürüldüğü kabul edilerek enerji tasarrufu elde edilmiştir.

d) Fan devirlerinin düşürülmesi: Kurutucunun fan devirleri mevcutta %95-95-90-90 kapasite kullanımı ile çalışmaktadır. Bu kapasite değerleri fanların çalışma gücünü belirlemektedir. Fan devirleri kurutma kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Ürünün kurutulmasında kalitesine dikkat edilerek yapılan çalışmada kurutucudan çıkan debi ile orantılı bir denge kurulmuştur. Mevcut 4 fanın kapasite kullanımı %80-90-80-80 oranına düşürülmüştür. Makinada bu kapasite düşüşünden sonra yapılan ölçümlerde çekilen elektrik değerinin 41,6 kWh dan 26,6 kWh düşüş olduğu görülmüştür. Böylece elektrik enerjisinde %37 tasarruf sağlandığı görülmüştür. Akım değerleri tekrar ölçümüş buna göre yapılan hesaplamalarda tüm fanların toplam fiili gücü W=149.940 kJ/h dan, W=95.760 kJ/h değerine düşmüştür.

Tablo 5.1. Kurutucu fan çalışma kapasiteleri

Techizat Adı	Çalışma Kapasitesi İy. Öncesi	Kurulu güç (Kw)	Çalışma Kapasitesi İy. Sonrası	Fiili kapasite (kw)
Kurutucu Fan 1	95%	11	80%	5,8
Kurutucu Fan 2	95%	11	90%	6,4
Kurutucu Fan 3	90%	11	80%	5,8
Kurutucu Fan 4	90%	11	80%	5,8
Soğutucu Fan	60%	5,5	60%	2,8

Fiili güç = (W_{fan}) = 26,6 kW = 95.760 kJ/h

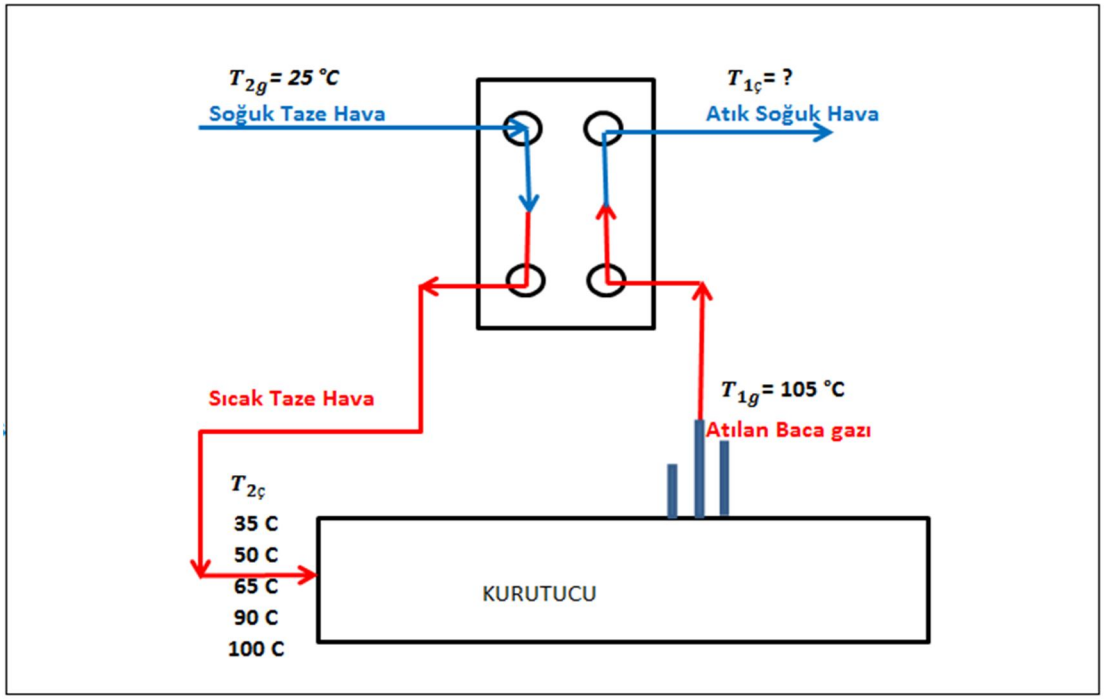
e) Serpantin yüzey temizlikleri: Kurutucu havasının ısıtılması serpantinlerin içersinden geçen buhar ile sağlanmaktadır. Kurutuculardа, ısı geçişinin engellenmemesi için serpantin yüzeylerindeki kirliliklerin temizlenmesi gerekir. Kirlilik ısı geçişini engellemektedir.

Serpantin yüzeylerinin kirli olmasından dolayı kurutma için kullanılan buharın enerjisi verimli bir şekilde yüzeylerden alınamamaktadır. Planlı bakımlarda serpantinlerin periyodik basınçlı hava ile temizlikleri yapılabilir, belirli bir süre sonra iç ve dış yüzeylerinde korozif kaplamalar olduğu için yenilenmeleri gerekmektedir. Yüzeyler temizlenerek ve temizliğin periyodik olarak yapılacağı yaklaşımı ile yüzey sıcaklığının 130 °C den 140 °C çıkartılabileceği kabul edilmiştir.

f) Baca gazı ısısının geri kazanılması: Dış ortamdan emilen hava, ısıtıcı serpantinler üzerinden geçirilerek ısıtıldıktan sonra kurutucuda elyafın nemini üzerine alarak bacalar ile atmosfere atılmaktadır. Bu atılan baca gazı yüksek miktarda enerji ihtiva etmektedir. Kurutucudan dışarıya atılan nemli hava ile kaybedilen (1.592.218,3 kJ/h) enerji büyüktür. Bu kayıp enerji tekrar kurutucuya beslenen havaya ön ısıtma yapmak üzere değerlendirilebilir. Atılan havanın enerjisi bir Isı Geri Kazanım cihazı (Reküperatör) kullanılarak kurutucunun taze havasının ısıtılmasında enerji tasarrufu için kullanılabilir.

Reküperatör, atık ısıyı geri kazanmak için kullanılan bir ısı değiştirgecidir. Enerji maliyetlerinin azaltılması ve enerjinin verimli kullanılması adına önemli elemanlardır. Kurutucu bacasından atılan atık hava enerjisi ile kurutucu taze hava girişinin reküperatör vasıtasıyla ısıtılması amaçlanmaktadır.

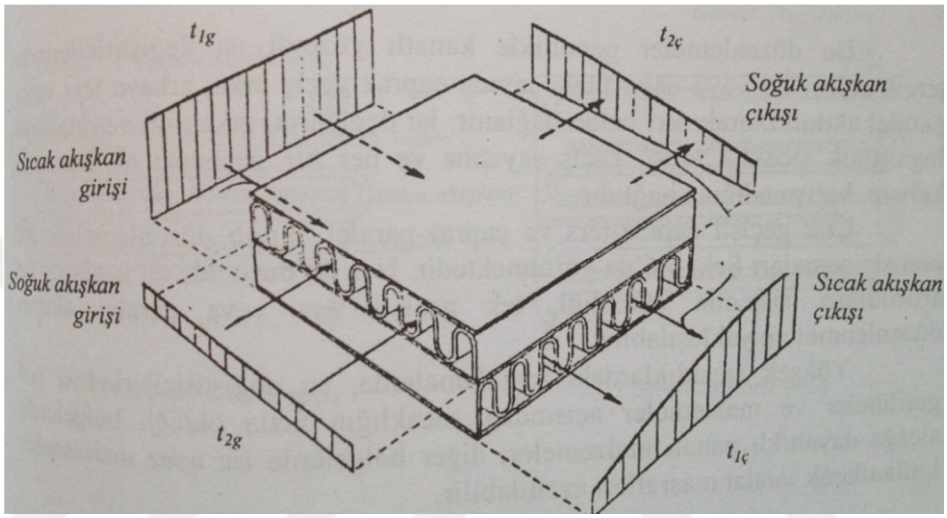
Kurutucuya beslenen dış havanın sıcaklığını ısı değiştirgecinde hangi sıcaklığa kadar ön ısıtma yapılmasının ekonomikliği araştırılmalıdır. Bu çalışmada Plakalı-kanatlı ısı değiştirgeci hava-hava ısıtması için düşünülmüştür.



