

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HELEZON KONVEYÖR TİPİ KURUTUCUDA ODUN
PARÇACIKLARININ KURUTULMASININ DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Özgür KAPLAN

KOCAELİ 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

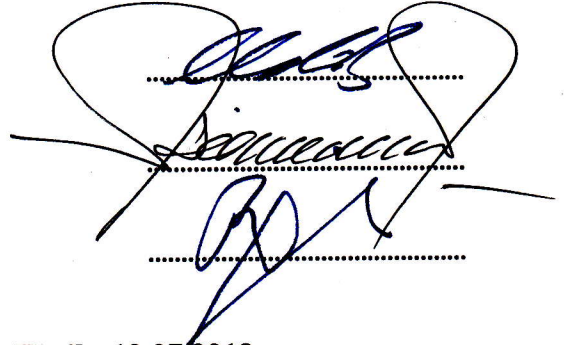
HELEZON KONVEYÖR TİPİ KURUTUCUDA ODUN
PARÇACIKLARININ KURUTULMASININ DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ

Özgür KAPLAN

Yrd.Doç.Dr.Cenk ÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr.H.İbrahim SARAÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr.Hasan Rıza GÜVEN
Jüri Üyesi, İstanbul Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 12.07.2012

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Fosil yakıtların gittikçe azalması ve sera gazı emisyonlarının iklimi olumsuz yönde etkilemesi, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki çalışmaları hızlandırmıştır. Biyokütle, karbon nötr ve sürdürülebilir bir kaynak olması bakımından günümüzün en önemli yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyokütlenin biyokütle yakma santrallerinde yakılması sırasında yüksek verim ve düşük emisyon değerleri elde edilebilmesi için kurutulması gerekmektedir. Bu çalışmada, kızılçam ağacı (pinus brutia) odun parçacıklarının helezon konveyör tipi bir kurutucudaki kuruma prosesi deneysel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmalar sırasında desteklerini esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Cenk ÇELİK'e, deneysel çalışmalarda yardımcı olan Prof. Dr. Awf AL KASSİR, Doç. Dr. Hayati OLGUN, Prof. Dr. H. İbrahim SARAÇ, Prof. Dr. H. Şinasi ONUR, Yük. Kimya Müh. Berrin BAY ve Doç. Dr. K. Süleyman YİĞİT'e, TÜBİTAK MAM Yakma ve Gazlaştırma Laboratuvarı teknisyenlerine, tezin yazımı sırasında destek olan arkadaşlarım Arş. Gör. Erkutay TAŞDEMİRCİ, Arş. Gör. Mert TÜKEL, Jeoloji Müh. Fatma TÜKEL, Endüstri Müh. adayı Nuriye KALEM, Kocaeli Üniversitesi Korumalı Futbol Takımı Oyuncularına ve Baş Antrenörü Sn. William Neuheisel'e, çalışmayı finanse eden TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'ne teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca sürekli yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Babam Makine Müh. Mehmet KAPLAN, Annem Güler KAPLAN ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2012

Özgür KAPLAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELEr DİZİNİ VE KISALTMALAR	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Literatür Taraması	3
1.2. Odunun Fiziksel Özellikleri	5
1.2.1. Nem oranı	5
1.2.2. Yoğunluk	5
1.2.3. Isıl iletkenlik.....	5
1.2.4. Özgül ısı.....	6
1.2.5. Isıl yayılım katsayısı	7
2. KURUTMA TEORİSİ	8
2.1. Kurutmanın Aşamaları	9
2.1.1. Isınma aşaması.....	9
2.1.2. Sabit hız aşaması.....	10
2.1.3. Azalan hız aşaması	10
2.2. Kurutma Havaasının Özellikleri	10
2.2.1. Yaş ve kuru termometre sıcaklığı.....	10
2.2.2. Özgül nem.....	11
2.2.3. Mutlak nem.....	11
2.2.4. Bağıl nem.....	11
2.2.5. Entalpi	12
2.2.6. Çiğ noktası.....	12
2.2.7 Psikrometrik diyagram.....	13
2.3. Kurutma Prosesinde Isı ve Kütle Dengesi.....	15
2.3.1. Sürekli kurutucu.....	15
2.3.2. Süreksiz kurutucu	19
3. ENDÜSTRİYEL KURUTMA SİSTEMLERİ.....	21
3.1. Döner Kurutucular.....	21
3.2. Tamburlu Kurutucular	22
3.3. Akışkan yataklı kurutucular	23
3.4. Sprey kurutucular	24
3.5. Pnömatik (Flaş) kurutucular	25
3.6. Mikrodalga ve Dielektrik Kurutma	26
3.7. Kabinli Kurutucular.....	27
3.8. Tünel Kurutucular	28
3.9. Konveyör Kurutucular.....	29
3.10. Dondurarak Kurutma.....	29

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
5. DENEYSEL VERİLERİN İRDELENMESİ	37
5.1. Kurutma Havaı Sıcaklığının Kurutma Prosesine Etkisi	37
5.2. Kurutma Havaı Debinin Kurutma Prosesine Etkisi	38
5.3. Kurutma Şeklinin Kurutma Prosesine Etkisi.....	40
5.4. Kuruma Eğrileri.....	41
5.5. Emisyonlar.....	46
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	53
ÖZGEÇMİŞ	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Tipik kurutma eğrisi.....	9
Şekil 2.2.	Psikrometrik diyagramda eğriler	13
Şekil 2.3.	Deniz seviyesinde havanın psikrometrik diyagramı	14
Şekil 2.4.	Eş yönlü sürekli kurutucu	15
Şekil 2.5.	Zıt yönlü sürekli kurutucu	19
Şekil 2.6.	Süreksiz kurutucu	19
Şekil 3.1.	Direkt döner kurutucunun basitleştirilmiş diyagramı	21
Şekil 3.2.	Üstten beslemeli bir çift tamburlu kurutucu	22
Şekil 3.3.	Tipik bir akışkan yataklı kurutucu	23
Şekil 3.4.	Tipik bir spreysel kurutucu	24
Şekil 3.5.	Tipik bir pnömatik kurutucu	25
Şekil 3.6.	Kabinli kurutucu	27
Şekil 3.7.	Tünel kurutucu	28
Şekil 3.8.	Dondurarak kurutma	30
Şekil 4.1.	Deney setinin şematik gösterimi	31
Şekil 4.2.	Deney setinin yandan görünüşü	32
Şekil 4.3.	Helezonun ölçüleri	33
Şekil 4.4.	Helezon konveyör ve dağıtıcı botular (yalıtımsız hal)	33
Şekil 4.5.	Helezon konveyör ve dağıtım boruları (yalıtlı hal)	35
Şekil 4.6.	Bilgisayar bağlantısı şeması	36
Şekil 5.1.	Kurutma havası sıcaklığına göre son numunelerin nem oranları	38
Şekil 5.2.	Kurutma havası debisine göre son numunelerin nem oranları	39
Şekil 5.3.	Kurutma şekline göre son numunelerin nem oranları.....	40
Şekil 5.4.	20 m ³ /h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda nem eğrileri	42
Şekil 5.5.	20 m ³ /h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri	42
Şekil 5.6.	20 m ³ /h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda nem eğrileri.....	43
Şekil 5.7.	20 m ³ /h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri	43
Şekil 5.8.	30 m ³ /h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda nem eğrileri	44
Şekil 5.9.	30 m ³ /h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri	44
Şekil 5.10.	30 m ³ /h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda nem eğrileri.....	45
Şekil 5.11.	30 m ³ /h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri	45

TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. Vana konumuna göre kurutucunun çalışma şekli	34
Tablo 4.2. Termo elemanların kurutma şekline göre ölçtüğü sıcaklıklar	36
Tablo 5.1. ASTM E-1755 analizi sonuçları (kütlece %, kuru bazda)	48

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Odunun ısı iletkenlik katsayısının hesaplanması için gerekli katsayı 1
B	: Odunun ısı iletkenlik katsayısının hesaplanması için gerekli katsayı 2
C	: Odunun ısı iletkenlik katsayısının hesaplanması için gerekli katsayı 3
c_p	: Özgöl ısı, (kJ/kgK)
E	: Enerji, (kJ)
\dot{E}	: Birim zamanda geçen enerji, (kW)
e	: Mutlak nem
h	: Entalpi, (kJ/kgK)
k	: Isıl iletim katsayısı, (W/mK)
m	: Kütle, (kg)
\dot{m}	: Kütleli debi, (kg/h)
P	: Basınç, (kPa)
Q	: Isı, (kJ)
\dot{Q}	: Birim zamanda geçen ısı, (kW)
R	: İdeal gaz sabiti, (kJ/kgK)
T	: Sıcaklık, (°C, K)
V	: Hacim, (m ³)
w	: Nem oranı, (%)
α	: Isı yayılım katsayısı, (m ² /sn)
v	: Özgöl hacim, (m ³ /kg)
ρ	: Yoğunluk, (kg/m ³)
φ	: Bağlı nem, (%)
Δm	: Kurutma prosesi boyunca kaybedilen kütle, (kg)

Alt indisler

b	: Toplam buhar
b1	: Giriş hava nemi
b2	: Çıkış hava nemi
bio,giriş	: Kurutucu biyokütle girişi
bio,çıkış	: Kurutucu biyokütle çıkışı
bio,kuru	: Kuru biyokütle
bio,kuru1	: Kuru biyokütle girişi
bio,kuru2	: Kuru biyokütle çıkışı
buhar	: Su buharı
hava	: Toplam hava
h,çıkış	: Kurutucu hava çıkışı
h,giriş	: Kurutucu hava girişi
h,kuru	: Kuru hava
h,kuru1	: Kuru hava girişi
h,kuru2	: Kuru hava çıkışı
kuru	: Kuru malzeme

s1 : Giriş biyokütle nemi
s2 : Çıkış biyokütle nemi
su : Su
yaş : Nemli malzeme

Kısaltmalar

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme Test Derneği)
MAM : Marmara Araştırma Merkezi
TÜBİTAK : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

HELEZON KONVEYÖR TİPİ KURUTUCUDA ODUN PARÇACIKLARININ KURUTULMASININ DENEYSSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada Kızılçam ağacı (Pinus Brutia) odun parçacıklarının helezon konveyör tipi bir kurutucudaki kurutma koşullarının kuruma prosesine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Kurutma sıcak hava ile yapılmıştır. Deneyler farklı kurutma havası sıcaklıkları, debileri ve farklı kurutma şekillerinde (eş yönlü ve zıt yönlü) yapılmıştır. Bu farklı kuruma koşullarında odunun sıcaklığındaki, nemindeki ve yapısındaki değişim incelenmiştir.

Bir miktar odun parçacığı kurutucuya beslenmiş ve aynı koşullarda üst üste dört kez kurutulmuştur. Her kurutma işlemi sonunda bir miktar numune alınıp, bu numunelerin sıcaklık ve nem oranları ölçülmüştür. Dördüncü kez kurutulan biyokütleyle ASTM E-1755 testi uygulanarak yapısındaki uçucu organik bileşen miktarları araştırılmıştır. Bu işlem tez kapsamında incelenen tüm kurutma koşullarında tekrarlanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda kurutma havasının sıcaklığı ve debisinin artmasıyla odun parçacıklarının nem oranlarının azaldığı, yani buharlaşma ve kuruma hızının arttığı saptanmıştır. Ayrıca eş yönlü kurutma şekli ile zıt yönlü kurutma şekline göre biyokütleden daha fazla miktarda nem uzaklaştırıldığı, yani buharlaşma ve kuruma hızının arttığı belirlenmiştir. Araştırılan tüm kurutma koşullarında odun parçacıklarının yapılarındaki uçucu organik bileşen miktarı sabit kalmıştır. Bunun anlamı, kurutmadan kaynaklı uçucu organik bileşen emisyonu salınımının araştırılan kurutma koşullarında gerçekleşmemiş olmamasıdır.

Anahtar Kelimeler: Helezon Konveyör Kurutucu, Kurutma Kaynaklı Emisyon, Odun Parçacığı Kurutma, Sürekli Kurutma

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DRYING OF WOODCHIPS IN A SCREW CONVEYOR DRYER

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the effects of drying conditions to the drying process of Turkish pine (*pinus brutia*) dried in a screw conveyor dryer.

Hot air is used as drying medium. Experiments are carried out in various drying air temperatures, drying air flow rates and dryer types. Revolution of the screw is kept constant in the experiments. Change of moisture content, temperature and structure of Turkish pine woodchips in these different drying conditions are investigated.

An amount of woodchip is fed to dryer and dried 4 times in the same drying conditions. In every experiment, an amount of sample collected from dried woodchip and moisture content and temperature of this sample is measured. ASTM E-1755 analysis is applied to the 4 times dried samples and the amounts of volatile organic matters are investigated.

It is found that with the increasing drying air temperature and flow rate, drying rate is increased. Also co-current and counter-current drying types are investigated and when compared with each other, co-current dryer type provides increase in rate of evaporation. There are no emissions released under all drying conditions.

Keywords: Screw Conveyor Dryer, Drying Based Emissions, Woodchip Drying, Continuous Drying

GİRİŞ

İnsanoğlunun ilk enerji kaynağının odun olduğu düşünülmektedir [1]. Odun, yüzyıllardan beri yemek yapma ve ısınma amacıyla kullanılmaktadır. Endüstri devrimde kömür yerini alana kadar birincil enerji kaynağı olarak kullanılmıştır [2]. Günümüzde de odundan yakma, gazlaştırma, birlikte yakma ve kojenerasyon tesislerinde enerji elde edilmektedir [3].

2007 yılında dünyada tüketilen enerjinin %13'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyoenerji %77'lik bir dilim oluşturmaktadır. Bu %77'lik dilimin de %87'sini odun oluşturmaktadır [4]. Günümüzün en önemli yenilenebilir enerji kaynağı odundur [1]. Sonuç olarak birincil enerji tüketiminde dünya enerji ihtiyacının %8,7'si odundan karşılanmaktadır.

Nisan 2009'da Avrupa Parlamentosu ve Konseyi bir yönetmelik yayımlayarak (2009/28/EC) yenilenebilir kaynaklarından enerji üretimini teşvik etmiştir [2]. AB 2020 hedeflerine göre brüt nihai enerji tüketiminin %20'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması gerekmektedir [5]. Uzmanlar bu %20 hedefinin yarısının biyokütle ile karşılanacağına inanmaktadır [6].

Yaş odunun nem oranı genelde %50'nin üzerindedir. Nemli odunun yakma tesislerinde yakılması, yüksek CO ve uçucu organik bileşen emisyonlarına yol açmaktadır. Ayrıca yüksek nem oranı, odunun alt ısıl değerini düşürmektedir. Gazlaştırma tesislerinde yüksek nem oranına sahip odunun kullanılması, elde edilen sentez gazının düşük alt ısıl değere sahip olmasına ve yüksek tar konsantrasyonuna neden olmaktadır [7]. Bu bakımdan odun, yakma ve gazlaştırma proseslerinden önce kurutulmalıdır.

Bu çalışmada kızılcam (Pinus Brutia) ağacı odun parçacıklarının helezon konveyör tipi kurutucuda kurutulması deneysel olarak incelenmiştir. Odun parçacıkları farklı kurutma havası sıcaklıklarında, farklı kurutma havası debilerinde ve farklı kurutma şekillerinde kurutulmuştur. Kurutma koşullarının odun parçacıklarının nem, sıcaklık ve uçucu organik bileşen miktarlarına olan etkileri ve laboratuvar ölçekli helezon konveyör tipi kurutucuda odun parçacığı kurutmak için gerekli olan optimum koşullar belirlenmiştir.

Helezon konveyör tipi kurutucunun imalatı ve deneyleri TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü Yakma ve Gazlaştırma Grubu Laboratuvarında yapılmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

Odun kurutması ile ilgili yapılmış daha önceki çalışmalar ve odunun fiziksel özellikleri bu bölümde verilmiştir.

1.1. Literatür Taraması

Gündüz (1994), çalışmasında gözenekli malzemelerin kurutulması sırasında gözenekli malzemelerle çevre arasında gerçekleşen ısı ve kütle transferini incelemiştir. Kurutma sırasında meydana gelen ısı ve kütle transferinin matematiksel modelini yapmış, oluşturduğu bu modeli sonlu farklar metodu kullanarak bilgisayar yardımı ile çözerek ağaç malzemenin kurutulmasına uygulamıştır. Elde ettiği sonuçlar olan sıcaklık ve nem dağılımlarını literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırıp ayrıntılı olarak değerlendirmiştir [8].

Al-Kassir (2005), çalışmasında helezon tipi biyokütle kurutucusunun dizaynı için bir boyutlu model geliştirmiştir. Modeldeki giriş verileri, biyokütle ve kurutma gazının giriş sıcaklıkları ve debileridir. Kurutucu boyunca sıcaklığı ölçebilmek için deneysel bir düzenek kurmuştur ve deney sonuçlarına göre Frössling eşitliği kullanılan model deneysel verilere yakın sonuçlar vermiştir. 0,22 m iç çapa göre optimum kurutucu boyunu 3 m bulmuştur [9].

Bakır (2007); çam, kayın, kavak ve ceviz ağaçlarından aldığı numuneleri, laboratuvar ortamındaki tepsili kurutucuda, literatürden alınan optimum hava hızı ve sıcaklık değerlerinde kurutarak beş farklı numune için nem kaybının, kuruma hızının, ısı ve kütle transfer katsayılarının zamanla değişimini incelemiştir. Kuruma hızı, ısı ve kütle taşınım katsayıları ve nem miktarının zamana bağlı olarak azaldığını gözlemlemiştir [10].

Kıyakoğlu (2010) çalışmasında, okside olmuş çay yapraklarını su ceketiyile ısıtılmış ve içindeki çayı helisel kanatlı boru ile hareket ettiren helezon çay kurutma makinesinde kurutmuştur. Makinenin tasarım ayrıntılarını ve saha çalışmasında

karşılaştığı sorunları çalışmasında açıklamış ve ideal devir sayısı ve çıkan ürünün nem oranlarını belirlemiştir [11].