Şekil 5.1. Tow kurutucusunun tasarlanan ısı geri kazanım cihazının (ısı değiştirgecinin) şematik görüntüsü

Bu tip iki tarafında da gaz akışkan bulunan ısı değiştirgeçlerinde kanatlar, paralel levhalar halindeki yüzeylerin iki tarafına da konulur. Isı değiştiricinin rijidliğini artırması ve yüksek basınçlarda çalışmasını sağlayabilmesi bakımından plakalı kanatların önemli fonksiyonları vardır [36].

İyileştirme yapılan sistemimizde tasarımı düşünülen plakalı-kanatlı ısı değiştirgecinin şematik görüntüsü Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Plakalı-kanatlı ısı değiştirgeci şematik akış görüntüsü [36]

Isı değiştirgecinde, alınan taze havanın 35, 50, 65, 90 ve 100 °C sıcaklıklara ısıtılarak, ısıl hesapları, enerji tasarrufu, yatırım ve işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Örnek hesaplama 65 °C için yapılmış olup, diğer sıcaklık değerleri için elde edilen sonuçlar tabloda verilmiştir.

Isı değiştirgecinde sıcak akışkan olarak, kurutma makinasından çıkan baca gazı akışı kullanılmıştır. Verileri Tablo 5.2.'de verilmiştir. Soğuk akışkan olarak, çevreden alınan taze hava akışı kullanılır. Verileri Tablo 5.3.'de verilmiştir. Kullanılan veriler, sıcak ve soğuk akışkanların giriş ve çıkış ortalama sıcaklıklardaki fiziksel özellikleri termodinamik tablolardan alınmıştır. Isı değiştirgecinin diğer kabul edilen proses parametreleri Tablo 5.4.'de tanımlanmıştır.

Isı geri kazanım cihazında havanın 65 °C ısıtılması durumu için detaylı hesaplamalar;

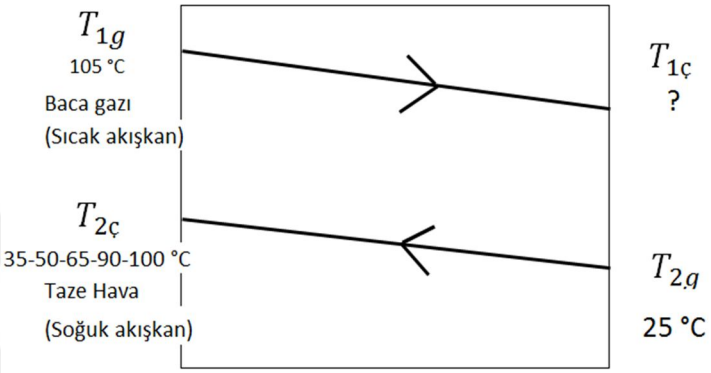
- Tasarruf edilecek enerji Denklem (5.1) ile elde edilir;

$$Q_{\text{ısıtıcı}} = \dot{m}_2\left(h_{2ç} - h_{2g}\right) = \dot{m}_1\left(h_{1g} - h_{1ç}\right) \quad (5.1)$$

$T_{2g} = 25\ °C$, $\varphi = 0{,}65$ $h_{2g} = 58{,}0$ kJ/h, $T_{2ç} = 65\ °C$, $\varphi = 0{,}37$ $h_{2ç} = 99{,}85$ kJ/h

$\dot{Q}_{\text{ısıtıcı}} = 3.900\ (99{,}85\text{-}58{,}0) = 162.045$ kJ/h

- Baca gazın çıkış sıcaklığının hesaplaması;



Şekil 5.3. Isı değiştirgeci sıcaklık dağılımı

$$T_{1ç} = T_{1g} - \left(Q_{\text{ısıtıcı}} \big/ \dot{m}_1 c_p\right) = 105 - (162.045 / 4.040) = 64{,}9\ °C$$

- Logaritmik sıcaklık farkı Denklem (5.2) ile hesaplanmıştır;

$$\Delta t_m = \frac{\Delta T_{1g,\,2ç} - \Delta T_{1ç,\,2g}}{\ln\left(\dfrac{\Delta T_{1g,\,2ç}}{\Delta T_{1ç,\,2g}}\right)} \quad (5.2)$$

$\Delta t_m = 39{,}9\ °C$

- Yüzey alanı Denklem (5.3) ile hesaplanır;

$$A = \frac{Q_{\text{ısıtıcı}}}{\left(K\ \Delta t_m\right)} \quad (5.3)$$

- K Toplam ısı geçiş katsayısı hesaplanmasında kullanılan; Sıcak ve soğuk akışkanlar için hız, Reynolds sayısı ve ısı taşınım katsayısı [33] Denklem (5.4), (5.5), (5.6) ve (5.7) ile hesaplanır.

Tablo 5.2. Isı değiştirgecinde baca gazı (sıcak akışkan) verileri

BACA GAZI (Sıcak A.)		Birim	Miktar	Formül
Kütlesel Debi	$\dot{m}_1$	kg/h	4.000	Veri
Giriş Sıcaklık	T_{1g}	°C	105	Veri
Çıkış Sıcaklık	$T_{1ç}$	°C	64,9	Veri
Özgül ısı	c_p	kJ/kg °C	1,01	Termodinamik Tablo
Yoğunluk	ρ	kg/m^3	0,95	Termodinamik Tablo
Dinamik Vizkozite	μ	Pa.s	2,07E-05	Termodinamik Tablo
Isıl iletkenlik	k_1	W m °C	0,1080	Termodinamik Tablo
Prantl sayısı	Pr	-	0,697	Denklem (5.6)
Havanın hacimsel debisi	V_1	m^3/h	4.210,5	$V = m/\rho$

Tablo 5.3. Isı değiştirgecinde temiz hava (soğuk akışkan) verileri

TEMİZ HAVA (soğuk A.)		Birim	Miktar	Formül
Kütlesel Debi	$\dot{m}_2$	kg/h	3.900	Veri
Giriş Sıcaklık	T_{2g}	°C	25	Veri
Çıkış Sıcaklık	$T_{2ç}$	°C	65	Veri
Özgül ısı	c_p	kJ/kg °C	1,005	Termodinamik Tablo
Yoğunluk	ρ	kg/m^3	1,12	Termodinamik Tablo
Dinamik Vizkozite	μ	Pa.s	1,90E-05	Termodinamik Tablo
Isıl iletkenlik	k_2	W m °C	0,0944	Termodinamik Tablo
Prantl sayısı	Pr	-	0,728	Denklem (5.6)
Havanın hacimsel debisi	V_2	m^3/h	3482,1	$V = m/\rho$