Selbaş (1998) çalışmasında kurutma mekanizması ve kurutma termodinamiğini incelemiş ve akışkan yataklı kurutucuları tanıtarak, akışkan yatakta odun yongalarının kurutulması için bir deney seti hazırlamıştır. Deneysel çalışmasında kurutma havası sıcaklığı, kurutma havası hızı, distribütör tipi, odun parçalarının büyüklükleri ve besleme miktarı parametrelerini değiştirerek kurutma hızının değişim eğrilerini elde etmiştir. Yaptığı deneyler sonucunda odun parçacıklarının boyutunun büyümesi ile kurutucu çıkışındaki nem oranlarının arttığını tespit etmiştir. Kurutma havası sıcaklığının artması ile odun parçacıklarının sıcaklıklarının ve kurutma hızının arttığını belirlemiştir. Kurutma havası hızının yükselmesi ile ısı ve kütle transferini artırarak kurutucu çıkışında odun parçacıklarının nem oranlarının daha düşük olduğunu saptamıştır. Gaz dağıtıcı tiplerinin değiştirilmesi ile kurutma hızında farklılıklar meydana gelmiştir. Uygun bir gaz dağıtıcısı kabarcık oluşumunu engelleyerek kurutma hızında artış sağlamıştır. Akışkan yatağa beslenen odun parçacığı miktarının artırılması, kurutma süresinin artmasına neden olmuştur [12].

Pang ve Mujumdar (2010) çalışmasında öncelikle odunsu biyokütlenin karakterizasyonuna, odundan enerji elde etme yöntemlerine değinmiştir. Daha sonra biyokütle kurutma sistemleri olarak direk döner kurutucular, indirek döner kurutucular (buhar borulu döner kurutucu), akışkan yataklı kurutucular ve pnomatik (flaş) kurutucular, bantlı konveyör kurutucular ve delik tabanlı kabinli kurutucular kullanılabileceğini belirtmiştir. Çalışmasında bantlı konveyör kurutucu, döner kurutucu ve pnomatik kurutucu üzerinde detaylıca durmuştur. Kurutmada kaynaklı emisyonların çeşitleri ve emisyon temizleme yöntemleri ile yangın ve patlama riskleri de çalışmada açıklanmıştır [13].

1.2. Odunun Fiziksel Özellikleri

Bu bölümde odunun nem, yoğunluk, ısı yayılım, özgül ısı, ısı iletkenlik, ısı değeri özellikleri incelenmiştir.

1.2.1. Nem oranı

Odunun nemi, içindeki su miktarını toplam ağırlığına bölünerek elde ediliyorsa buna yaş bazda nem oranı; içindeki su miktarı kuru malzeme miktarına bölünerek elde ediliyorsa kuru bazda nem oranı denir. Denklem (1.1)'de kuru bazda nem oranı, denklem 3.2'de de yaş bazda nem oranı,

$$w_{\text{kuru}} = \frac{m_{\text{su}}}{m_{\text{kuru}}} \times 100 \quad (1.1)$$

$$w_{\text{yaş}} = \frac{m_{\text{su}}}{m_{\text{yaş}}} \times 100 \quad (1.2)$$

Olarak formüle edilmiştir. w_{kuru} odunun kuru bazda nem oranını, $w_{\text{yaş}}$ odunun yaş bazda nem oranını, m_{su} odunun içerdiği su miktarını, m_{kuru} odunun tam kuru haldeki ağırlığını, $m_{\text{yaş}}$ odunun tam kuru haldeki ağırlığını belirtmektedir [14].

1.2.2. Yoğunluk

Yoğunluk, birim hacmin kütlesidir. SI birim sisteminde birimi kg/m^3 'tür. Odunun yoğunluğu,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

denklemleri ile verilebilir ve ölçüldüğü zamanki nem oranına göre değişir. Artan nem oranı ile odunun hacmi de kütlesi de artmaktadır. Ancak kütledeki artış hacimdeki artıştan daha büyük olduğu için yoğunluk artmaktadır [14].

1.2.3. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik, belli bir kalınlığı olan ve sıcaklık farkına maruz bırakılmış bir malzemedeki geçen ısı miktarının bir ölçüsüdür. Isıl iletkenlik katsayısının (k) birimi, SI birim sisteminde W/mK 'dir. Odunun ısı iletkenliği, metallere oranla düşüktür.

Örneğin %12 neme sahip bir yumuşak ağaç kerestenin ısı iletkenlik katsayısı 0,10 – 0,14 W/mK arasında değişmektedir. Bu değer alüminyum için 216 W/mK, çelik için 45 ve mineral yün yalıtım malzemesi için 0,036'dır. Odunun ısı iletkenlik katsayısı; odunun yoğunluğu ve nem oranı arttıkça artmaktadır [14].

Nem oranı %25'in altında olan odunlar için ısı iletkenlik katsayısı Denklem (1.4) ile,

$$k = G_x(B + Cx) + A \quad (1.4)$$

yaklaşık olarak hesaplanabilir. Burada G_x odunun x nemindeki özgül ağırlığı, A , B ve C de sabitlerdir. $G_x > 0,3$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $x < \%25$ şartlarında bu katsayılar şu değerleri alabilirler;

$$A = 0,01864 \quad B = 0,1941 \quad C = 0,004064$$

1.2.4. Özgül ısı

Özgül ısı, bir birim kütlenin sıcaklığını bir birim arttırmak için gerekli olan enerjidir. SI birim sisteminde birimi KJ/kgK'dir. Odunun özgül ısısı nem oranına ve sıcaklığına bağlıdır, ancak yoğunluğundan ve türünden bağımsızdır. Kuru odunun sıcaklığa bağlı özgül ısısı Denklem (1.5) ile,

$$c_{p,kuru} = 0,1031 + 0,003867T \quad (1.5)$$

yaklaşık olarak hesaplanabilir. İçinde su barındıran odunun, yani nemli odunun özgül ısısı, kuru oduna göre daha yüksektir. Lif doyma noktasının altında, nem oranı w (%) olan nemli odunun özgül ısısı yaklaşık olarak Denklem (1.6) ile,

$$c_{p,x} = (c_{p,kuru} + c_{p,su} w/100)/(1 + w/100) + A_c \quad (1.6)$$

hesaplanabilir. Suyun özgül ısısı $c_{p,su}$ 4,18 kJ/kgK'dir. A_c düzeltme katsayısı da Denklem (1.7) ile,

$$A_c = (0,02355T - 1,32w/100 - 6,191)w \quad (1.7)$$

hesaplanabilir. Sıcaklıklar Kelvin cinsinden yazılacaktır. Bu formüller lif doyma noktası altında, 280-420 K sıcaklıkları arasında geçerlidir. Lif doyma noktasın üstünde $A_c=0$ alınacaktır [15].

1.2.5. Isıl yayılım katsayısı

Isıl yayılım, bir malzemenin etrafından ne kadar çabuk ısı çekebildiğinin bir ölçüsüdür. Isıl iletkenliğin yoğunluk ve özgül ısıya bölünmesi ile elde edilir. SI birim sisteminde birimi m^2/sn 'dir. Isıl yayılım katsayısı,

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1.8)$$

denklemleri ile verilebilir. Tipik bir odunun ısıl yayılım katsayısı $1.6 \times 10^{-7} m^2/sn$ iken, çeliğin $1 \times 10^{-5} m^2/sn$ ve mineral yün yalıtım malzemesinin ısıl yayılım katsayısı $1 \times 10^{-6} m^2/sn$ mertebelerindedir. Bu nedenle odun dokunulduğunda aşırı soğuk veya aşırı sıcak hissedilmez [14].

2. KURUTMA TEORİSİ

Kurutma, yaş veya nemli malzemedен suyun uzaklaştırılması ve kuru malzeme elde edilmesi prosesidir. Suyun malzemedен uzaklaştırılması için bir pres veya santrifüj kullanılıyorsa bu tür kurutma işleme mekanik kurutma, suyun malzemedен uzaklaştırılması için ısı enerjisi kullanılıyorsa bu tür kurutma işleme ısı kurutma denir [8].

Isıl kurutma işleminde, kurutulacak malzeme üzerine ısı verilerek, suyun buharlaşması için gerekli olan ısı sağlanır. Isı aktarımı sonucunda malzemedен buharlaşan su, kurutma havası tarafından uzaklaştırılır. Böylece nemli malzeme kurutulur [16].

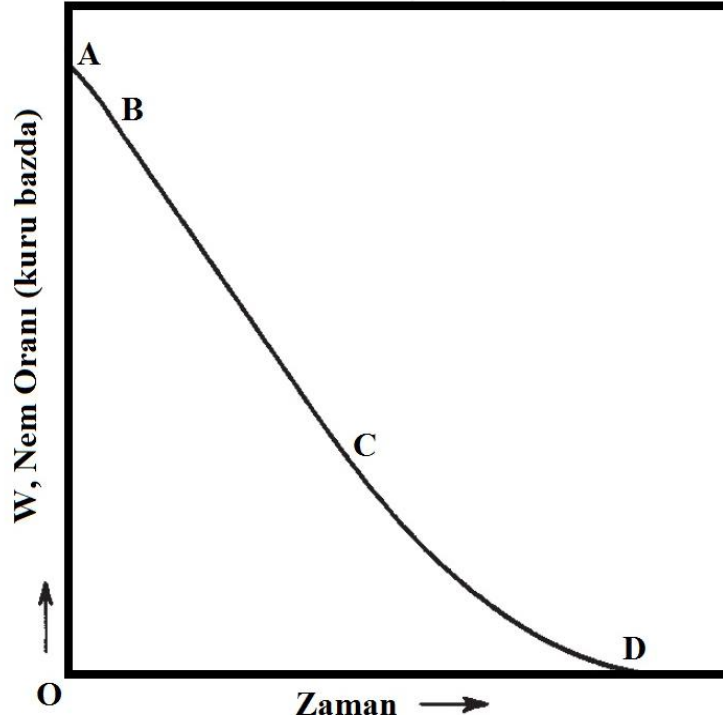
Kurutma işlemi için gerekli olan ısının sağlanma yöntemine göre farklı kurutma yöntemleri vardır. Bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır [8].

- Taşınımla kurutma: Malzeme üzerinden sıcak hava geçirilmesi ile kurutulmasıdır.
- İletimle kurutma: Malzemenin, sıcak bir yüzeye temas etmesi ile kurutulmasıdır.
- Işınımla kurutma: Malzemenin, çevresindeki sıcak yüzeylerden ışınımla kurutulmasıdır.
- Dielektrik kurutma: Malzemenin yüksek frekanslı elektromanyetik dalga ile kurutulmasıdır.

Kurutma prosesine etki eden etkenler iç ve dış olarak tanımlanabilir. İç etkenler kurutulacak malzemeye ait özellikler olup, malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, parçacık boyutu, gözenek yapısı, malzemenin başlangıç nem oranı ve su aktivitesi gibi özellikleri kapsar. Dış etkenler, kurutma havası özellikleri olup kurutma havasının debisi, sıcaklığı, bağıl nemi ve basıncını kapsar [17].

2.1. Kurutmanın Aşamaları

Her malzemenin belli bir sıcaklık, hız ve basınçta bir kuruma eğrisi vardır. Şekil 2.1’de genel bir kuruma eğrisi verilmiştir. Kuruma ısınma, sabit hız ve düşen hız olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir. Şekil 2.1’deki AB hattı ısınma aşamasını, BC hattı sabit hız aşamasını ve CD hattı da azalan hız aşamasını göstermektedir [18].



Şekil 2.1. Tipik kurutma eğrisi [18]

2.1.1. Isınma aşaması

Kurutulacak malzeme kurutucuya beslendiğinde genelde oda sıcaklığındadır ve yüksek nem oranına sahiptir. Bu aşamada, malzemeye olan ısı geçişi ile sıcaklığı yükselir ve malzeme yüzeyindeki serbest suyun uzaklaştırılmasıyla buharlaşma hızı hızla artar. Böylece sabit hız periyoduna geçebilecek duruma gelir [18].

2.1.2. Sabit hız aşaması

Bu aşamada malzeme yüzeyindeki serbest su buharlaşırken, malzeme içindeki kılcal kuvvetlerin buharlaşan suyun yerini dolduracak kadar kuvvetli olması, malzemenin nem oranının girerek azalırken buharlaşma hızının sabit kalmasını sağlamaktadır [8, 18]. Malzemenin sıcaklığı, kurutma havasının yaş termometre sıcaklığına eşit olur [18].

2.1.3. Azalan hız aşaması

Bu aşamada, kurutulacak malzeme yüzeyindeki buharlaşma hızının sabit kalması için gerekli kılcal kuvvetler yeterli değildir, yani kurutulacak malzeme, içindeki suyun yüzeye transferine direnç göstermeye başlar. Böylece buharlaşma hızı azalırken, malzeme yüzeyindeki kuru bölgeler oluşur ve sıcaklığı artmaya başlar [9, 18, 19]. Malzemenin sıcaklığı kurutma işleminin sonuna doğru yaklaşık olarak kurutma havasının kuru termometre sıcaklığına eşit olur. Bu aşamanın uzunluğu, malzemenin istenen son nem oranı ile ilgilidir ve genelde sabit hız periyodundan daha uzun sürer. Özellikle higroskopik veya içinde bağlı su bulunan malzemelerde düşük nem oranlarına erişmek bu aşamanın süresini oldukça uzatmaktadır. Malzeme sıcaklığının artmaya başlaması, termal hassasiyeti bulunan malzemeler için tehlike oluşturmaya başlar [18].

2.2. Kurutma Havaasının Özellikleri

Kurutma prosesinde kullanılan hava genelde ortam havasıdır ve içinde mevsim koşullarına bağlı olarak bir miktar ne bulunur. Nemli havayla ilgili bazı özellikler bu bölümde incelenmiştir.

2.2.1. Yaş ve kuru termometre sıcaklığı

Kuru termometre sıcaklığı, bir ortamda bulunan hava ve nemin sıcaklığını, içindeki nem oranından bağımsız olarak, hakkında bilgi verir.

Bir kanal içinde bulunan ve cıva haznesinin etrafı ıslak pamukla çevrilmiş olan termometrenin üzerinden hava geçirildiği zaman, suyun bir miktarı buharlaşacak, buharlaşan sıvının etrafından ısı alması nedeni ile de termometrenin gösterdiği

sıcaklık değeri bir miktar azalacaktır. İşte bu sıcaklığa da yağ termometre sıcaklığı adı verilir [19].

2.2.2. Özgül nem

Bir metreküp nemli havanın içerdiği m_{su} toplam nemin kütesinin, $m_{kuru\ hava}$ toplam kuru hava kütesine oranına özgül nem denir. Özgül nem,

$$w = \frac{m_{su}}{m_{kuru\ hava}} \text{ (kg nem/kg kuru hava)} \quad (2.1)$$

denklemini ile gösterilebilir. P havanın toplam basıncı, P_b suyun o sıcaklıktaki buhar basıncını göstermek üzere, özgül nem eşitliği,

$$w = 0,622 \times \frac{P_b}{P - P_b} \quad (2.2)$$

şeklinde de ifade edilebilir [19].

2.2.3. Mutlak nem

Bir metreküp nemli havanın içerdiği su buharı kütesidir. V havanın hacmi, m_b kütesi, P_b kısmi buhar basıncı, R_b buhar için ideal gaz sabiti (0.46152kJ/kgK), T sıcaklığı ve v_b havanın özgül hacmi olmak üzere, mutlak nem,

$$e = \frac{m_b}{V_H} = \frac{P_b}{R_b T} = \frac{1}{v_b} \quad (2.3)$$

eşitliği ile hesaplanabilir [19].

2.2.4. Bağlı nem

Bir metreküp nemli havadaki su buharı kütesinin, havanın aynı sıcaklıkta ve toplam basınçta içerebileceği maksimum su buharı kütesine oranı,

$$\varphi = \frac{e_b}{e_{bd}} = \frac{v_{bd}}{v_b} = \left(\frac{P_b}{P_d} \right)_{T=sbt} = 0,622 \frac{\varphi P_d}{P - \varphi P_d} \quad (2.4)$$

bağlı nemi verir. e_b havanın mutlak nemi, e_{bd} doymuş havanın mutlak nemi, v_b havanın özgül özgül ağırlığı, v_{bd} doymuş havanın özgül ağırlığı, P_b havadaki su

buharının kısmi basıncı, P_d havanın içindeki suyun doyma basıncı, P havanın toplam basıncı olmak üzere bağıl nem denklem (2.4)'teki eşitliklerle hesaplanabilir [19].

2.2.5. Entalpi

Özgül ısılar sabit kabul edilerek nemli havanın entalpisi hesaplanabilir. İçinde 1 kg kuru hava ve w kg nem barındıran hava karışımının entalpisi için,

$$h_{\text{hava}} = h_{\text{h,kuru}} + w \times h_b \quad (2.5)$$

Denklem (2.5) yazılabilir. Denklem (2.5)'te h karışımın toplam entalpisini, $h_{\text{h,kuru}}$ kuru havanın entalpisini, w havanın özgül nemini, h_b de buharın entalpisini göstermektedir. Havanın entalpisi için Denklem (2.6) ve buharın entalpisi için Denklem (2.7) kullanılırsa,

$$h_{\text{h,kuru}} = c_{p,\text{h,kuru}} \times T \quad (2.6)$$

$$h_b = h_{\text{buhar}} + c_{p,\text{buhar}} \times T = 2501,6 + 1,8723T \quad (2.7)$$

ve Denklem (2.5)'te yerine yazılırsa nemli havanın entalpisini hesaplamak için,

$$h = 1,0035T + w(2501,6 + 1,8723T) \quad (2.8)$$

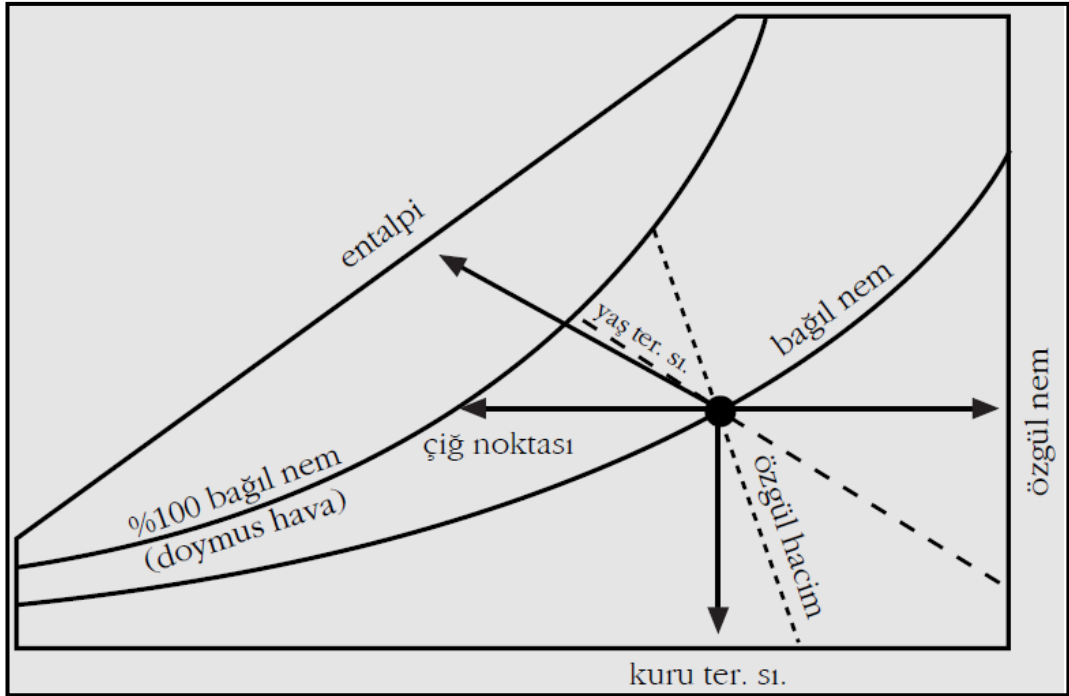
Denklem (2.8) elde edilir [19].