Tablo 5.4. Isı değiştirgecinin tasarım parametreleri

PROSES PARAMETRELERİ		Birim	Miktar	Formül
Kanat hatvesi	-	adet/m	315	Ek-C
Kanat kalınlığı	δ	mm	0,33	Ek-C
Hidrolik çap	d_h	mm	3,633	Ek-C
Minimum Akış alanı / Ön alan	$A_{min}/A_{ön}$	-	0,534	Ek-C
Yüzey alanı yoğunluğu	β	m^2/m^3	587	Ek-C
Kanat alanı/Toplam alan	A_k / A	-	0,839	Ek-C
Kanat yüksekliği	L	mm	4,05	Ek-C
Kanat ısı iletim katsayısı (%19Cr-%10Ni)	$k_ç$	W m °C	68,4	Tablo B.1 [36]
Ön yüzey alanı	$A_{ön}$	m^2	0,6	$A_{ön}$=0,6x1,0
Minimum kesit	A_{min}	m^2	0,320	Veri

Bu veriler yardımıyla ısı değiştirgecinin örnek hesaplaması aşağıdaki adımlarda yapılmıştır.

$$w_{min} = \dot{m} / (\rho A_{min}) \tag{5.4}$$

w_1=1,11/(0,95) (0,320) =3,65 m/s ve w_2=1,08/(1,12) (0,320) =3,02 m/s bulunur.

$$Re = (w_{min} d_h) / (\mu / \rho) \tag{5.5}$$

Re_1= (3,65) (0,0036) / (2,07. 10^{-5}) / (0,95) = 608,6

Re_2= (3,02) (0,0036) / (1,9. 10^{-5}) / (1,12) = 646,5

St $(Pr)^{2/3}$ =0,0150 sayısı Ek-C 'den bulunur.

$$St = h / G c_p \qquad Pr = c_p \mu / k \tag{5.6}$$

$$h = 0{,}0150 (k / d_h) Re (Pr)^{1/3} \tag{5.7}$$

h_1=(0,0150) (0,1080 / 0,0036) (608,6) $(0,697)^{1/3}$ = 240,6 kJ/m^2h°C

h_2=(0,0150) (0,0944 / 0,0036) (646,5) $(0,728)^{1/3}$ = 226,7 kJ/m^2h°C

- Isı transfer alanı hesaplaması;

V= a b c = (0,6) (0,6) (1,0) =0,36 m^3 hacim bulunur.

A_1= β V = (587) (0,36) =211,3 m^2

- Kanat etkenliği hesaplaması Denklem (5.8) ve (5.9) ile yapılır;

$$m = \sqrt{2 h / \delta k} \tag{5.8}$$

$$\eta_{kanat} = \tanh(ml) / (ml) \tag{5.9}$$

$$m_1 = \sqrt{2 (240{,}6) / ((0{,}00033) (68{,}4))} = 146\ m^{-1}$$

$$\eta_{kanat1} = \tanh\left((146)\,(0{,}00405)\right)/\left((146)\,(0{,}00405)\right) = 0{,}898$$

$$m_2 = \sqrt{2\,(226{,}7)\,/\,\left((0{,}00033)\,(68{,}4)\right)} = 141{,}7\ m^{-1}$$

$$\eta_{kanat2} = \tanh\left((141{,}7)\,(0{,}00405)\right)/\left((141{,}7)\,(0{,}00405)\right) = 0{,}903$$

- Kanatlı Yüzey toplam etkenliği hesaplaması Denklem (5.10) ile yapılır;

$$\eta_{yüzey} = 1 - \frac{A_k}{A}\left(1 - \eta_{kanat}\right) \tag{5.10}$$

$$\eta_{yüzey,1} = 1 - 0{,}839\ (1 - 0{,}898) = 0{,}914$$

$$\eta_{yüzey,2} = 1 - 0{,}839\ (1 - 0{,}903) = 0{,}919$$

Bu yüzeylere göre tanımlanmış toplam ısı geçiş katsayısı, Denklem (5.11) ile hesaplanır.

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{1}{\eta_1 h_1}\right)\left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \left(\frac{1}{\eta_2 h_2}\right) \tag{5.11}$$

K= 107 kJ/(m^2hºC) bulunur. Denklem (5.3) yardımıyla A hesaplanır.

A= (162.045) / (107) (39,9) =38 m^2

- Basınç Kaybı Denklem (5.12) ile hesaplanır; $\lambda_1 = 0{,}032$ Sürtünme katsayısı Ek-C tablosundan bulunur.

$$\Delta P = \left(m/A_{min}\right)^2 \Big/ \rho\left(\left(\varsigma_d + 1 - \left(A_{min}/A_{ön}\right)^2\right) + \lambda\left(A/A_{min}\right) - \left(1 - \varsigma_d - \left(A_{min}/A_{ön}\right)^2\right)\right) \tag{5.12}$$

ς = daralmadaki ve genişlemedeki yerel kayıp katsayısı olarak alınarak; $\varsigma_d = 0{,}7$ ve $\varsigma_g = 0{,}0$ değerleri Ek-D 'den bulunur.

$\Delta P_1 = 276$ Pa, $\Delta P_2 = 216$ Pa bulunur.

- Havanın hareketini ısı değiştirgecinde sağlamak için gerekli fan gücü Denklem (5.13) ile hesaplanır;

$$P = m(\Delta p)_i / \rho \eta \quad (5.13)$$

P_1= (1,11) (276) / ((0,95) (0,914)) = 353,2 W güç gerekir.

P_2= (1,08) (215,8) / ((1,12) (0,919)) = 227,3 W güç gerekir.

- Isı değiştirgecinin çapraz akımda etkenliği Denklem (5.14) ile hesaplanır;

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[\frac{1}{c} N^{0,22} \exp\left(-CN^{0,78} - 1\right)\right] \quad (5.14)$$

Havanın C ısıl kapasite debileri ve N boyutsuz Geçiş birimi sayısı hesaplanır.

$$C = \dot{m} c_p \quad (5.15)$$

C_1= (1,11) (1,01) = 1,12 kW/°C

C_2= (1,08) (1,005) = 1,09 kW/°C

$$N = A K / C_{min} \quad (5.16)$$

N= (37,9) (30) / 1,09 =1,04

$\varepsilon = 0,48$

elde edilmiştir. Diğer sıcaklıklar için yapılan hesaplamalar Tablo 5.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Baca gazı diğer çıkış sıcaklıklarından yapılan tasarruf miktarı

m (kg/h)		HAVA ISITICI SICAKLIK T (°C)		BACA GAZI SICAKLIK T (°C)		Q Tasarruf Edilen Isı	Δtm	A	ε
Dış hava	Baca gazı	Dış hava	Çıkış	Giriş	Çıkış	kJ/h	°C	m^2	etkenlik
3.900	4.000	25	35	105	95,0	40.365,0	70,0	5,4	0,12
3.900	4.000	25	50	105	79,9	101.400,0	55,0	17,2	0,31
3.900	4.000	25	65	105	64,9	162.045,0	39,9	37,9	0,48
3.900	4.000	25	90	105	40,0	262.470,0	15,0	163,4	0,75
3.900	4.000	25	100	105	31,0	299.130,0	5,5	511,5	0,84

Isı değiştirgeci maliyet hesaplaması;

Sistemin ömrü 15 yıl, faiz oranı %6 ve buharın fiyatı 20 $/ton, ısı değiştirgecinin birim yüzey maliyeti 50 $/$m^2$, sistem günde 24 saat, yılda 350 gün çalışmaktadır.

1-) Yüzey alan maliyeti hesaplaması;

$F_{yatırım}$ = Amortisman × yüzey alanı × birim yüzey alan maliyeti (5.17)

Amortisman hesaplaması Denklem (5.18) ile yapılmıştır. Sistemin ömrünü (n), faiz oranını (i) göstermektedir;

$$\text{Amortisman} = i/\left(1-(1+i)^{-n}\right) \quad (5.18)$$

Amortisman= 0,103

$(F_{yatırım})_{65}$ = (0,103) (37,9) (50) = 195,2 $/yıl

2-) İşletme maliyeti hesaplaması; Isıtılacak sıcaklık değerleri için kurutucu için gereken enerji miktarı ve işletme maliyeti Denklem (5.19) ile hesaplanır.

$$\left(Q_{buhar}\right)_{65} = \dot{m}_{buh}\left(h_{bg} - h_{bç}\right) = \dot{m}_{h}\left(h_{65} - h_{25}\right)$$

$$\left(Q_{buhar}\right)_{65} = (3.900)\ (99,85 - 58,3) = 162.045 \text{ kJ/h}$$

Buhar Birim maliyeti = 0,02 $/Kg

Tasarruf edilen buhar miktarı $\dot{m} = 79,1$ kg/h;

$F_{iş}$ = ($\dot{m}_{buhar}$) × (saat) × (yıl) × (yakıtın fiyatı) (5.19)

$(F_{iş})_{65}$ = 104.304 $/yıl

3-) Fan Teorik Elektrik Tüketimi hesaplaması;

Elektrik Birim maliyeti = 0,05 $/Kw

Fan Enerji Sarfiyatı ~ 1,0 Kw

Yıllık Çalışma Saati = 8.400 h, (350gün×24saat)

Yıllık Enerji Sarfiyatı = 8.400 kW

Yıllık maliyet = 420 $

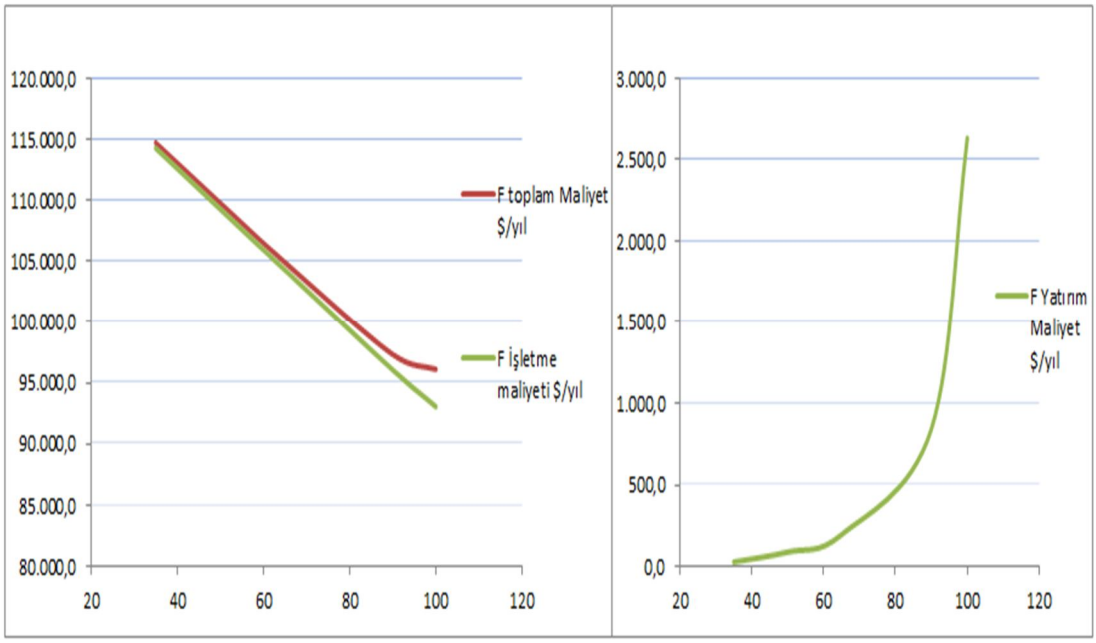
4-) Toplam maliyet hesaplaması; Tüm maliyetler Denklem (5.20) ile hesaplanmıştır.

$$F_{toplam} = F_{yatırım} + F_{iş} + F_{fan} \quad (5.20)$$

Diğer sıcaklıklar için yapılan hesaplamalar Tablo 5.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. Baca gazı ısı değiştirgeci ile ilgili maliyetler

Kurutucuya verilen sıc. °C	Q tasarruf kJ/h	Fan Maliyet $/yıl	F yatırım $/yıl	F iş $/yıl	F toplam $/yıl	Tassarruf $/yıl
35	40.365,0	420,0	27,7	114.288,0	114.735,7	3.312,0
50	101.400,0	420,0	88,8	109.280,0	109.788,8	8.320,0
65	162.045,0	420,0	195,2	104.304,0	104.919,2	13.296,0
90	262.470,0	420,0	841,0	96.064,0	97.325,0	21.536,0
100	299.130,0	420,0	2.633,5	93.056,0	96.109,5	24.544,0



Şekil 5.4. Cihazın farklı sıcaklıklara göre maliyet grafikleri

Yıllık tasarruf miktarı;

Amacımız, ön ısıtma ile kurutucuya verilen hangi sıcaklığın yatırım ve işletme maliyetlerinin toplamının daha az olduğunun bulunmasıdır. En uygun çıkış sıcaklığı 90 °C baca gazı ısısından yararlanmak olarak görülmektedir Çünkü 90 °C sıcaklık için yatırım maliyetleri en düşük olandır ve ısıl tasarruf yüksektir.

5.2. İyileştirme Sonrası Enerji ve Ekserji Dengesi

Yapılan iyileştirme çalışmaları sonucunda öngörülen sıcaklık değişimleri ve ısı tasarruf olanakları sonucunda değişen enerji ve ekserji dengesi Tablo 5.7. ve 5.8.'de verilmiştir.

Enerji tasrrufu tedbirleri uygulandıktan sonraki yeni beslenen buhar miktarı 450 kg/h kabul edilerek enerji ve ekserji değerleri tekrardan hesaplanmıştır. Fan devirlerinin %95 kapasiteden %80 kapasite çalışmaya düşürülmesi hesaplamalara katılmıştır. Ayrıca giriş hava debisi 4.180 kg/h ve çıkış havası sıcaklık aynı ama bağıl nem değerleri %14, %10 ve %15 olarak elde edilmiştir.

Hava giriş sıcaklığı reküperatör kullanıldığı zaman en uygun olarak elde edilen 90 °C için enerji dengesi tekrar kurulmuştur.

Tablo 5.7. Enerji verimliliği tedbirleri uygulandıktan sonra enerji dengesi

MALZEME	KÜTLE (m) (kg / h)		SICAKLIK (T) (K)		C_p	Δh(kJ/kg)		ENERJİ AKIŞI (kJ/h)	
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	kJ/(kg-K)	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
1. Baca Hava Tahliye	4.180	1.719	363	378	-	99,4	409,6	415.600,5	704.082,5
2. Baca Hava Tahliye		1.675		388	-		424,9		711.575,3
3. Baca Hava Tahliye		608		333	-		83,8		50.916,7
Akrilik Tow	635	635	308	338	1,3	13,0	52,0	8.255,0	33.020,0
Taşıyıcı Paletler	6.780	6.780	317	338	0,46	8,7	18,4	59.257,2	124.752,0
Akrilik Tow ile taşınan su	190	10	308	338	4,18	41,8	167,2	7.942,0	1.672,0
W (fanla beslenen enerji)								95.760,0	
Q buhar	450					2.745,0		1.235.250,0	
Q kondens		450					314,0		141.300,0
TOPLAM								1.822.064,7	1.767.318,5