2.2.6. Çiğ noktası

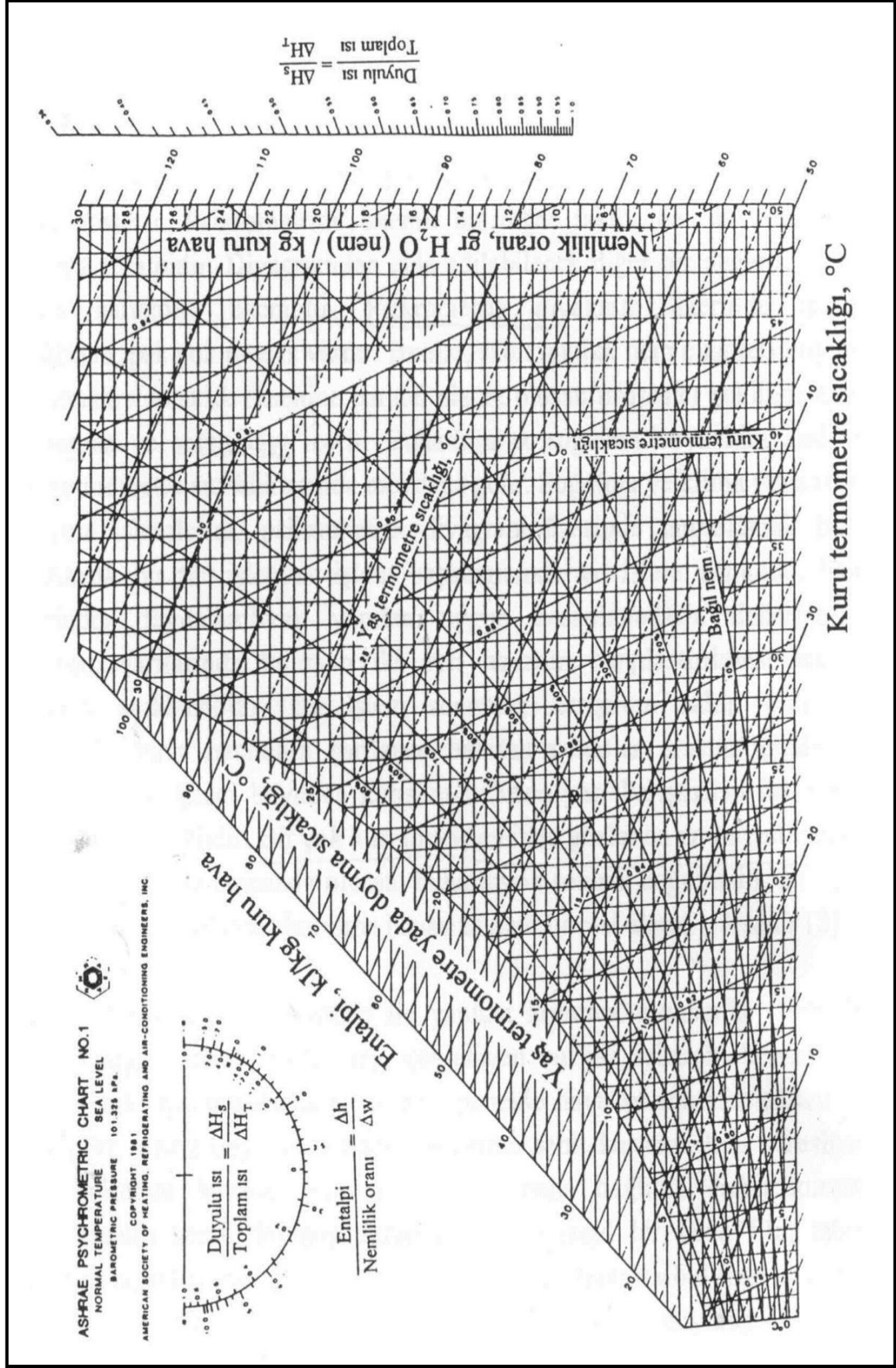
Havanın sabit basınç altında özgül nemi sabit kalarak soğutulması sonucu doyma noktasına ulaşması ve sıcaklığın doyma noktasının altına inmesi halinde su buharının yoğunlaşmaya başladığı sıcaklığa çiğ noktası denir. Soğuk günlerde yerlerin ıslak olması, hatta çok soğuk zamanlarda yerlerde kırağı (küçük buz kristalleri) oluşması, evlerin ve arabaların camlarının buğulanması, hava sıcaklığının çiğ noktası sıcaklığının altına inmesi nedeni ile olmaktadır [19].

2.2.7. Psikrometrik diyagram

Psikrometri, nemli havanın termodinamik özellikleri ile ilgilenen bilim dalıdır. Çeşitli formüllerle nemli havanın bağıl nem, özgül nem, entalpi gibi özelliklerinin elde edilişi önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu özelliklerin tek bir grafikte gösterilmesi de mümkündür. Bu grafiğe de psikrometrik diyagram adı verilir. Şekil 2.3'te deniz seviyesi için psikrometrik diyagram verilmiştir. Psikrometrik diyagramda, iki özelliği bilinen nemli havanın diğer beş özelliği herhangi bir hesaplama yapılmadan rahatça okunabilmektedir. Şekil 2.2'de psikrometrik diyagramdaki eğriler tanıtılmıştır [20].



Şekil 2.2. Psikrometrik diyagramda eğriler [20]



Şekil 2.3. Deniz seviyesinde havanın psikrometrik diyagramı [17]

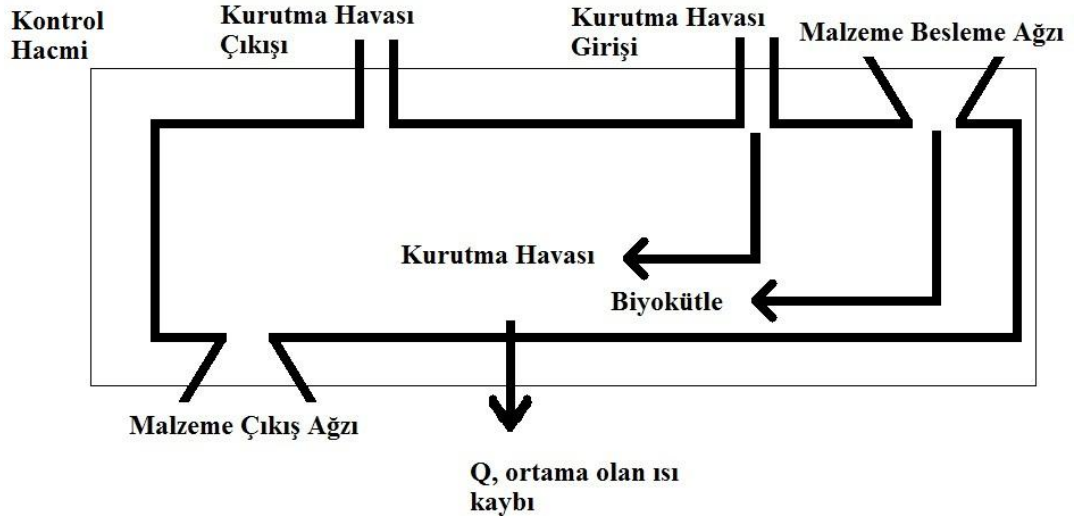
2.3. Kurutma Prosesinde Isı ve Kütle Dengesi

Kurutma prosesinde, nemli malzeme, sıcak kurutma havası ile temas ettikten sonra, bünyesinde barındırdığı nemi kurutma havasına verir. Kurutma prosesinde nemli malzemeye kuruması için gerekli ısının ve nemli malzemenin kurutma havasına verdiği buharın hesaplanabilmesi için, kurutucu kontrol hacminde ısı ve kütle dengesinin yazılması gerekmektedir.

Isı ve kütle dengesi, sürekli ve süreksiz kurutucular için yazılabilir.

2.3.1. Sürekli kurutucu

Sürekli kurutma, kurutulan malzemenin kurutucu içinde durmadığı ve sürekli hareket ederek istenilen nem oranına geldiğinde kurutucuyu terk etmesi işlemidir [21]. Sürekli kurutucular eş yönlü ve zıt yönlü olmak üzere ikiye ayrılırlar. Eş yönlü sürekli kurutucularda kurutulacak malzeme ve kurutma havası aynı yönde ilerlemekte, zıt yönlü sürekli kurutucularda ise kurutulacak malzeme ve kurutma havası zıt yönde hareket etmektedir.



Şekil 2.4. Eş yönlü sürekli kurutucu

Şekil 2.4'de $\dot{m}_{bio,giriş}$ kurutucuya giren nemli biyokütlenin, $\dot{m}_{h,giriş}$ kurutucuya giren kurutma havasının, $\dot{m}_{bio,çıkış}$ kurutucudan çıkan biyokütlenin ve $\dot{m}_{h,çıkış}$ da

kurutucudan çıkan kurutma havasının kütleli debisini göstermek üzere kütle dengesi yazılırsa Denklem (2.9) elde edilir.

$$\dot{m}_{\text{bio,giriş}} + \dot{m}_{\text{h,giriş}} = \dot{m}_{\text{bio,çıkış}} + \dot{m}_{\text{h,çıkış}} \quad (2.9)$$

Havanın ve biyokütlenin nemlerinin kütleli debileri ayrı ayrı yazılırsa,

$$\dot{m}_{\text{bio,giriş}} = \dot{m}_{\text{bio,kuru}} + \dot{m}_{\text{s1}} \quad (2.10)$$

$$\dot{m}_{\text{bio,çıkış}} = \dot{m}_{\text{bio,kuru}} + \dot{m}_{\text{s2}} \quad (2.11)$$

$$\dot{m}_{\text{h,giriş}} = \dot{m}_{\text{h,kuru}} + \dot{m}_{\text{b1}} \quad (2.12)$$

$$\dot{m}_{\text{h,çıkış}} = \dot{m}_{\text{h,kuru}} + \dot{m}_{\text{b2}} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10), (2.11), (2.12) ve (2.13) elde edilir. Bu denklemlerde $\dot{m}_{\text{bio,kuru}}$ kurutucu boyunca miktarı sabit kalan kuru biyokütlenin, $\dot{m}_{\text{h,kuru}}$ kurutucu boyunca miktarı sabit kalan kuru havanın kütleli debisini; \dot{m}_{s1} beslenen biyokütlenin, \dot{m}_{s2} kurutulmuş biyokütlenin, \dot{m}_{b1} giriş kurutma havasının, \dot{m}_{b2} de çıkış kurutma havasının neminin kütleli debisini göstermektedir.

Denklem (2.10), (2.11), (2.12) ve (2.13) Denklem (2.9)'da yerine yazılırsa eş yönlü sürekli kurutucularda kütle dengesi için,

$$\dot{m}_{\text{s1}} + \dot{m}_{\text{b1}} = \dot{m}_{\text{s2}} + \dot{m}_{\text{b2}} \quad (2.14)$$

Denklem (2.14) yazılır. Şekil 2.4'deki eş yönlü sürekli kurutucuda, kontrol hacmi için termodinamiğin I. kanunu yazılırsa,

$$\Sigma \dot{Q} - \Sigma \dot{W} = \Sigma \dot{E}_{\text{çıkış}} - \Sigma \dot{E}_{\text{giriş}} + d\dot{E}/dt \quad (2.15)$$

bu tip bir kurutucudaki enerji dengesi elde edilir. Burada $\Sigma \dot{Q}$ ve $\Sigma \dot{W}$ sırasıyla sisteme giren ve çıkan toplam ısı ve iştir. Sistemde iş çıkışı veya girişi olmadığından $\Sigma \dot{W}$ sıfırdır. Kontrol hacmindeki sistem dışarıya ısı kaybetmektedir, bu nedenle denklemin sol tarafındaki Q, eksi işaret alacaktır. Kontrol hacmi içerisinde herhangi bir yanma veya radyoaktif bozunma prosesi olmadığından rejime girmiş bir sistemde zamanla enerji değişimi $d\dot{E}/dt$ sıfıra eşittir. Bu durumda Denklem (2.15),

$$-\dot{Q} = \Sigma \dot{E}_{\text{çıkış}} - \Sigma \dot{E}_{\text{giriş}} \quad (2.16)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.16)'da girenler ve çıkanlar denklemin sağ ve sol taraflarına toplanırsa,

$$\Sigma \dot{E}_{\text{giriş}} = \Sigma \dot{E}_{\text{çıkış}} + \dot{Q} \quad (2.17)$$

denklemini elde edilir. Kontrol hacmine giren enerjilerin toplamı $\Sigma \dot{E}_{\text{giriş}}$, sisteme beslenen nemli biyokütlenin toplam enerjisi $\Sigma \dot{E}_{\text{bio,giriş}}$ ve sıcak kurutma havası toplam enerjisi $\Sigma \dot{E}_{\text{h,giriş}}$ 'ten oluşmaktadır. Bu durumda,

$$\Sigma \dot{E}_{\text{giriş}} = \Sigma \dot{E}_{\text{bio,giriş}} + \Sigma \dot{E}_{\text{h,giriş}} \quad (2.18)$$

denklemini elde edilir. Kontrol hacmine giren biyokütlenin ve havanın toplam enerjileri, kuru biyokütlenin, kuru havanın ve suyun enerjileri ayrı ayrı yazılarak ifade edildiğinde,

$$\Sigma \dot{E}_{\text{bio,giriş}} = \dot{m}_{\text{bio,kuru}} \times h_{\text{bio,kuru1}} + \dot{m}_{\text{s1}} \times h_{\text{s1}} \quad (2.19)$$

$$\Sigma \dot{E}_{\text{h,giriş}} = \dot{m}_{\text{h,kuru}} \times h_{\text{h,kuru1}} + \dot{m}_{\text{b1}} \times h_{\text{b1}} \quad (2.20)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (2.19)'da $h_{\text{bio,kuru1}}$ kurutucuya giren biyokütlenin giriş sıcaklığında tamamen kuru halindeki entalpisini, h_{s1} kurutucuya giren nemli biyokütlenin neminin giriş sıcaklığındaki entalpisini, Denklem (2.20)'de $h_{\text{h,kuru1}}$ kurutucuya giren kuru havanın giriş sıcaklığındaki entalpisini, h_{b1} de kurutucuya giren havanın neminin giriş sıcaklığındaki entalpisini göstermektedir.

Kontrol hacminden çıkan enerjilerin toplamı $\Sigma \dot{E}_{\text{çıkış}}$, sistemden çıkan biyokütlenin toplam enerjisi $\Sigma \dot{E}_{\text{bio,çıkış}}$ ve sistemden çıkan kurutma havası toplam enerjisi $\Sigma \dot{E}_{\text{h,çıkış}}$ 'tan oluşmaktadır. Bu durumda çıkış kısmındaki toplam enerji,

$$\Sigma \dot{E}_{\text{çıkış}} = \Sigma \dot{E}_{\text{bio,çıkış}} + \Sigma \dot{E}_{\text{h,çıkış}} \quad (2.21)$$

denklemini ile ifade edilir. Kontrol hacminden çıkan biyokütlenin ve havanın toplam enerjileri, kuru biyokütlenin, kuru havanın ve suyun enerjileri ayrı ayrı yazılarak da ifade edilirse,

$$\Sigma \dot{E}_{\text{bio,çıkış}} = \dot{m}_{\text{bio,kuru}} \times h_{\text{bio,kuru2}} + \dot{m}_{\text{s2}} \times h_{\text{s2}} \quad (2.22)$$

$$\Sigma \dot{E}_{h,giriş} = \dot{m}_{h,kuru} \times h_{h,kuru2} + \dot{m}_{b2} \times h_{b2} \quad (2.23)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (2.22)'de $h_{bio,kuru2}$ kurutucudan çıkan biyokütlenin çıkış sıcaklığında tamamen kuru halindeki entalpisini, h_{s2} kurutucudan çıkan nemli biyokütlenin neminin çıkış sıcaklığındaki entalpisini, Denklem (2.23)'te $h_{h,kuru2}$ kurutucudan çıkan kuru havanın çıkış sıcaklığındaki entalpisini, h_{b2} de kurutucudan çıkan havanın neminin çıkış sıcaklığındaki entalpisini göstermektedir.

Denklem (2.17)'de, Denklem (2.19), (2.20), (2.22) ve (2.23) yerine yazılırsa eş yönlü sürekli kurutucu için enerji dengesi,

$$(\dot{m}_{bio,kuru} \times h_{bio,kuru1} + \dot{m}_{s1} \times h_{s1}) + (\dot{m}_{h,kuru} \times h_{h,kuru1} + \dot{m}_{b1} \times h_{b1}) = (\dot{m}_{bio,kuru} \times h_{bio,kuru2} + \dot{m}_{s2} \times h_{s2}) + (\dot{m}_{h,kuru} \times h_{h,kuru2} + \dot{m}_{b2} \times h_{b2}) + \dot{Q} \quad (2.24)$$

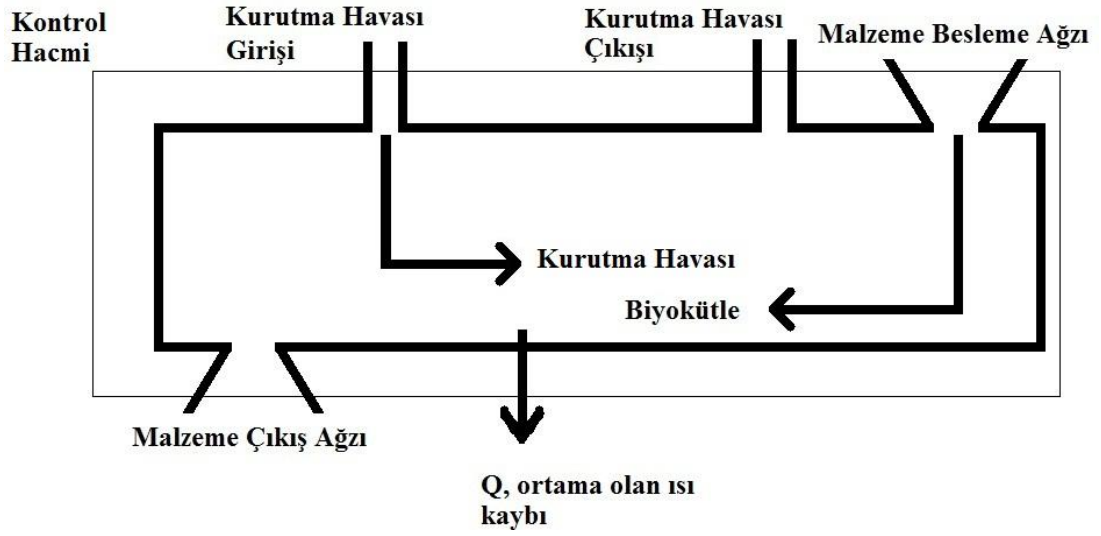
denklemindeki gibi olur. Kurutucu boyunca miktarı sabit kalan kuru biyokütle kütledebisi $\dot{m}_{bio,kuru}$ ve kuru hava kütledebisi $\dot{m}_{h,kuru}$ denklemin sol tarafına alınırsa Denklem (2.24),

$$\dot{m}_{bio,kuru} \times (h_{bio,kuru1} - h_{bio,kuru2}) + \dot{m}_{h,kuru} \times (h_{h,kuru1} - h_{h,kuru2}) = (\dot{m}_{s2} \times h_{s2} - \dot{m}_{s1} \times h_{s1}) + (\dot{m}_{b2} \times h_{b2} - \dot{m}_{b1} \times h_{b1}) + \dot{Q} \quad (2.25)$$

denklemini şeklinde yazılır. Denklem (2.25)'te entalpiler özgül ısı (c_p) ve sıcaklık cinsinden yazılırsa,

$$\dot{m}_{bio,kuru} \times c_{p,bio,kuru} \times (T_{bio,kuru1} - T_{bio,kuru2}) + \dot{m}_{h,kuru} \times c_{p,h,kuru} \times (T_{h,kuru1} - T_{h,kuru2}) = (\dot{m}_{s2} \times c_{ps2} \times T_{s2} - \dot{m}_{s1} \times c_{ps1} \times T_{s1}) + (\dot{m}_{b2} \times c_{pb2} \times T_{b2} - \dot{m}_{b1} \times c_{pb1} \times T_{b1}) + \dot{Q} \quad (2.26)$$

denklemini elde edilir. Denklem (2.26)'da $c_{p,bio,kuru}$ tamamen kuru biyokütlenin özgül ısısı, T_{bio1-2} biyokütlenin giriş ve çıkışındaki sıcaklıkları, $c_{p,h,kuru}$ kuru havanın özgül ısısı, $T_{h,kuru1-2}$ kuru havanın kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklıkları, c_{ps1-2} kurutma havasındaki nemin kurutucuya giriş ve çıkışındaki özgül ısısı ve c_{pb1-2} biyokütlenin kurutucuya giriş ve çıkışındaki sahip olduğu nemim özgül ısısını göstermektedir. Kuru odunun özgül ısısını ($c_{p,bio,kuru}$) belirlemek için Denklem (1.5) kullanılabilir. Buradaki sıcaklık değerini belirlemek için, odunun giriş ve çıkış sıcaklıklarının aritmetik ortalaması alınabilir.

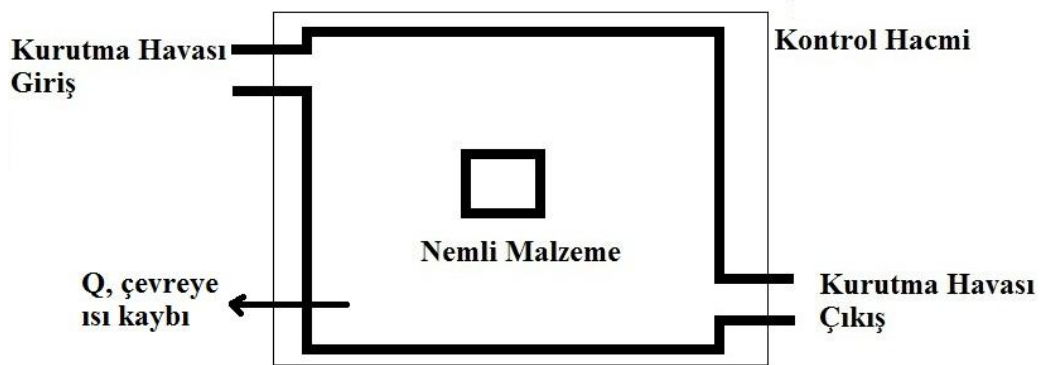


Şekil 2.5. Zıt yönlü sürekli kurutucu

Zıt yönlü sürekli kurutucularda, kurutulan malzeme ile kurutma havası birbirine paralel ancak zıt yönlü olarak ilerler. Bu tür kurutuculardaki enerji ve kütle dengesi, eş yönlü sürekli kurutuculardaki ile aynıdır. Bu tür kurutucularda kütle ve enerji dengesi yazmak için Denklem (2.14) ve (2.26) kullanılır.

2.3.2. Süreksiz kurutucu

Süreksiz kurutma, belli bir miktardaki nemli malzemenin bir kurutucu içine konulup, istenen nem oranına gelene kadar kurutulduktan sonra kurutucudan çıkarılması işlemidir. Süreksiz kurutucularda, kurutulacak malzemenin kurutucuya yükleme ve boşaltma işlemi vardır [21].



Şekil 2.6. Süreksiz kurutucu

Şekil 2.6'daki süreksiz kurutucuda kütle dengesi yazılırsa,

$$\dot{m}_{b1} + \dot{m}_{b2} = \Delta\dot{m}_s \quad (2.27)$$

denklemini elde edilir. Çıkış kurutma havasındaki nem miktarı \dot{m}_{b2} , giriş kurutma havası \dot{m}_{b1} ve yaş malzemenin kuruma süreci süresince kaybettiği nem miktarı $\Delta\dot{m}_s$ 'in toplamına eşittir. Aynı kurutucu için Denklem (2.15)'teki termodinamiğin I. kanunu yazılırsa,

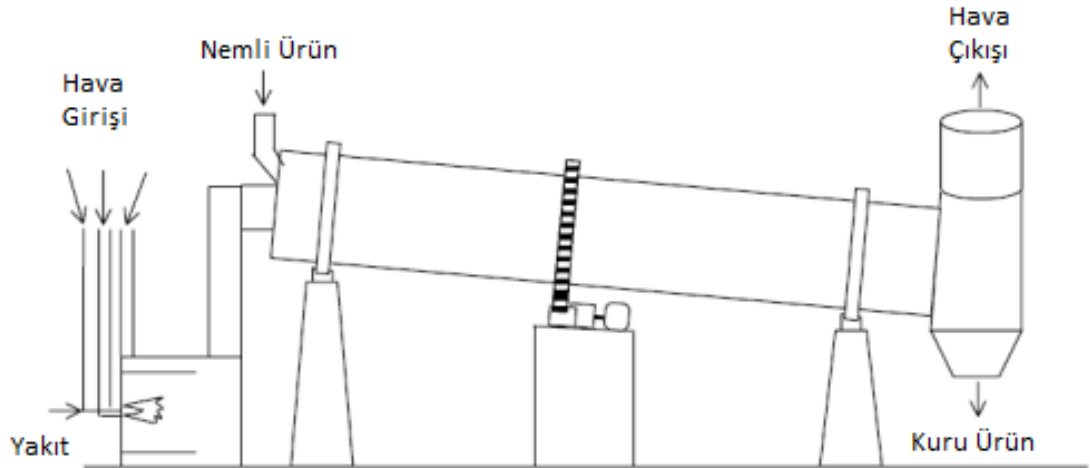
$$-\dot{Q} = \dot{m}_{h,kuru} \times (h_{h,kuru1} - h_{h,kuru2}) + \dot{m}_{b2} \times h_{b2} - \dot{m}_{b1} \times h_{b1} - \Delta\dot{m}_s \times h_s + d(m_{bio} \times (h_{bio2} - h_{bio1})) / dt \quad (2.28)$$

denklemini ile enerji dengesi elde edilir. Kontrol hacmi içerisindeki yaş kütle kuruyarak nem kaybetmekte ve bir süre sonra sıcaklığı artmaktadır. Bu nedenle $d\dot{E}/dt$ her zaman sıfıra eşit değildir, kuruma periyoduna göre değişmektedir. Şekil 2.1'deki kurutma eğrisinde, giriş ve azalan hız aşamalarında malzemenin sıcaklığı arttığı için $d\dot{E}/dt$ sıfırdan büyük olur. Sabit hız periyodunda ise malzemenin sıcaklığı yaklaşık olarak sabit kaldığından $d\dot{E}/dt$ sıfıra eşit olur.

3. ENDÜSTRİYEL KURUTMA SİSTEMLERİ

3.1. Döner Kurutucular

Döner tip kurutucularda kuruma işlemi ortadaki yataklanmış ve malzemenin yerçekimi ile ilerleyebilmesi için eğim verilmiş silindirik gövdede gerçekleşir. Nemli malzeme üstteki besleme ağzından yapılır. Silindirik gövde dönerek malzemenin kurutucu içindeki iletimini sağlar. Alttaki döküm ağzından kuru malzeme alınır. Kurutma gazı silindirik gövdenin ortasından beslenir. Kurutma gazı yönü, kurutulacak malzemeye göre belirlenir. Isıya duyarlı malzeme kurutulacaksa eş yönlü akım, aksi halde karşıt akımlı kurutma seçilir. Şekil 3.1’de bir direkt döner kurutucu görülmektedir [22].

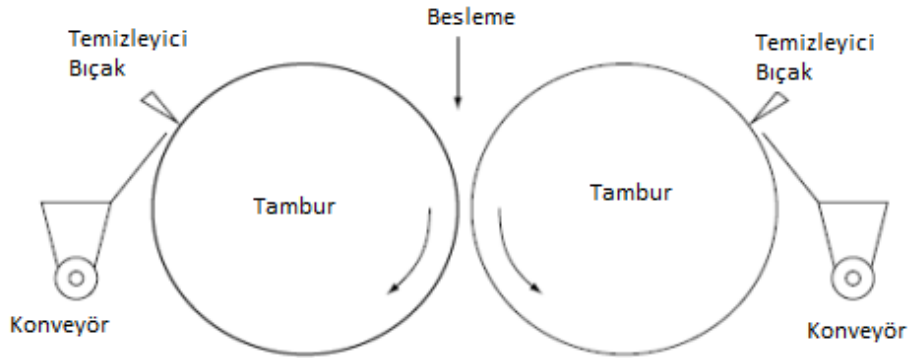


Şekil 3.1. Direkt döner kurutucunun basitleştirilmiş diyagramı [22]

Döner kurutucular, direkt, direk-dolaylı, dolaylı ve özel türler olmak üzere sınıflandırılırlar. Sınıflandırma, kurutma gazı ile malzeme arasındaki ısı transferine göre yapılır. Eğer kurutma havası ile malzeme birbirine temas ediyor ve ısı direkt olarak kurutucu havasından malzemeye geçiyorsa direkt döner kurutucu, malzeme ile kurutma havası arasında bir tüp, metal duvar gibi bir ayıraç varsa ve kurutucu hava ile malzeme birbirine temas etmiyorsa dolaylı döner kurutucu olur [22].

3.2. Tamburlu Kurutucular

Tamburlu kurutucular genelde viskoz, konsantre çözeltilerin, sulu çamurların, bulamaçların ve tutkalların kurutulmasında kullanılır. Şekil 3.2’de bir çift tamburlu kurutucu görülmektedir. Viskoz bulamaç veya tutkal birbirine zıt dönen iki silindirin arasına dökülür, iki yana sıçrayarak yayılır ve buharla ısıtılmış tamburlar üzerinde ince bir film tabakası oluşturur. Tamburun içinde yoğuşan buharla sağlanan yüksek ısı akısıyla, bu yapışkan ince film tabası iletim yoluyla aniden kurur. Kuruyan film tabakası daha sonra bir sıyrıcıyla veya bıçakla tambur yüzeyinden kazınır ve helezon konveyöre aktarılır. Buradan da toz haline getirilmek üzere bir öğütücüye gönderilir. İnce film tabakası bıçakla sıyrıldıktan sonra, tambur metalinin sıcaklığı yükselmeye başlar ve besleme noktasına geldiğinde istenilen sıcaklığa yükselmiş olur. Nemli film tabakası oluşturan sulu bulamaçlarda, nemli ince film tabakasının kurutulmasının iyileştirilmesi için film tabakası yüzeyine sıcak kuru hava gönderilebilir. Vitamin gibi ısıya duyarlı bileşen içeren malzemeler vakum ortamında düşük sıcaklıkta kurutulabilir [22].

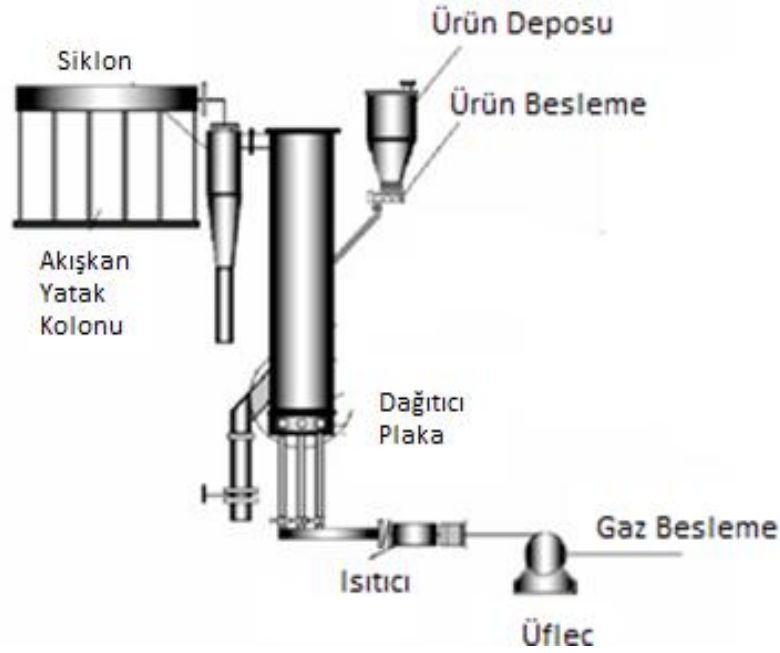


Şekil 3.2. Üstten beslemeli bir çift tamburlu kurutucu [22]

3.3. Akışkan yataklı kurutucular

Akışkan yataklı kurutucular, akışkanlaştırılabilir nemli granül ve partiküllerin, hatta bulamaçların, tutkalların ve süspansiyonların kurutulmasında geniş çapta kullanılırlar. Genelde çeşitli kimyasallar, karbonhidratlar, gıda ürünleri, biyo materyaller, içecek ürünleri, seramikler, toz halindeki tıbbi ilaçlar, sağlık bakım ürünleri, böcek ilaçları ve çeşitli tarım kimyasalları, boya maddeleri ve pigmentleri, deterjan ve yüzey-aktif ajanları, polimer ve reçineler gibi ürünlerin işlenmesinde kullanılır.

Akışkan yatak kullanımının iyi katı karışımı, yüksek miktarda ısı ve kütle transferi, kullanım kolaylığı ve düşük bakım maliyetleri gibi önemli avantajları vardır. Ancak yüksek elektrik enerjisi tüketimi, bazı partiküllerin yoksun akışkanlaşması, boru ve bağlantı elemanlarının aşınması gibi bazı olumsuz yanları da vardır [22].



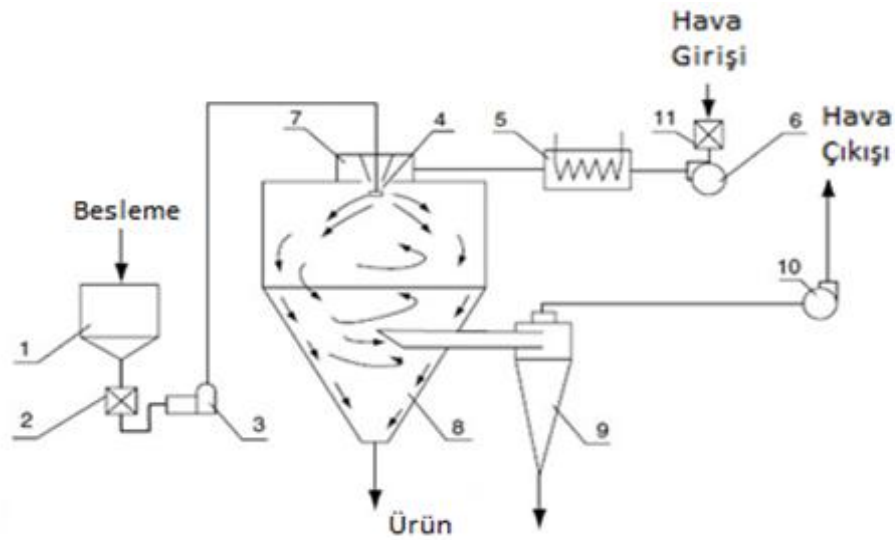
Şekil 3.3. Tipik bir akışkan yataklı kurutucu [22]

Şekil 3.3'te görülen tipik bir akışkan yataklı kurutucu bir gaz üfleç, ısıtıcı, akışkan yatak kolonu, dağıtıcı plaka, siklon gibi bir gaz temizleme ünitesi, torbalı filtre ve ürün besleme mekanizmasından oluşur. Üfleçten ısıtıcılara gaz beslenir. Isıtıcıda ısınan gaz, dağıtıcı plakada üniform bir şekilde akışkan yatak kolonuna dağıtılır.