Enerji dengesinden kayıp enerji: $Q_{kayıp}$= 54.746,2 kJ/h

Tablo 5.8. Enerji verimliliği tedbirleri uygulandıktan sonra ekserji dengesi

	Enerji Akışı(mΔh) (kJ/h)		ÇEVRE	Entropi D. mTo(s-so)(kJ/h)		Ekserji Akışı (kJ/h)	
	Giriş	Çıkış	SIC.(K)	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
1. Baca Tahliye	415.600,5	704.082,5	298	313.790,6	563.840,9	101.809,9	140.241,6
2. Baca Tahliye		711.575,3	298		558.879,9		152.695,4
3. Baca Tahliye		50.916,7	298		48.966,3		1.950,4
Akrilik Tow	8.255,0	33.020,0	298	8.119,5	30.984,2	135,5	2.035,8
Taşıyıcı Paletler	59.257,2	124.752,0	298	57.444,8	117.060,5	1.812,4	7.691,5
Akrilik Tow ile taşınan su	7.942,0	1.672,0	298	7.811,7	1.568,9	130,3	103,1
Wfan	95.760,0		298			95.760,0	
Wbuhar	1.235.250,0		298	864.918,2		370.331,8	
Wkondens		141.300,0	298		126.308,8		14.991,2
Wkayıp		54.746,2	298		52.122,6		2.623,6
TOPLAM	1.822.064,7	1.822.064,7		1.252.084,7	1.499.731,9	569.980,0	322.332,7

$E_{yıkımı}$ = 569.980,0 – 322.332,7 = 247.647,2 kJ/h

olarak hesaplanmıştır.

6. ELDE EDİLEN BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞILMASI

İyileştirme yöntemleri uygulandıktan sonra kurutucu için öngörülen kazanım değerleri aşağıdaki tablolarda özetlenmiştir.

Tablo 6.1. İyileştirme yöntemleri sonucunda elde edilen işletme kazançları

İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	ISIL TASARRUF Q (kJ/h)	%90 verim Q tasarruf(kJ/h)	BUHAR TASARRUF (kg/h)	BUHAR TASARRUF (ton/ay)	KAZANIM ($/ay)
Baca Gazı Isının geri kazanımı	262.470	250.003	122	88	1.758
Yalıtım ile Isı Kazanımı	55.934	53.137	26	19	373
Duruştan Isı Kazanımı	245.700	233.415	114	82	1.639
Klapeden Isı Kazanımı	69.245	65.782	32	23	462
Serpantinden ısı Kazanımı	8.040	7.638	4	3	54
Fan devir düşüm kazanımı	54.180	51.471	0	0	753
Toplam	695.569	661.446	298	214	5.038

İyileştirme yöntemleri sonucunda yapılan yatırımların geri ödeme süreleri belirlenmiştir.

$$GÖS = F_y / F_k \quad (5.21)$$

GÖS= Geri ödeme süresi

F_y =Enerji tasarrufu için yapılan yatırım

F_k =Enerji tasarrufundan elde edilen kazanç

Tablo 6.2. İyileştirme yöntemleri sonucunda yatırımın geri ödeme süreleri

İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	YATIRIM ($)	KAZANIM ($/ay)	GERİ ÖDEME SÜRESİ (AY)
Atık Isı kazanımı	25.557	1.758	15
Yalıtım ile Isı Kazanımı	5.000	373	13

6.1. İyileştirme Sonrası Verimlilik Sonuçları

Verim iyileştirme çalışmaları ve yöntemleri uygulandığı zaman termodinamiğin I. kanuna ve II. kanuna göre yeni verimler tekrar hesaplandığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

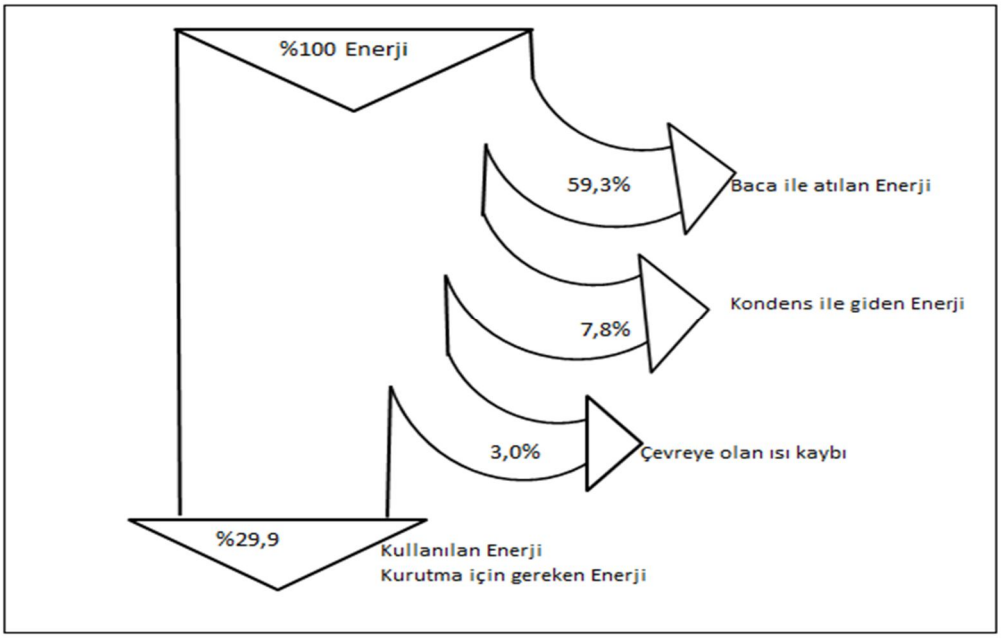
$$\eta_I = \frac{545.364}{1.822.064,7} = \%29,9 \ , \qquad \eta_{II} = \frac{304.717,9}{569.980,0} = \%53,5$$

Bu verim iyileştirmeleri ciddi miktarda enerji tasarrufu ve dolayısıyla kurutma maliyetinde azalma sağlayacaktır.

İyileştirme sonucu termodinamiğin I. kanun ve ekserji analizi sonuçlarının sankey diyagramları aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.3. İyileştirme sonrası I. kanun sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler

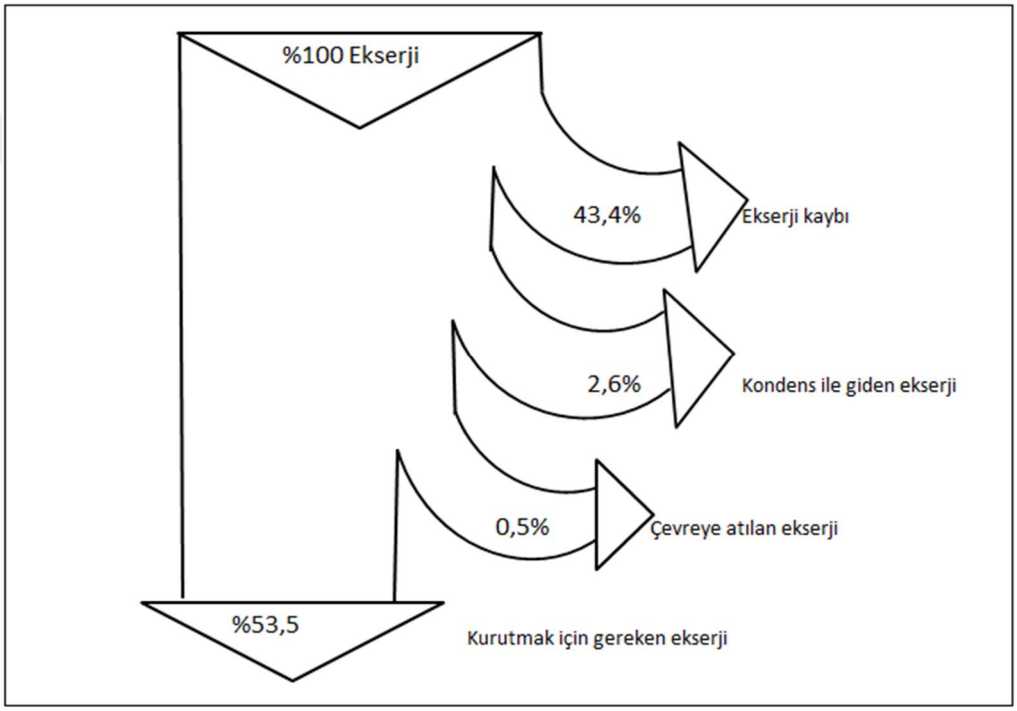
I. KANUN		(kJ/h)	%
Enerji Girdisi	AID	1.822.064,7	100,0
Baca Gazı ile atılan Enerji	Q bg	1.080.654,5	59,3
Kondens ile giden Enerji	Q kon.	141.300,0	7,8
Çevreye olan Isı kaybı	Q_o	54.746,2	3,0
Kurutma için gereken enerji	Q tow	545.364,0	29,9



Şekil 6.1. Tow kurutucusunun iyileştirme sonrası için enerji sankey diyagramı

Tablo 6.4. İyileştirme sonrası ekserji sankey diyagramının hazırlanmasında esas alınan değerler

II. KANUN	kJ/h	%
Ekserji Girdisi	569.980,0	100,0
Kurutma için gereken Ekserji	304.717,9	53,5
Ekserji kaybı	247.647,2	43,4
Kondens ile gidenEkserji	14.991,2	2,6
Çevreye olan ısı kaybı	2.623,6	0,5
Ekserji kaybı	247.647,2	43,4



Şekil 6.2. Tow kurutucusunun iyileştirme sonrası için ekserji sankey diyagramı

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Akrilik elyaf kurutucusunun termodinamiğin I. kanunu ve ekserji analizleri yapılmıştır. Mevcut durumda tow kurutucusunun termodinamiğin I. kanuna göre %22,2 ve ekserji analizine göre %33,1 verimleri elde edilmiştir. Kurutucu için düşünülen kurutucunun bacasından atılan sıcak havadan enerji geri kazanımı, sıcak yüzeylerinin yalıtılması, kurutucu duruş süresinin azaltılması ve serpantin yüzeyi temizlenmesi gibi verim iyileştirme yöntemleri uygulanması sonucunda elde edilen tasarruf miktarlarıyla verimler tekrar değerlendirildiğinde I. kanuna göre %29,9 ve ekserji analizine göre %53,5 verim değerleri elde edilmiştir. Bu durumda kurutucunun I. kanun verimi %35 ve ekserji verimi de %61 iyileştirilmiştir. Ayrıca ekonomik değerlendirme sonucu kurutucu bacasından atılan enerjinin geri kazanılması için yapılan yatırım ve kurutucu sıcak yüzeylerinin yalıtımı için yapılan yatırım kendisini 15 ay gibi kısa bir sürede geri ödeyebilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Günerhan H., Endüstriyel kurutma sistemleri, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi,* 2005, **13**, 1-11.

[2] Akarslan F., Dokuma kumaşların kuruma hızı değerlerinin bulanık mantık metodu ile belirlenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Müh.Mimarlık Fakültesi, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi(2),* 2007, **2**, 15-23.

[3] Oğulata T., Tekstilde kurutma yöntem ve makinaları, *IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 04 Kasım 1999.

[4] Akyol U., İplik bobinin kurutulmasının teorik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Makina Mühendisliği AnaBilim Dalı, Edirne, 2007, 0058901.

[5] Başer İ., Elyaf bilgisi, *Marmara Üniversitesi Yayını,* 687, 1-12, 2002.

[6] Gupta V. B., Kothari V. K., *Manufactured Fibre Technology*, 1st ed., Published Chapman&Hall, Delhi, 1997.

[7] Pan N., Gibson P., *Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials*, 1st ed., Woodhead Publishing, Cambridge, 2006.

[8] Kudra T., Mujumdar A. S., *Advanced Drying Technologies*, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 2002.

[9] Aghbashlo M., Mobli H., Rafiee S., Madadlou A., A Review on exergy analysis of drying processes and systems, *Energy Conversion and Management*, DOI:10.1016/j.rser.2013.01.015.

[10] Prommas R., Energy and exergy analyses in drying process of unsaturated porous media (Convective drying and microwavw drying), Doktora tezi, Thammasat University, Department of Mechanical Engineering, Bangkok 2010, 2553.

[11] Dincer I., Rosen M. A., Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* DOI: 10.1016/er.2004.02.002.

[12] Aviara N. A., Onuoha N., Falola E., Igbeka J. C., Energy and exergy analysis of native cassava starch drying in a tray dryer, *Energy*, DOI: 10.1016/j.energy.2014.06.087.

[13] Syahrul S., Hamdullahpur F., Dinçer I., Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles, *International Journal of Energy Research*, DOI: 10.1002/er.799.

[14] Dincer I., Sahin A. Z., A New model for thermodynamic analysis of a drying Process, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.013.

[15] Holmberg H., Ahtila P., Evaluation of energy efficiency in biofuel drying by means of energy and exergy analyses, *Applied Thermal Engineering* DOI: 10.1016/j.app.2005.04.005.

[16] Özgener L., Özgener O., Exergy analysis of industrial pasta drying process, *International Journal of Energy Research,* DOI: 10.1002/er.1227.

[17] Mançuhan E., Yaş tuğla kurutulan bir tünel kurutucuda enerji ve ekserji analizi, *TMMOB MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 2011, **120**, 35-42.

[18] Coskun C., Bayraktar M., Oktay Z., Dincer I., Energy and exergy analyses of an industrial wood chips drying process, *International Journal of Low-Carbon Technology,* DOI: 10.1093/ijlct/ctp024.

[19] Chen Y., Wan J., On energetic, Influence of drying temperature and duration on fiber properties of unbleached wheat straw pulp, *Carbohydrate Polymers,* DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.03.041.

[20] Cay A., Tarakcioglu I., Hepbasli A., Exergetic performance assessment of a stenter system in a textile finishing mill., *International Journal of Energy Research,* DOI: 10.1002/er.1295.

[21] Cay A., Tarakcioglu I., Hepbasli A., A study on the exergetic analysis of continuous textile dryer, *International Journal of Exergy,* DOI: 10.1504/IJEX.2009.025348.

[22] Cay A., Tarakcioglu I., Hepbasli A., Exergetic analysis of textile convective drying with stenters by subsystem models: part 1- exergetic modeling and evaluation, *Drying Technology,* DOI:10.1080/07373937.2010.482695.

[23] Cay A., Tarakcioglu I., Hepbasli A., Exergetic analysis of textile convective drying with stenters by subsystem models: part 2- parametric study on exergy analysis, *Drying Technology,* DOI:10.1080/07373937.2010.482696.

[24] Çengel Y. A., Boles M. A., *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik,* 7st ed., Palme Yayıncılık, Ankara, 2013.

[25] Başkent Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Deney-2 Psikrometrik İşlemlerde Enerji ve Kütle Dengesi, http://baskent.edu.tr/ (Ziyaret tarihi: 05 Mayıs 2015)

[26] Moran M. J., *Engineering Thermodynamics*, 7th ed., Wiley Publishing, Ohio USA, 2010.

[27] Bejan A., *Advanced Engineering Thermodynamics,* 3rd ed., Wiley Publishing, USA, 2006.

[28] Dincer I., Rosen M. A., *Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development,* 1st ed., Elsevier, USA, 2007.

[29] Öztürk A., Kılıç A., *Termodinamik ve Isı Geçişi Tabloları*, 2nd. ed., Çağlayan kitabevi, Istanbul, 2000.

[30] TS EN ISO 12241, Yalıtım Standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2008.