Akışkan yatak kolonundaki kurutulacak maddenin içinden geçer. Kurutulacak madde besleme mekanizması ile yatağa beslenir. Beslenen sıcak gaz ile kolon içinde oluşan basınç kaybı, gaz hızının artmasını sağlar. Tüm yatağın ağırlığının taşınabileceği bir gaz hızında yatak akışkanlaşır. Malzeme kuruduktan sonra ürün çıkış kısmından toplanır [22].

3.4. Sprey kurutucular

Sprey kurutma, süspansiyon halindeki sıvıların atomize edilerek oluşturulan damlacıkların sıcak gaz fazındaki bir kurutma ajanı (genelde hava ile) kurutularak toz halinde ürün elde edilmesinde kullanılan bir prodestir. Genelde tarım kimyasalları, bio teknoloji ürünleri (antibiyotikler gibi), ağır ve hafif kimyasallar, süt ürünleri, boya maddeleri ve pigmentleri ve tıbbi ilaçların kurutulmasında kullanılır [22].



(1) Besleme Tankı; (2) Filtre; (3) Pompa; (4) Atomizer; (5) Hava Isıtıcı; (6) Fan; (7) Hava Dağıtıcı; (8) Kurutma Odası; (9) Siklon; (10) Egzoz Fanı

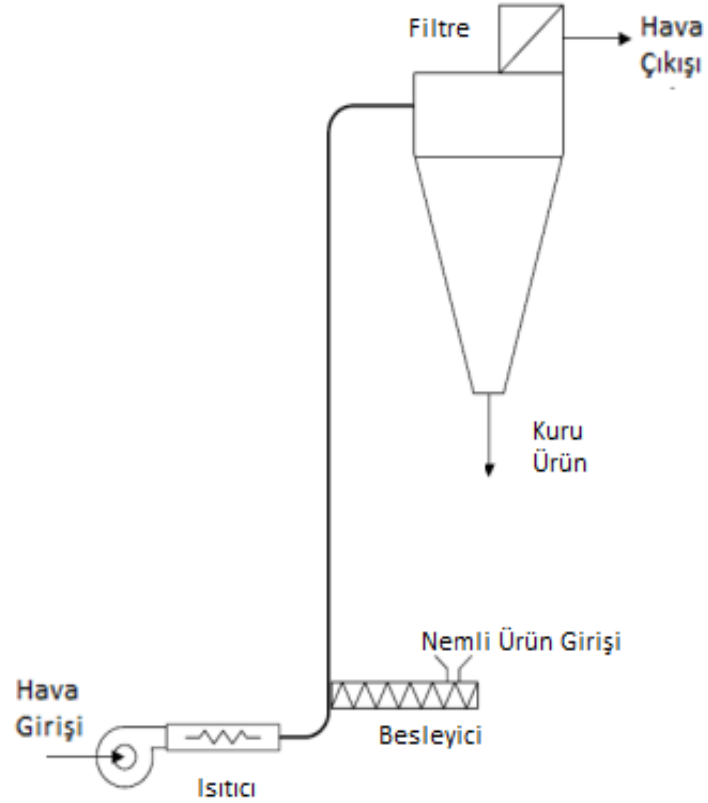
Şekil 3.4. Tipik bir sprej kurutucu [22]

Şekil 3.4'te tipik bir sprej kurutucu görülmektedir. Kurutulacak süspansiyon filtreden geçirilerek besleme ünitesinden nozula pompalanır. Süspansiyon, kurutma odasının içindeki nozulda atomize edilir ve çok küçük damlacıklar halini alır. Hava bir filtreden geçirilir ve daha sonra bir ısıtıcıda ısıtılır. Bu çok küçük damlacıklar sıcak havayla temas ettiği zaman damlacıktaki su buharlaşır ve kuruyan partiküller kurutma odasının dibine doğru düşer. Kurutma odasındaki kullanılmış kurutma

havası bir siklondan geçirilir ve içindeki kurumuş ürünler tutulur, daha sonra hava atmosfere salınır [22].

3.5. Pnömatik (Fleş) kurutucular

Pnömatik kurutucular, sürekli ısı ve kütle transferi prosesi yapılan gaz-katı transport sistemleridir. Ürünün çok kısa bir sürede kurutulması sebebiyle yüksek sıcaklıkta ürünün iç yapısı minimum zarara uğramaktadır. Genelde kimya, tıbbi ilaç, seramik, alçıtaşı, odun ve madencilik sanayilerinde kullanılırlar. Şekil 3.5'te tipik bir pnömatik kurutucu görülmektedir. Kurutucuda sıcak gaz akımı katı partikülleri bir boru içerisinde taşıırken aynı zamanda kurutulacak materyal ile direkt temas ederek onu kurutur ve kurutma sonucu açığa çıkan nemi uzaklaştırır [22].



Şekil 3.5. Tipik bir pnömatik kurutucu [22]

Şekil 3.5'te tipik bir pnömatik kurutucu görülmektedir. Nemli ürün kurutucunun borusundan sisteme beslenir. Bir ısıtıcıda ısıtılmış olan sıcak kurutma gazı nemli ürünü kurutucu borusu boyunca taşıyarak siklona ulaştırır. Bu esnada aynı zamanda kurumuş olur. Siklonda kuru ürün aşağı çökerek ayrılır ve kullanılmış kurutma gazı

içindeki küçük partiküllerin tutulması için torbalı filtreye gönderilir vedaha sonra atmosfere salınır [22].

3.6. Mikrodalga ve Dielektrik Kurutma

Ortamdan ürüne aktarılacak veya üründen ortama aktarılacak ısı kondüksiyon, konveksiyon ve ışınım olmak üzere 3 farklı mekanizma ile gerçekleşebilir. Elektromanyetik dalgalar ile aktarılan enerjiye ışınım denmektedir. Dielektrik kurutmada esas, kurutulacak ürüne kurutma için gerekli olan ısıyı radyasyonla vermektir [23].

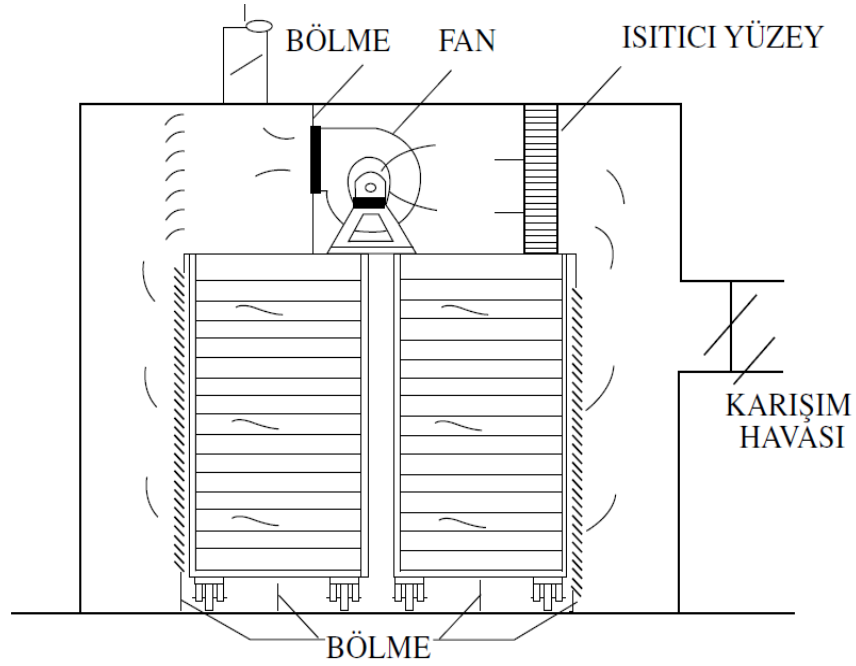
Termal ışınım sıcaklığı 0 K üzerinde olan bütün maddeler tarafından yayılmaktadır. Termal ışınım bir maddedeki molekül, atom veya elektronların titreşimsel ve döngüsel hareketleri sonucunda oluşmaktadır. Maddenin sıcaklığındaki artışla birlikte yaydığı termal ışınım oranı da artmaktadır. Termal ışınım ile dielektrik ısıtma arasındaki temel fark termal ışınım bölgesindeki elektromanyetik dalgaların dalga boyu materyal içerisine nüfus edemeyecek kadar küçüktür. Bu nedenle termal ışınım ile ancak kurutulacak ürün yüzeyi ısıtılabilir. Isının iç bölgelere iletilmesi kurutulacak ürünün termal iletkenliğine bağlıdır. Ancak dielektrik ısıtma bölgesindeki mikrodalgalar ve radyo dalgaları kurutulacak ürün içerisine, frekansına bağlı olarak belli bir miktar nüfuz etmekte ve elektromanyetik enerji kurutulacak ürün içerisinde ısı enerjisine dönüşmektedir. Yine termal ışınım ile transfer edilebilecek ısı miktarı cisimler arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Dielektrik ısıtmada ise cisimler arasındaki sıcaklık önemli değildir [23].

Radyo frekanslı dielektrik kurutucular ağaç, tekstil, kâğıt, boya, plastik ve seramik sanayilerinde kullanılmaktadır. Radyo frekanslı dielektrik kurutucular bisküvi ve kraker üretiminde, pişirme fırınından sonra, son kurutucu olarak kullanılmaktadırlar. Pişirme fırınında konveksiyon ve ışınım ile ısı transferi, bisküvi ve krakerlerin dış yüzeyindeki nemi uzaklaştırabilmekte ancak iç kısımlardaki nemi uzaklaştıramamaktadır. Radyo frekanslı enerjisi nemin ürün içerisindeki yerinden bağımsız olarak uzaklaştırılmasını sağladığı için son kurutma işleminde kullanılmaktadır. Mikrodalga yumurta, soğan, patates, çeşitli sebzeler, pirinç, hayvan yemleri, kahvaltılık tahıl ürünleri ve bisküvilerin kurutulmasında endüstriyel düzeyde kullanılmaktadır. Mikrodalga ve sıcak hava kombinasyonu kullanan kurutucularda

kurutulan ürünlerin rehidrasyon özelliklerinin ve aromalarının daha iyi olduğu literatürde bildirilmektedir [23].

3.7. Kabinli Kurutucular

Kabinli kurutucular, tava tipi, raflı ve tepsili kurutucular olarak da bilinirler [24, 25]. Kurutulacak malzeme, kurutucunun tepsilerine ince bir film tabaksı şeklinde yayılırlar. Kurutma için gerekli ısı, tepsilerin yüzeyini yalayıp geçen bir sıcak hava akımı ile konveksiyonla, tepsilerin ısıtılması ile kondüksiyonla veya ısıtılmış yüzeylerde ışınlama ile sağlanabilir. Genelde kurutma sonucu ortaya çıkan nemi de uzaklaştırdığı için konveksiyonla yapılır. Bu kurutucular genelde duvarları uygun bir yalıtkanla kaplanmış oda şeklindedir.

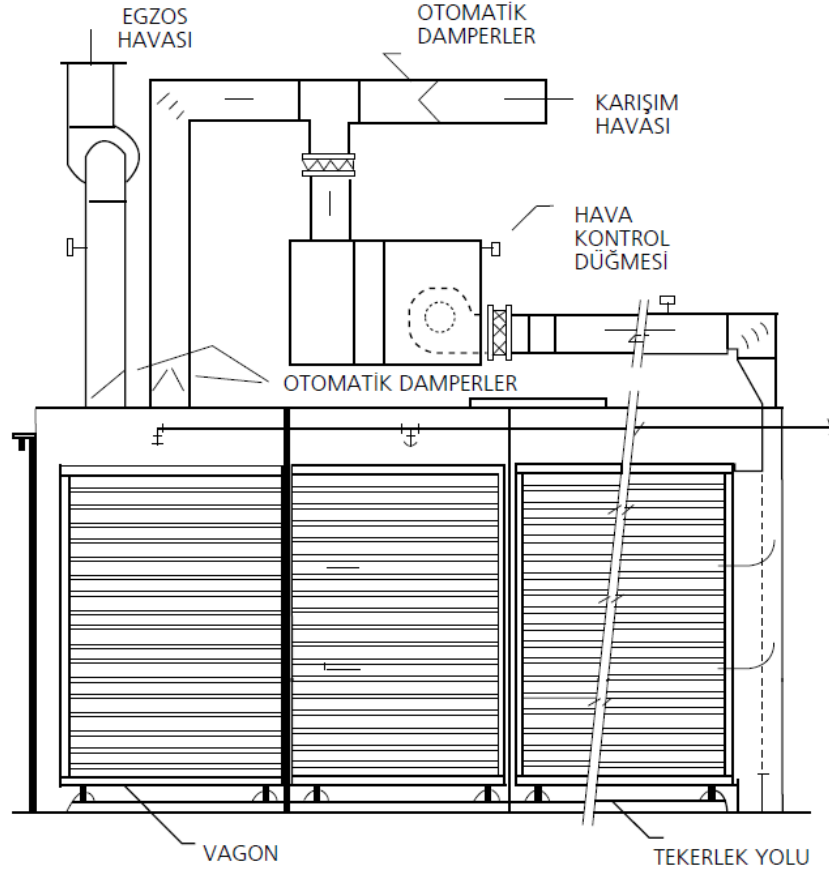


Şekil 3.6. Kabinli kurutucu [24]

Bu oda içerisinde raflar vardır ve kurutulacak malzeme bu raflara serilerek odanın içerisinde kurumaya bırakılır. Sıcak hava üretimi odanın içerisinde yapılır. Bir fan yardımı ile içerideki hava sirkülasyonu sağlanır. Meyve, sebze, granül ve partikül şeklindeki katıların kurutulmasına kullanılırlar [25].

3.8. Tünel Kurutucular

Tünel kurutucular, kurutulanan malzeme özellikleri ve nem dağılımı homojen, miktarı fazla ve yavaş kurutulması gerekiyorsa tercih edilir. Tünel kurutucular, kabinli kurutuculara benzer, kurutulacak malzeme tekerlikli arabalar üzerine yerleştirilen tepsilere yayılırlar.



Şekil 3.7. Tünel Kurutucu [24]

Kuruma işlemi tünelin içinde gerçekleşir. Tünel içerisinde kurutma ajanı olarak genelde sıcak hava kullanılır. Sıcak hava, arabalar ile aynı yönde veya zıt yönde gönderilebilir. Meyve, sebze, granül ve partikül şeklindeki katıların kurutulmasına kullanılırlar [25].

3.9. Konveyör Kurutucular

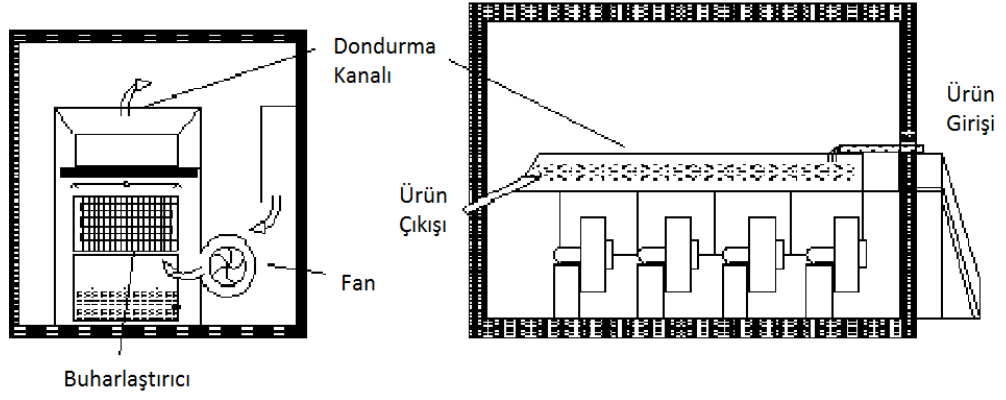
Yürüyen bant üzerine yerleştirilmiş olan dibi delikli veya elekli, 2-15 cm derinliğindeki tepsiler üst üste dizilir. Bunların üzerine kurutulacak madde yayılır. Bunların tünel kurutuculardan başlıca farkı sıcak hava akımının yatay değil, dikey olarak verilmesidir. Kurutulacak malzemenin tepsilerdeki kalınlığı; partikül büyüklüğüne, gözenekliliğe, nem içeriğine ve yürüyen bandın hızına göre 2-12 cm arasında olmalıdır.

Konveyör kurutucuların bir diğer tipi de üzeri delikli tepsi şeklindeki yürüyen banda, doğrudan maddenin yüklenebildiği kurutuculardır. Elek biçimindeki banda yüklenen kurutulacak malzeme üzerine dikey olarak sıcak hava gönderilerek kuruma sağlanır. Kuruyan madde, bandın bitimindeki kaplara boşaltılarak dışarı alınır.

Konveyör kurutucularda sıcak kurutma havası dikey olarak girdiği ve partiküllerin ve granüllerin tanecikleri arasından geçerek daha fazla yüzeyle temas ettiği için kuruma hızı tünel kurutuculardan daha fazladır [22].

3.10. Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutma, donmuş maddeden suyun veya başka bir solventin vakum altında süblimleştirilerek buhar olarak uzaklaştırılmasıdır. Ortalama sıcaklıklara kadar bile ısıtılamayan bazı biyolojik maddeler, tıbbi ilaçlar ve gıda maddeleri dondurarak kurutulabilirler. Herhangi bir kurutma yöntemine göre, dondurarak kurutma ile en kaliteli gıda ürünleri elde edilir. Kurutmadan kaynaklı tat ve aroma kaybı minimum düzeydedir. Ancak vakum altında yapılması ve düşük kurutma hızı nedeniyle pahalıdır. Kahve, soğan, kan plazması, hormon çözeltileri, süper iletken malzemeler, tarihi belgeler (arkeolojik odun), daha uzun süre yaşaması istenen canlı hücreler, bakteriler, virüsler ve mayalar dondurarak kurutulabilirler. Nükleer atıklar dondurarak kurutulularak orta radyoaktif tozlar elde edilir ve cam briketlerin içine işlenerek düşük maliyetli yüksek enerjili radyoaktif kaynaklar üretilir. Süper iletken malzeme yapımında, homojen, mikron altı, yüksek saflıkta süper iletken tozlarının üretiminde dondurarak kurutma kullanılır [22].

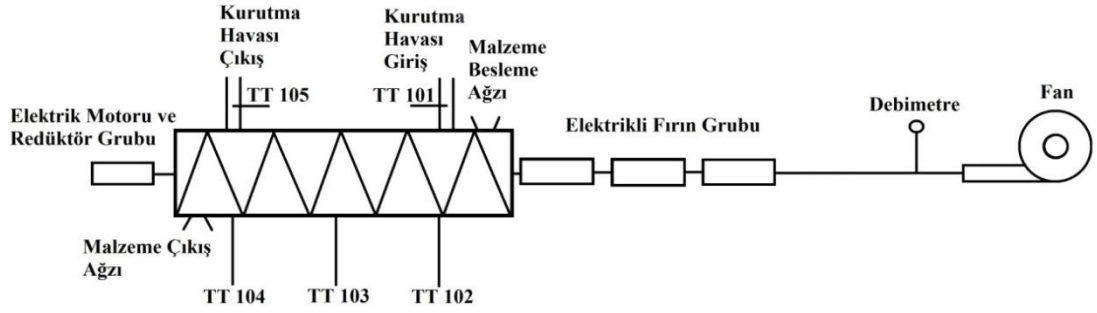


Şekil 3.8. Dondurarak Kurutma [26]

Dondurulan malzemede süblimleşmenin olduğu yüzeylerde yapısal rijitlik vardır. Bu rijitlik, kurutmadan sonra kalan katı matriksin çökmesini engellemektedir. Sonuç olarak gözenekli ve büzüşmemiş, su eklendiği zaman tamamen rehidrasyona uğrayan bir malzeme elde edilir. Aşılar ve bazı tıbbi ilaçlar bazen sulandırılarak hazırlanır ve damardan veya kas içine enjektör ile uygulanır. Bu ilaçlar, orijinal haline en yakın forma girmesi için dondurarak kurutulurlar [22].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deney seti fan, elektrikli fırın grubu, vidalı konveyör ve hava dağıtım borularından oluşmaktadır. Şekil 4.1’de deney setinin şematik gösterimi bulunmaktadır. Şekil 4.2’de de deney sisteminin yandan görünüşü bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Deney setinin şematik gösterimi

Fan ile emilen ortam havası elektrikli fırın grubuna gönderilmekte ve burada istenilen sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra sıcak kurutma havası vidalı konveyöre iletilmektedir. Konveyöre sıcak kurutma havası iki taraftan da verilebilmektedir. Böylece eş yönlü ve zıt yönlü kurutma yapılabilmektedir. Malzeme besleme haznesinden beslenen nemli biyokütle helezon konveyörde ilerlerken bir yandan da sıcak hava ile temas etmektedir. Kuruma işlemi sıcak havayla, malzemenin kurutucu içindeki hareketi de helezonla sağlanmaktadır. Helezon, elektrik motoru ve redüktör grubu tarafından döndürülmektedir. Helezonun devri değiştirilerek malzemenin kurutucu içindeki kuruma zamanı değiştirilebilmektedir. Helezon devri azaldıkça kuruma süresi artmaktadır.

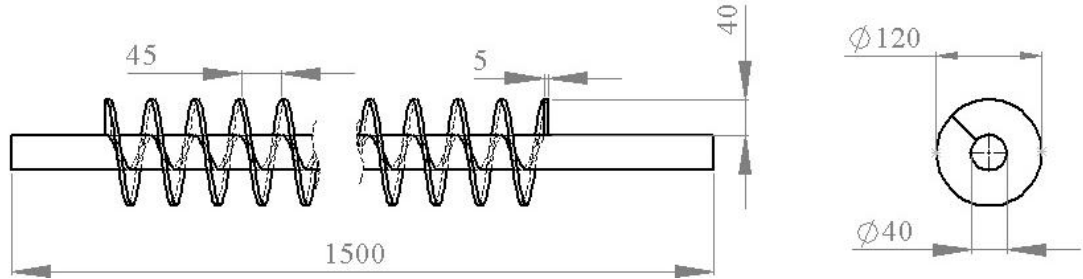
Deney seti bir yakma tesisinden çıkan egzoz gazındaki atık ısı ile çalışmaya göre tasarlanmıştır. Egzoz gazı direk olarak kurutucuya beslenebilmektedir. Bu çalışmada atık ısı kullanılmamış, bunun yerine ortam havası ısıtılarak kurutma havası olarak kullanılmıştır. Bunun nedeni kurutucuya beslenen havanın özelliklerinin daha iyi belirlenebilir olması ve kurutucu içindeki malzemenin kuruma davranışlarının

(zamana göre kurutucu içindeki nem oranındaki ve sıcaklığındaki değişim) daha iyi saptanabilmesidir.



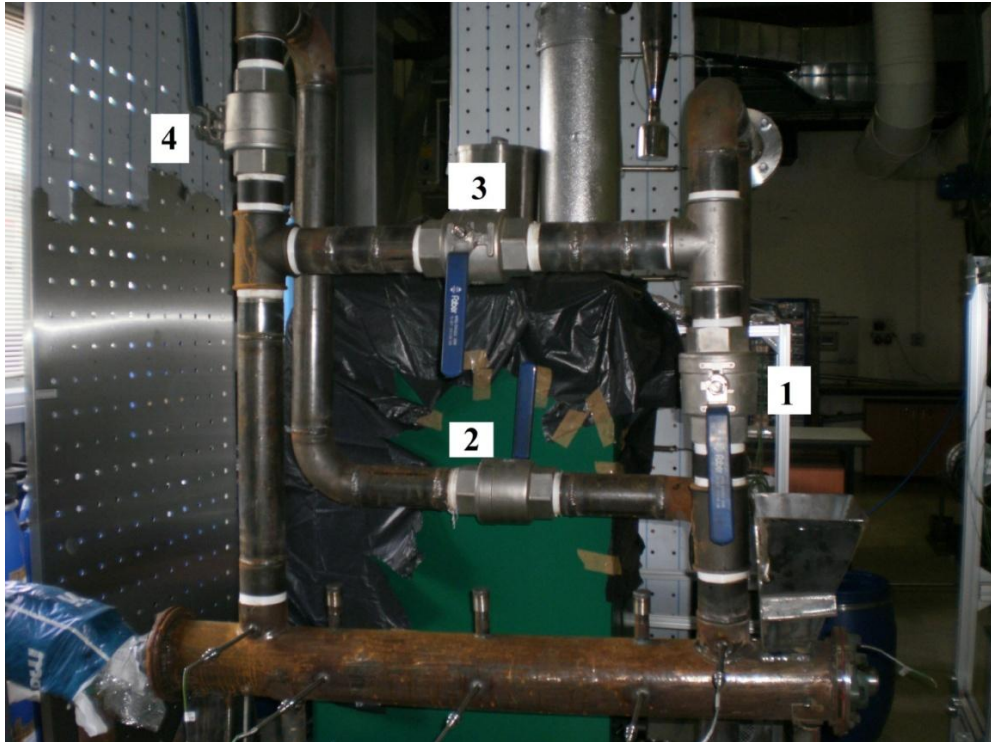
Şekil 4.2. Deney setinin yandan görünüşü

Helezon konveyörün gövdesi 1,5 m boyunda 5" çelik çekme borudan oluşmaktadır. Helezon 40 mm çaplı içi dolu mil üzerine kaynatılmıştır ve 45 mm vida adımına sahiptir.



Şekil 4.3. Helezonun ölçüleri

Dağıtım boruları 3"lik çelik çekme borudur. Boru bağlantıları yapılırken gerekli yerlerde T bağlantı elemanları kullanılmıştır. Sistemin eş yönlü ve zıt yönlü çalıştırılabilmesi için gerekli yerlere 4 tane vana konmuştur. Bu vanaları açıp kapatarak sistemin akış şekli değiştirilebilmektedir. Şekil 4.4'te sistemin yalıtım yapılmadan önceki hali vardır ve vanalar numaralandırılmıştır. Vanaların konumlarına (açık-kapalı) göre sistemin çalışma şekli Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Helezon konveyör ve dağıtıcı borular (yalıtımsız hali)

Tablo 4.1. Vana konumuna göre kurutucunun çalışma şekli

Vana Konumu		
Vana No	Eş Yönlü	Zıt Yönlü
1	Açık	Kapalı
2	Kapalı	Açık
3	Kapalı	Açık
4	Açık	Kapalı

Sistem eş yönlü çalıştırılacağı zaman 1 ve 4 nolu vanalar açılıp, 2 ve 3 nolu vanalar kapatılmaktadır. Sistem zıt yönlü çalıştırılmak istendiğinde 1 ve 4 nolu vanalar kapatılmakta ve 2 ve 3 nolu vanalar açılmaktadır.

Fan, Teknik Makine Model marka EJ 6KB modeldir. 2,2 kW gücünde, atmosfer basıncında maksimum 320 m³/h hava basma debisine sahiptir. Hava debisi fan çarkını tahrik eden elektrik motorunun devri bir sürücü ile değiştirilerek ayarlanmaktadır. Sürücü ABB marka ACS 150-01E-09A8-2 modeldir ve 2,2 kW gücündedir.

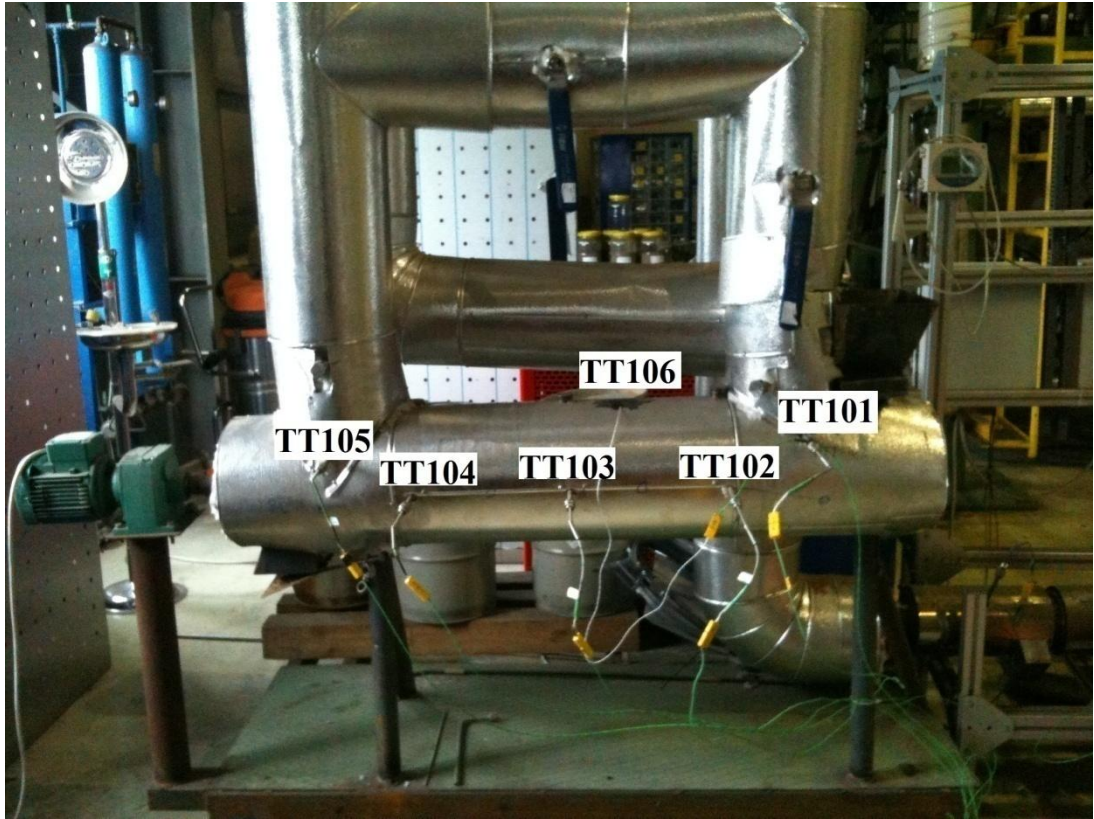
Fandan basılan havanın debisi, bir debimetre yardımı ile okunmaktadır. Debimetre Bass Instruments marka FOFT-025 modeldir. Ölçüm aralığı 0-50 m³/h hacimsel debidir. Maksimum çalışma şartları 70°C sıcaklık ve 70 bar basınçtır. Hava debisi ölçmek için dizayn edilmiştir.

Elektrikli fırınlar Isitek marka seramik rezistanslıdır. 4500W gücündedir ve 380V elektrik ile çalışmaktadır. Sıcaklık, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ hassasiyette sıcaklık kontrolü yapabilen kontaktörlerin oluşturduğu bir panodan ayarlanmaktadır.

Helezonu döndürmek için bir elektrik motoru ve redüktör grubu kullanılmaktadır. Elektrik motoru ve redüktör grubu Leroy-Somer marka CB 3032 modeldir. Elektrik motoru 380V 50Hz'de 1410 d/dk ile çalışmakta ve 0,37 kW gücündedir. Redüktörün çevrim oranı $i=25,6$ 'dır. Helezonun devri, elektrik motorunun bağlı olduğu sürücü ile ayarlanmaktadır. Sürücü Datatürk marka Turkuaz Mitsubishi IPM modeldir.

Deneyle yapılırken ortam havasının özellikleri kaydedilmektedir. Bunun için Kimo marka TH300 model nem transmitteri kullanılmaktadır. Bu cihazla deney yapıldığı

zamanki ortam havasının bağıl nemi ve sıcaklığı ölçülmektedir. Prob olarak paslanmaz çelik ve polikarbona tprobları bulunmaktadır. Paslanmaz çelik problemler -40°C ile +180°C aralığında ölçüm yapabilirken polikarbona problemler -20°C ile +120°C aralığında ölçüm yapabilmektedir. Ortam havasında ölçülecek sıcaklıklar çok yüksek olmadığı için polikarbona prob kullanılmıştır. Bağıl nem ölçüm aralığı %0-100'dür. Cihazın bağıl nem ölçmede doğruluğu $\pm 1,5$ ve sıcaklık ölçmede doğruluğu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ 'dir.



Şekil 4.5. Helezon konveyör ve dağıtım boruları (yalıtlımlı)

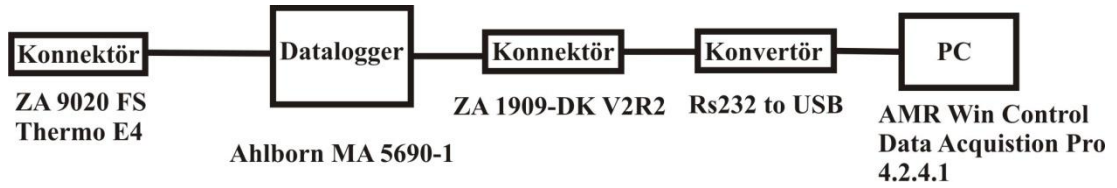
Helezon konveyör üzerinde termo elemanlar bulunmaktadır ve bunlarla kuruma havası giriş-çıkış sıcaklıkları, kurutucu için sıcaklıklar ve konveyör gövdesinin dış sıcaklığı ölçülmektedir. Bu termo elemanlar Elimko marka MI04 model mineral izoleli termo elemanlardır. NiCr-Ni elemanlardan oluşmakta ve K tipidir. Kurutma havası giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçen termo elemanlar 3"lik borunun tam ortasında yer almaktadır. Kurutucu içi sıcaklığı ölçen termo elemanlar da gövde ile helezon arasındaki boşlukta bulunmaktadır. Kurutucunun eş yönlü ve zıt yönlü çalışmasına göre termo elemanların hangi sıcaklıkları ölçtükleri değişmektedir. Tablo 4.2'de

hangi çalışma şeklinde hangi termo elemanın hangi sıcaklığı ölçtüğü verilmiştir. Şekil 4.5'te helezon konveyör üzerindeki termo elemanların yerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Termo elemanların kurutma şekline göre ölçtüğü sıcaklıklar

Termo Eleman No	Eş Yönlü Kurutma	Zıt Yönlü Kurutma
TT101	Kurutma havası giriş sıcaklığı	Kurutma havası çıkış sıcaklığı
TT102	Kurutucu içi sıcaklığı 1	Kurutucu içi sıcaklığı 3
TT103	Kurutucu içi sıcaklığı 2	Kurutucu içi sıcaklığı 2
TT104	Kurutucu içi sıcaklığı 3	Kurutucu içi sıcaklığı 1
TT105	Kurutma havası çıkış sıcaklığı	Kurutma havası giriş sıcaklığı
TT106	Gövde dışı sıcaklığı	Gövde dışı sıcaklığı

Termo elemanlar Almemo ZA 9020-FS Thermo E4 tipi konektörler ile Ahlborn MA 5690-1 dataloggera bağlanmaktadır. Datalogger da ZA 1909-DK5 V24R2 tipi konektör ile seri port çıkışı vermektedir. Seri portu (RS232) USB'ye dönüştüren bir konvertör kullanarak datalogger bilgisayara bağlanır. Bilgisayarda AMR Win Control Data Acquisition Pro version 4.2.4.1 programı ile sıcaklıklar zamana bağlı olarak on line olarak izlenebilmekte ve kaydedilebilmektedir. Şekil 4.6'da elemanların marka modelleri ve bağlantı sırası verilmiştir.