[31] Karakoç T. H., Karakoç N. (Ünite 1, 2, 5), Erbay B. (Ünite 3, 4), Exergy analizi, *T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını*, 2486, 4-171, 2012.

[32] Kotas T. J., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, 1st ed., Krieger Publishing Company, Florida, 1995.

[33] Incropera F., DeWitt D., Bergman T., Lavine A., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed., Wiley Publishing , USA, 2011.

[34] Eckert E. R. G., Drake R., *Analysis of Heat and Mass Transfer*, 1st ed., McGraw-Hill Book Campany, New York, 1972.

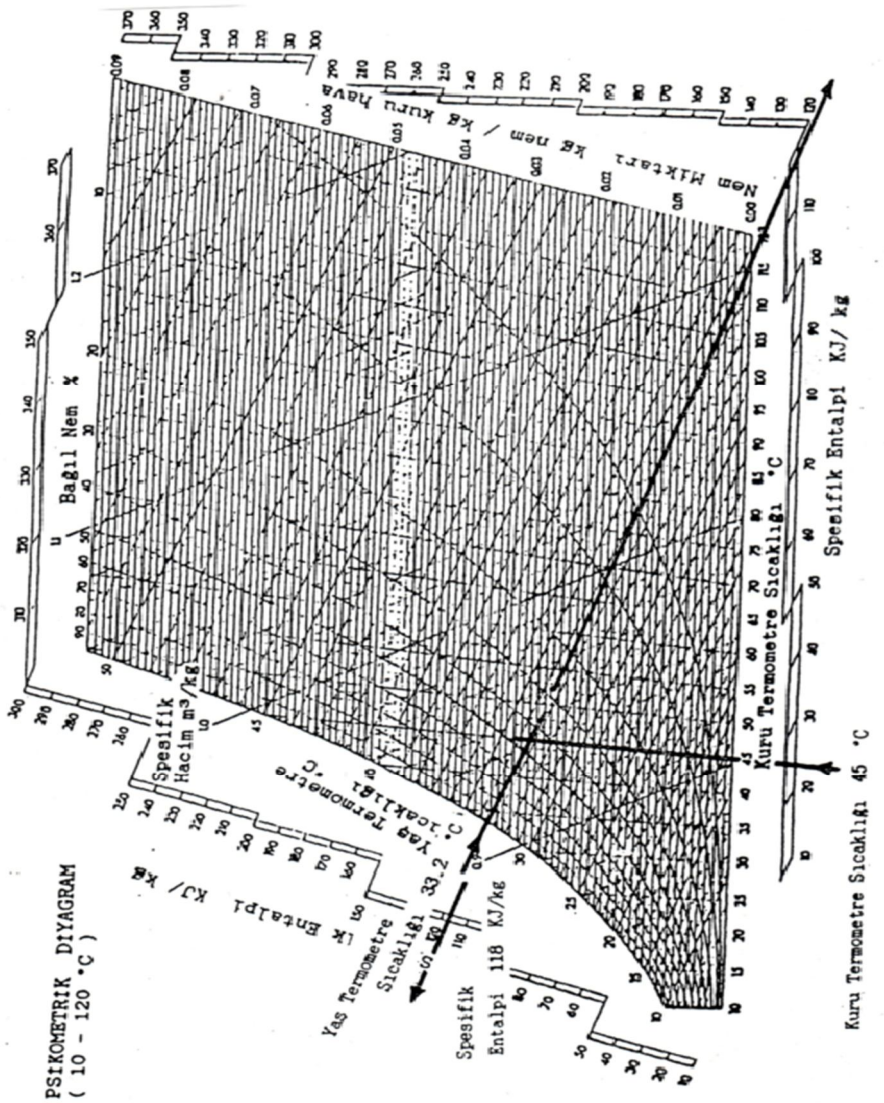
[35] Williams-Gardner A., *Industrial Drying*, 1st ed., Gulf Publishing Company, Texas, 1977.

[36] Genceli O., *Isı Değiştiricileri,* 1st ed., Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.

[37] Özışık M. N., *Heat Transfer a Basic Approach*, 1st ed., McGraw-Hill Book Company, San Francisco, 1985.

EKLER

EK-A



Şekil A.1. Kurutma Proseslerinde Kullanılan Psikrometrik Diyagram

EK-B

ÖLÇÜMDE KULLANILAN CİHAZLARIN TEKNİK ÖZELLİKLERİ VE KALİBRASYONU

Kurutucunun Termodinamik analizinde kullanılan ölçüm verileri alınmadan önce ölçüm noktaları belirlenmiş ve bu değerleri ölçmek için kullanılan cihazların kalibrasyonu ve doğruluğu yaptırılmıştır.

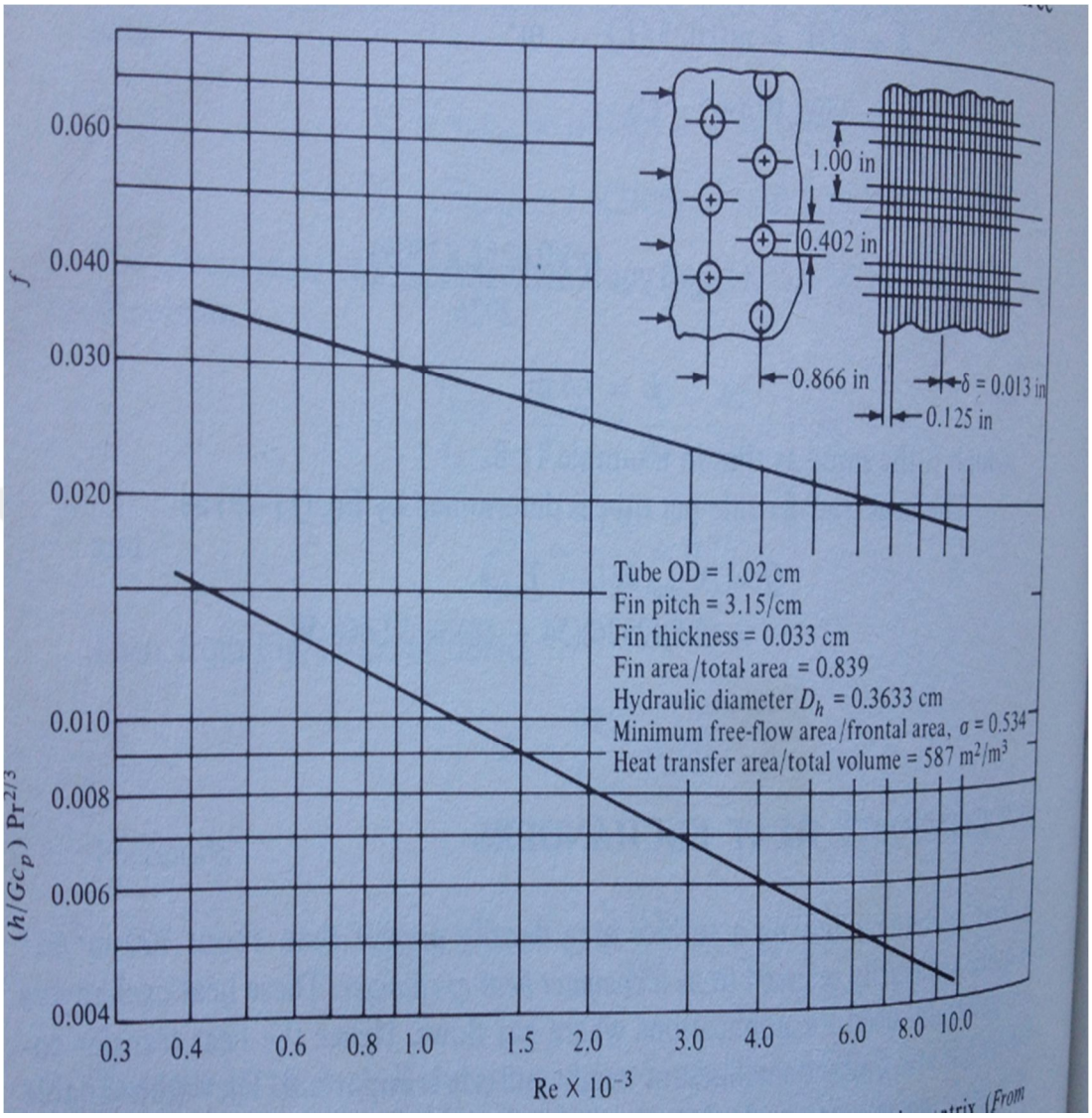
KIMO AMI 300 portatif test, ölçüm cihazı: Kurutucunun bacasından atılan nemli havanın debisi (m^3/kg), kuru termometre sıcaklığı (°C) ve bağıl nemi (%) ölçülmüştür. Cihazın kalibrasyonu ölçümlere başlamadan önce RAM ölçüm ve kontrol sistemleri firmasına gönderilerek kalibrasyonu yaptırılmıştır. Kalibrasyonda kullanılan ortalama sapma (m/s)= 0,05 , Belirsizlik (m/s)= ± 0,296 dur.