Şekil 4.6. Bilgisayar bağlantısı şeması

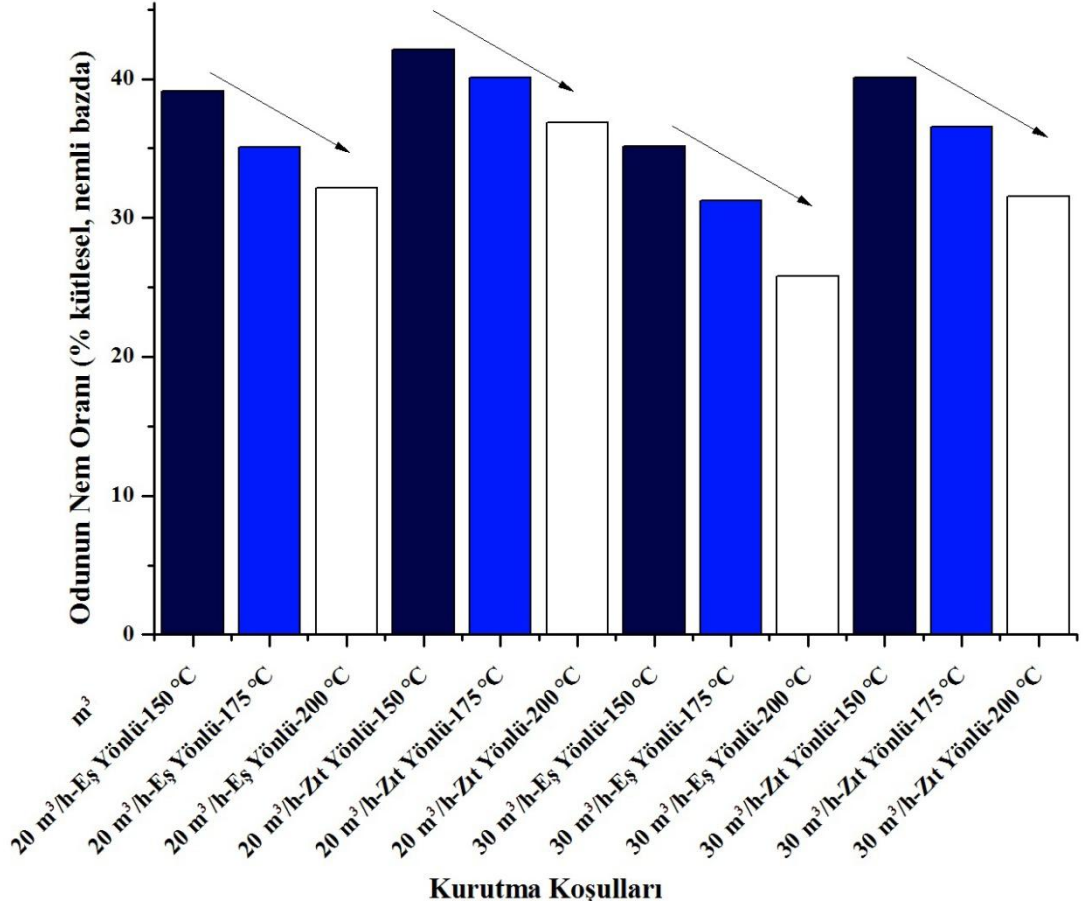
5. DENEYSEL VERİLERİN İRDELENMESİ

Yapılan deneylerde kurutma prosesine kurutma havası sıcaklığı, debisi ve kurutucu şeklinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar sırası ile aşağıda açıklanmıştır.

5.1. Kurutma Havası Sıcaklığının Kurutma Prosesine Etkisi

Şekil 5.1’de farklı koşullarda kurutulmuş biyokütlelerden elde edilmiş kurutma koşulları – odun nem oranı grafiği verilmiştir. Burada kullanılan nem oranları dördüncü kez kurutulan biyokütleden alınan numunelerden ölçülmüştür. Nem oranları nemli bazda ve kütlece yüzde olarak verilmiştir. Grafikte soldan sağa doğru aynı kurutma havası debisi ve kurutma şeklinde sıcaklıklar değiştirilerek sıcaklığın biyokütle nem oranına olan etkisi gösterilmiştir.

Grafikten de görüleceği gibi kurutma havası sıcaklığı arttıkça bütün hava debilerinde ve kurutma şekillerinde biyokütlenin nem oranı azalmakta, yani odundan uzaklaştırılan nem miktarı artmaktadır. Bu da buharlaşma miktarının artması anlamına gelmektedir. Bunun nedeni olarak kurutma havası sıcaklığının artması ile biyokütle - kurutma havası arasındaki ısı transferin artması ve bu artış sonucunda daha çok nemin buharlaşması gösterilebilir.



Şekil 5.1. Kurutma havası sıcaklığına göre son numunelerin nem oranları

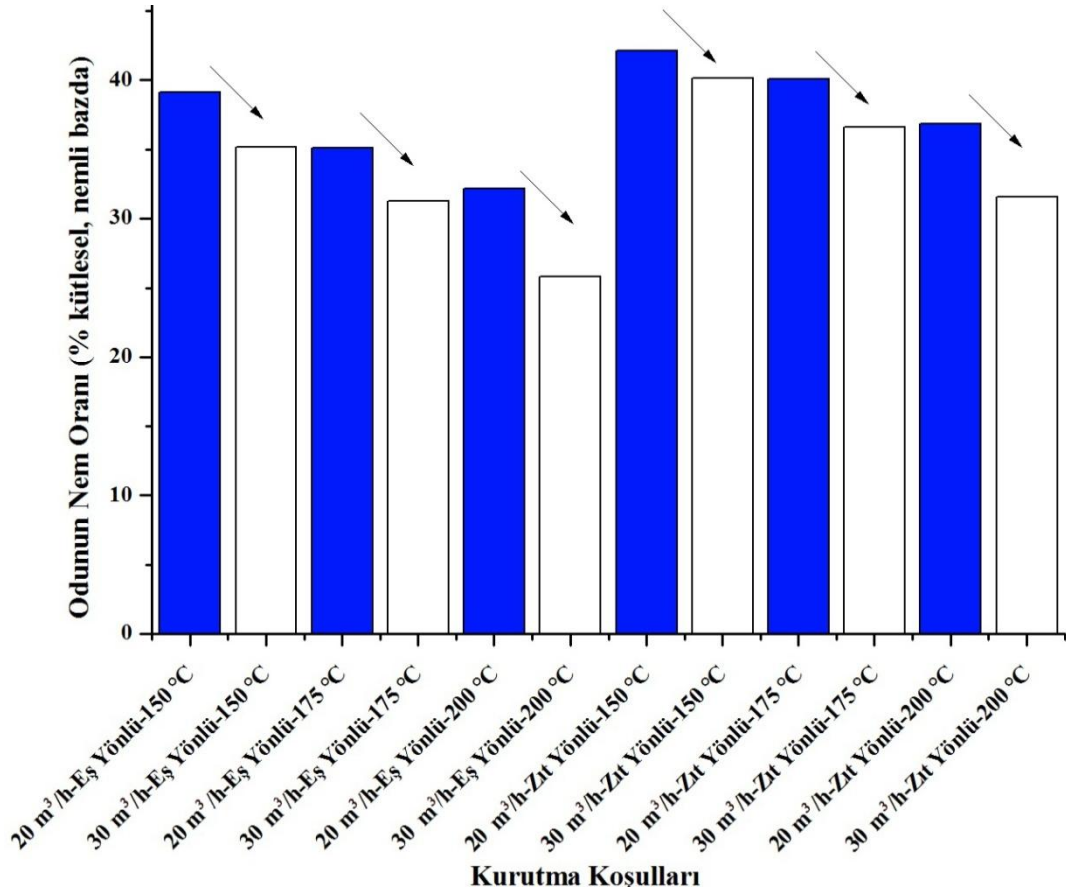
5.2. Kurutma Havası Debisinin Kurutma Prosesine Etkisi

Deneilerde 20 m³/h ve 30 m³/h kurutma havası debileri kullanılmıştır. 30 m³/h kurutma havası debisinin üzerindeki debilerde kurutucu eş yönlü çalıştırıldığında malzeme besleme haznesinden olan hava kaçakları artmakta ve malzeme beslemede zorluk yaşanmaktadır. Ayrıca kurutma havası debisinin artırılması kurutucunun bacasından odun parçacıklarının atılmasına neden olmaktadır.

Şekil 5.2’de soldan sağa doğru aynı kurutma havası sıcaklığı ve kurutucu şeklinde kurutma havası debileri değiştirilerek kurutma havası debisinin biyokütle nem oranı üzerine olan etkisi gösterilmiştir. Debi arttıkça biyokütlenin neminin azaldığı, yani daha fazla su buharlaştırıldığı, kuruma miktarının arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni kurutucuya girip çıkan kurutma havasının kurutucuya aktardığı net enerjinin artması olarak gösterilebilir. Şekil 2.4’te verilen kurutucuya girip çıkan kurutma havası için termodinamiğin I. yasası uygulanırsa Denklem (5.1),

$$Q = \dot{m}_{\text{hava}}(h_{h,\text{giriş}} - h_{h,\text{çıkış}}) \quad (5.1)$$

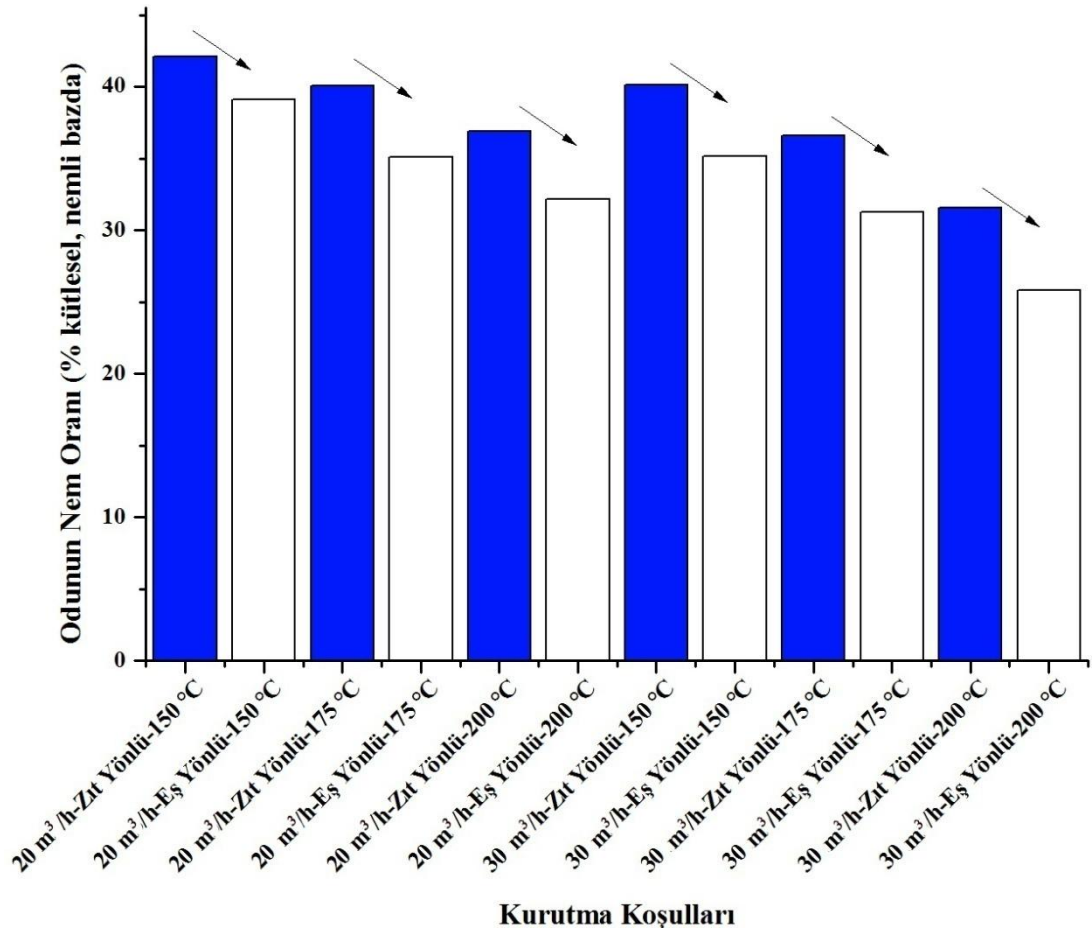
elde edilir. Denklem (5.1)'den de görüleceği gibi kurutma havası kütleli debisinin artırılmasıyla sisteme kurutma havası ile aktarılan enerji miktarı artmaktadır. Sistemin iyi yalıtılmış olduğu düşünülerek çevreye olan ısı kaybı ihmal edilirse kurutucuya aktarılan enerjideki artış, kurutucu içindeki nemli odundan daha fazla nem buharlaşmasını sağlayacak, böylece buharlaşma miktarını arttıracaktır.



Şekil 5.2. Kurutma havası debisine göre son numunelerin nem oranları

5.3. Kurutma Şeklinin Kurutma Prosesine Etkisi

Kurutucu, eş yönlü ve zıt yönlü olmak üzere iki şekilde kullanılabilir. Biyokütlenin hareket yönü ile kurutma havasının aynı yönde ilerlediği düzene eş yönlü, biyokütlenin hareket yönü ile kurutma havasının zıt yönde ilerlediği düzene zıt yönlü kurutma denmektedir. Şekil 5.3'te soldan sağa doğru kurutma havası debisi ve sıcaklığı sabit tutulduğunda kurutucu şeklinin biyokütle nem oranına olan etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kurutma şekline göre son numunelerin nem oranları

Kurutucu zıt yönlü çalıştırıldığında malzeme çıkış ağzından, eş yönlü çalıştırıldığında da malzeme besleme ağzından kurutma havası kaçakları olmaktadır. Bu kaçakların, zıt yönlü çalışmada daha fazla olduğu ve bu nedenle eş yönlü kurutma ile daha düşük nem oranlarına erişilebildiği düşünülmektedir.

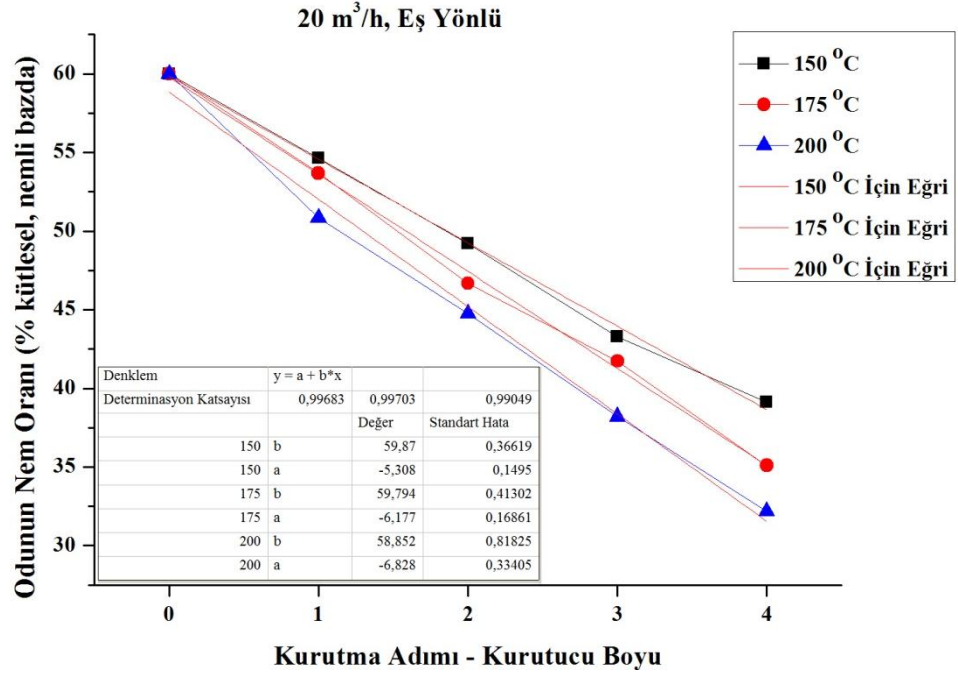
5.4. Kuruma Eğrileri

Yapılan deneylerde, kurutucuya beslenen odun parçacıkları aynı koşullarda dört kez üstü üste kurutulmuştur. Her kurutma işlemi sonunda bir miktar numune alınıp bu numunenin sıcaklığı ve nem oranı ölçülmüştür. Yapılan bu ölçümler ile odun nem oranı- kurutma adımı/kurutucu boyu ve odun sıcaklığı – kurutma adımı/kurutucu boyu eğrileri çizilmiştir. Kurutucudan odunun bir kez geçmesi, bir kurutma adımı olarak tanımlanmıştır. Kurutucuda kurutmanın gerçekleştiği mesafe 1 metre olduğundan bu eğriler aynı zamanda kurutucu boyu olarak da verilebilmektedir. Grafikler sabit kurutma havası debisi ve şekli ile değişken kurutma havası sıcaklıklarında çizilmiştir.

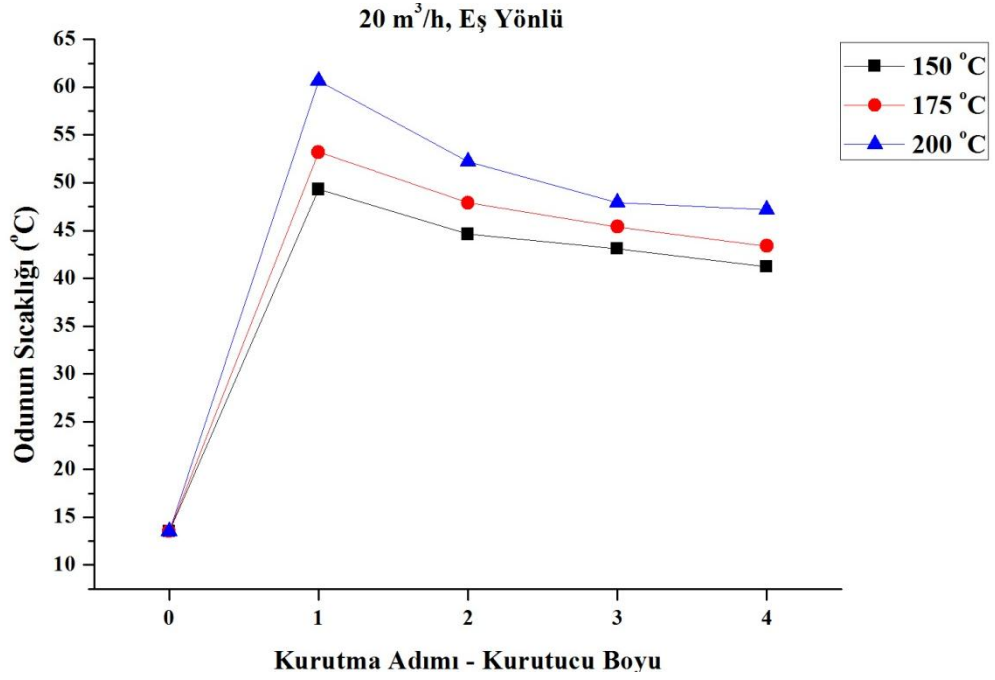
Şekil 5.4, 5.6, 5.8 ve 5.10'da odun nem oranı – kurutma adımı/kurutucu boyu eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerde odunun nem oranının lineer bir şekilde azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu eğrilerden en küçük kareler yöntemi kullanılarak birinci derece doğrular geçirilmiştir. Eğri uydurma işlemindeki determinasyon katsayısının (R^2) en küçük değeri 0,91442 olarak bulunmuştur.