Termal Kamera : Kurutucu yüzeylerinin sıcaklıkları testo 875 marka termal kamera ile ölçülmüştür. Termal kameranın kalibrasyonu ölçümlere başlamadan önce kalibrasyonu testo firmasına yaptırılmıştır. Kalibrasyon 23±3°C ve %45±20 bağıl nem laboratuvar şartlarında yapılarak Belirsizlik (°C) = ± 1,19 dur.

Endress Hauser sayaçları: Kurutuculardа tüketilen buhar miktarını ölçmek için 3 makinaya yeni sayaçlar takılmıştır. Kullanılan buharın sıcaklık (°C) ve tüketim (kg/h) değerleri ölçülmüştür. Makinaya takılmadan önce sayaçların kalibrasyonları Endress hauser firmasına yaptırılmıştır.

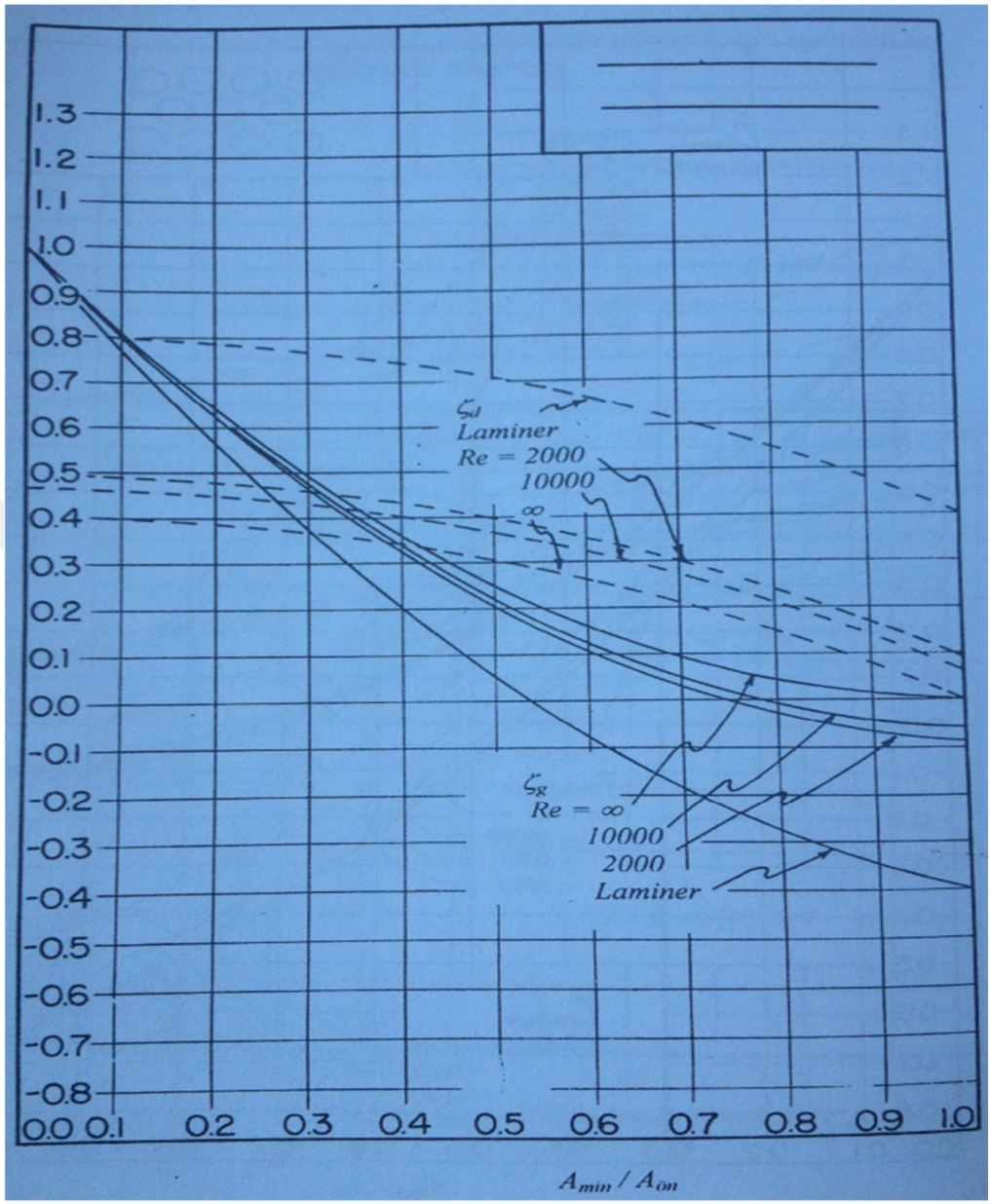
Teraziler: Kurutucuya giren malzemelerin ağırlıkları mettler-toledo terazileri ile ölçülmüştür. Akrilik elyafın nem değerleri (ıslak ağırlık-kuru ağırlık / kuru ağırlık) kütlesel % si ölçülmüştür. Teraziler her yıl TSE tarafından kalibre edilmekte, her ay standart ağırlıklar ile doğrulamaları yapılmaktadır.

EK-C



Şekil C.1. Palkalı kanatlı Isı Değiştiricilerde Isı Transferi ve Sürtünme faktörü (Kays and London tarafından çalışılmış değerler tablosu) [37]

EK-D



Şekil D.1. Isı Değiştiricilerde Dikdörtgen Kesitli Kanala giriş ve çıkış basınç kayıpları (Kays and London tarafından çalışılmış değerler tablosu) [36]

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] **Sunar G.**, Öztürk İ.,Akrilik Tow Elyaf Kurutucusunun Termodinamik Analizi, *20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 2-5 Eylül 2015.

ÖZGEÇMİŞ

20/12/1967 yılında Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'de tamamladı. 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1993 yılında Aktops Tekstil San. A.Ş. firmasında Kalite mühendisi olarak göreve başladı. 1999 yılında Aktops Boyahane şefi olarak 2012 yılına kadar çalıştı. 2012 yılında Proses ve Ürün Geliştirme yöneticiliğine atandı. Aksa ve Aktops şirketlerinin birleşmesiyle 2014 yılından beri Aksa Akrilik Kimya San. A.Ş. firmasında Kalite, Ürün ve Proses Geliştirme yöneticisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

2013-2016 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.