Şekil 5.5, 5.7, 5.9 ve 5.11'de odun sıcaklığı – kurutma adımı/kurutucu boyu grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde kurutmanın birinci adımında sıcaklığın pik yaptığı, daha sonraki adımlarda sıcaklıkların azalarak sabit kalma eğiliminde olduğu görülmektedir.

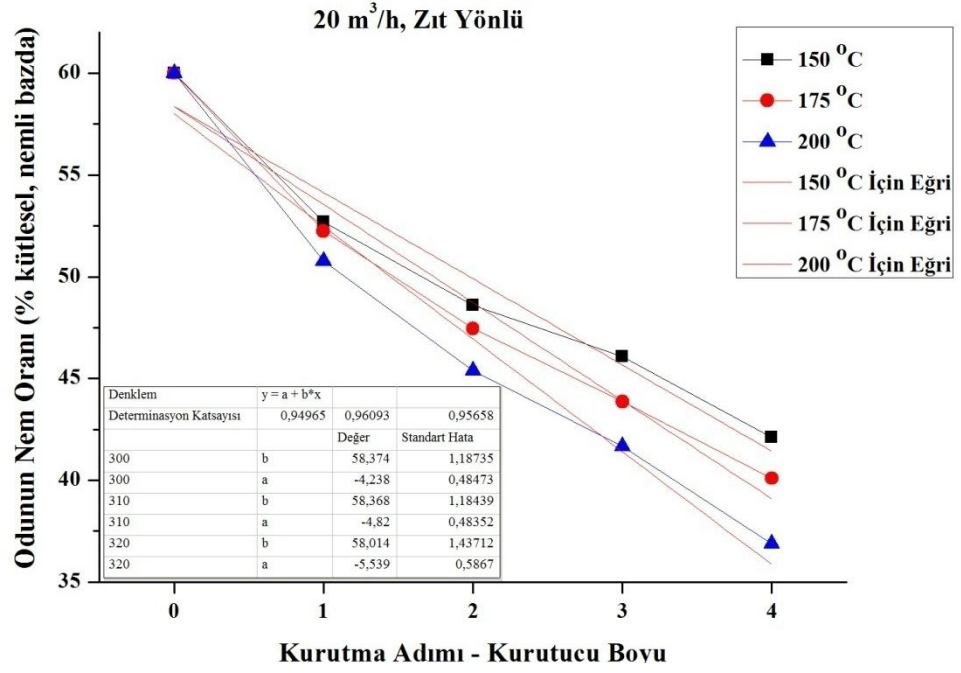
Kurutmanın sabit hız evresinde malzeme içindeki kütle transferi malzeme yüzeyinde doygun bir ortam oluşturmaya yetecek kadar hızlıdır ve buharlaşma hızı buharlaşma bölgesine aktarılan ısı ile kontrol edilir. Kütle transferi, ısı transferi ile doğru orantılıdır ve buharlaşmanın meydana geldiği doygun yüzeyin sıcaklığı sabit kalmaktadır [18]. Nem oranı ve sıcaklık grafiklerine bakıldığında yapılan deneysel çalışmaların kurutma mekanizmasının teorisi ile de uyum gösterdiği anlaşılmaktadır. Yapılan deneyler kurutmanın sabit hız evresinde gerçekleştiği gözlenmiş, bu süreçte odunun nem oranı lineer olarak azalmış ve kurutma prosesi süresince odun sıcaklığı yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Sıcaklıkların ilk adımda pik yapmasının nedeni sistemin rejime girmeye çalışmasından kaynaklanmaktadır.



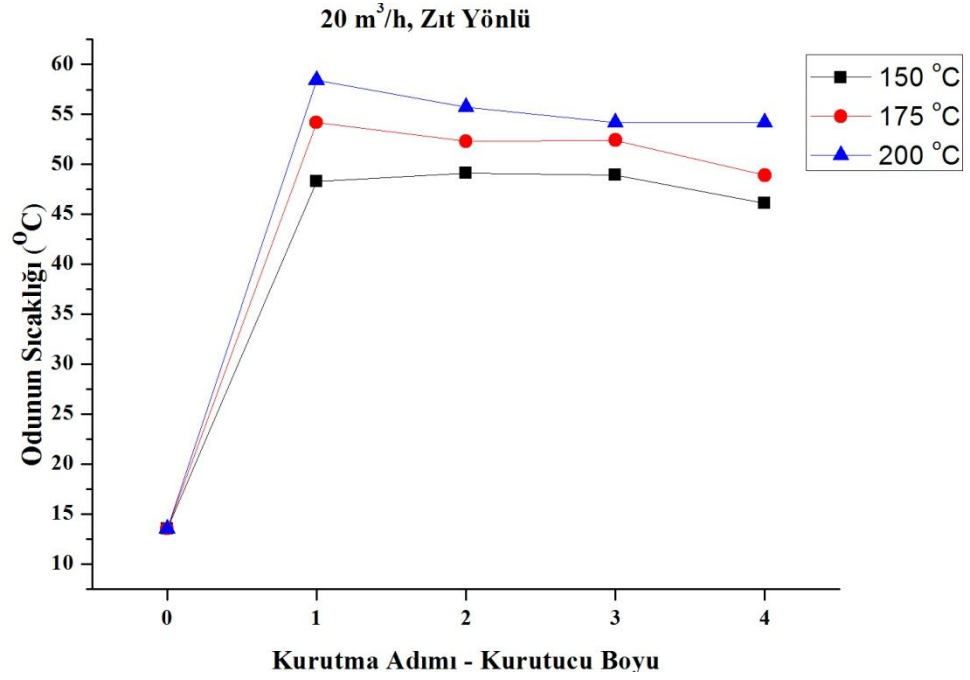
Şekil 5.4. 20 m³/h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda nem eğrileri



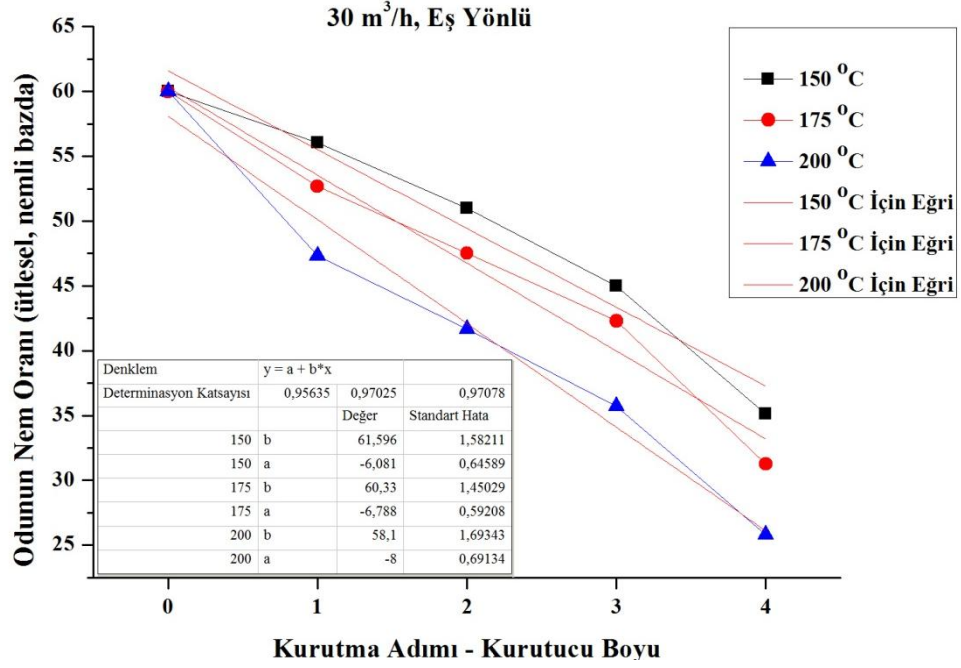
Şekil 5.5. 20 m³/h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri



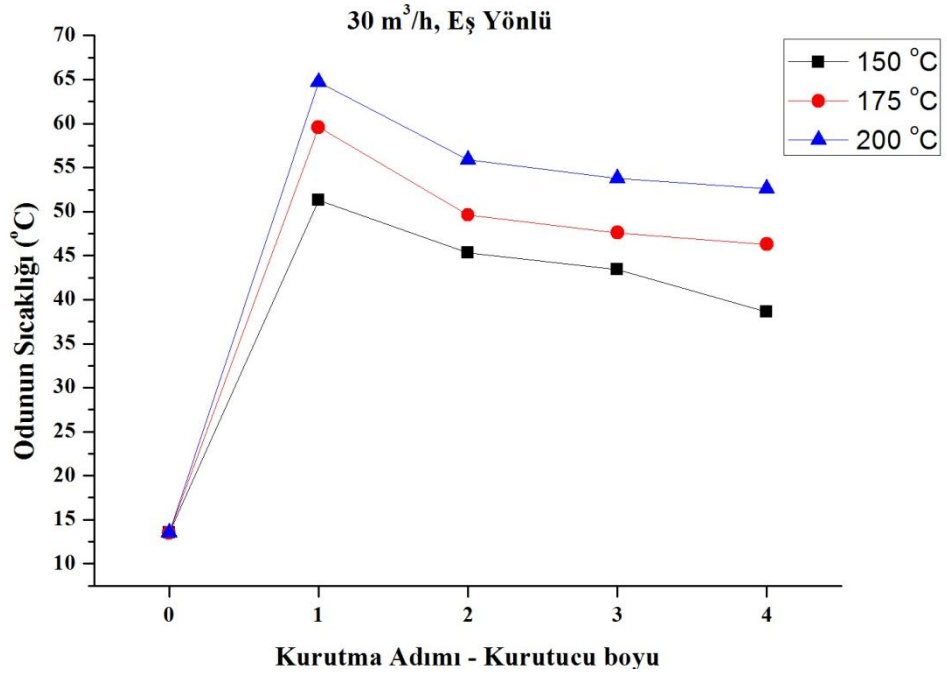
Şekil 5.6. 20 m³/h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda nem eğrileri



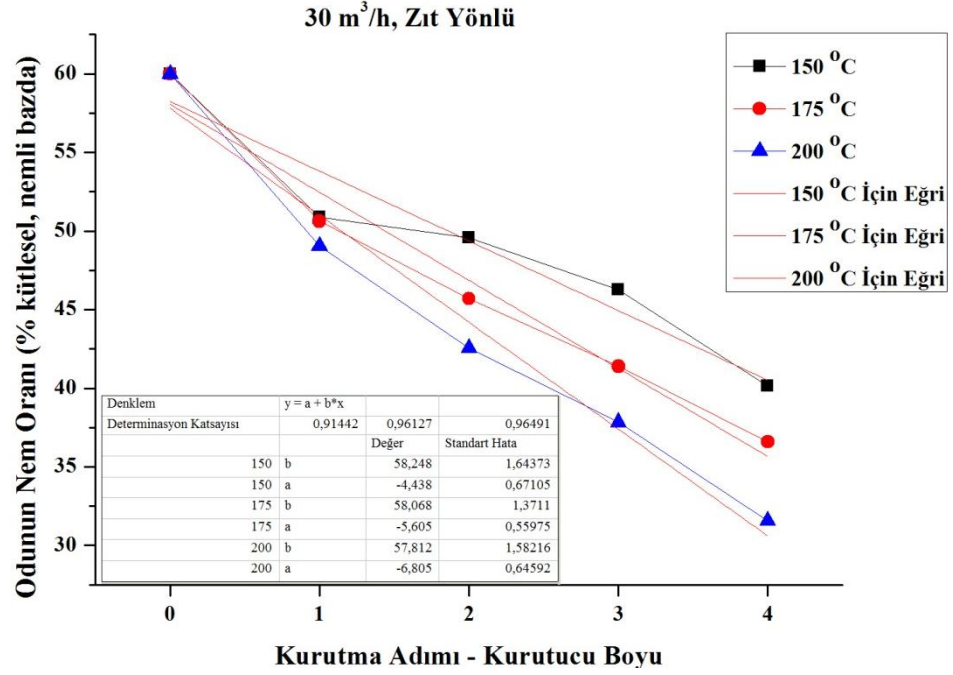
Şekil 5.7. 20 m³/h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri



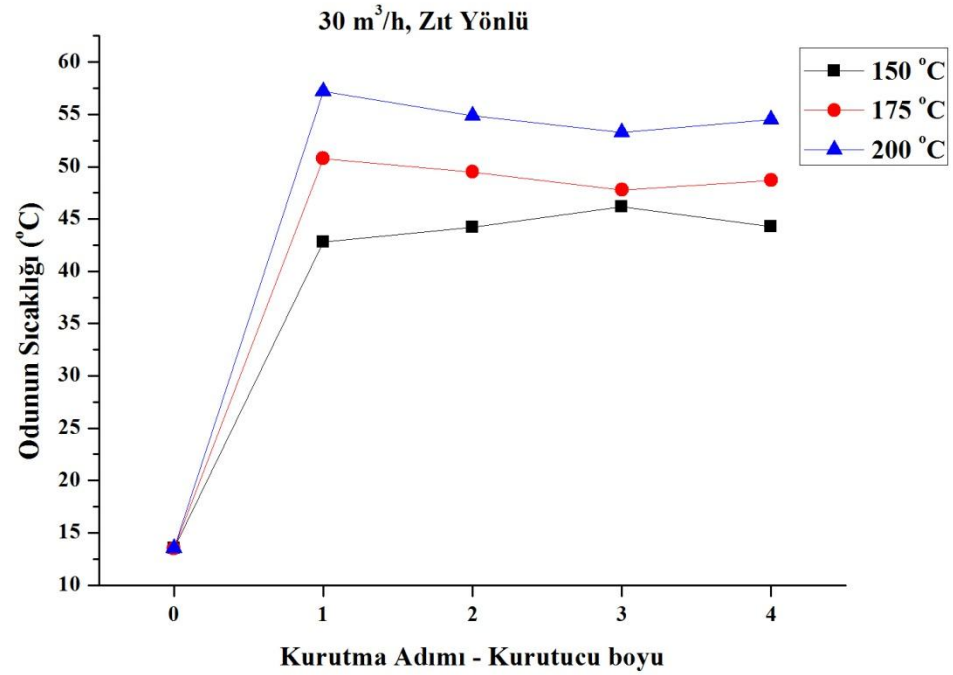
Şekil 5.8. 30 m³/h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişik sıcaklıklarda nem eğrileri



Şekil 5.9. 30 m³/h kurutma havası debisi, eş yönlü kurutma şekli ve değişik sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri



Şekil 5.10. 30 m³/h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda nem eğrileri



Şekil 5.11. 30 m³/h kurutma havası debisi, zıt yönlü kurutma şekli ve değişken sıcaklıklarda sıcaklık eğrileri

5.5. Emisyonlar

Kurutuculardan kaynaklanan emisyonlar üç başlık altında toplanabilir [14]. Bunlar:

- Parçacıklı madde emisyonu
- Uçucu organik bileşen emisyonu
- Odunun termal bozunmasından kaynaklı emisyon

Parçacıklı madde, son derece küçük katı parçacıklardan ve sıvı damlalarından oluşan kompleks bir karışımdır. Parçacık emisyonu asitlerden, organik kimyasallardan, metallerden, toprak veya toz parçacıklarından oluşabilmektedir [27]. Kurutucularda parçacıklı madde emisyonunu önlemek için torbalı filtreler ve çok aşamalı siklonlar geniş çapta kullanılmaktadır [13].

Uçucu organik bileşen emisyonları ortam koşullarında uçucu kalabilenler ve yoğunlaşanlar olarak ikiye ayrılabilir. Monoterpenler ortam koşullarında bile odundan salınan bir tür emisyonudur. Özellikle 100 °C sıcaklıktan sonra emisyon salınım hızı artmaktadır [13]. Monoterpenler odun kurutma ve işleme tesislerinde kötü kokuların yayılmasına ve insanlarda solunum sisteminde tahrişe neden olmaktadır [13, 28]. Ortam koşullarında yoğunlaşan organik bileşenler arasında yağ asitleri, resin asitleri, diterpenler ve triterpenler sayılabilir. Bu bileşenlerin kaynama noktaları daha yüksektir ancak 180-220 °C arasında odundan salınmaya yetecek buhar basıncı vardır. Kurutma havasında buhar olarak ve/veya havada askıda sıvı partikül olarak bulunabilirler. Kurutucudan çıktıktan sonra ortam havasında yoğunlaşarak çok küçük damla formunu alarak havada asılı kalırlar. Eğer su buharı yoğunlaşmazsa bu damlacıklar mavi sis şeklinde havada görülebilirler. Bu durumla genelde yüksek sıcaklıkta kurutma yapıldığında karşılaşılır [28].

Yüksek sıcaklıkta kurutma sonucu odunun termal bozunmaya uğraması ile formik asit, asetik asit, alkoller, aldehitler ve karbon dioksit salınır. Bu sıcaklığın ne kadar yüksek olduğu konusunda kesin bir belirleme yoktur. Literatürde 130 °C ve 200 °C gibi sıcaklıklarında termal bozunma görüldüğü belirtilmiştir. Termal bozunmaya neden olacak sıcaklık kurutulmuş odunun cinsine bağlı olduğu düşünülmektedir [28].

Gaz emisyonlarının temizlenmesinde genellikle sıvı tutma yöntemi kullanılmaktadır. Akmakta olan gaz akımı içerisinde sıvı solvent püskürterek veya gaz akımını bir sıvı solvent havuzu içerisinde geçirerek gaz akımı içerisindeki belli gaz bileşenleri ayrılabilir [13, 29]. Ancak bu durumda absorber solventin de temizlenmesi gerekecektir. Solventin temizlenmesi için havalandırma havuzları kullanılabilir. Ancak çoğu kez kirlenmiş solvent seyreltilerek lağım sistemine atılır. Ancak bu işlem uzun vadede sürdürülebilir bir çözüm değildir [13].

Partikül ve gaz emisyonları rejeneratif termal oksidasyon yöntemi ile temizlenebilir. Bu işlemde atık kurutma gazı yüksek sıcaklıktaki bir yakıcıya gönderilir. Atık kurutma gazı içindeki zararlı organik bileşenler ve partiküller yüksek sıcaklıkta (1300 °C) yakılarak temizlenirler [13].

Kurutma prosesinde kurutmadan kaynaklı uçucu organik bileşen emisyonu salınıp salınmadığını anlamak için dördüncü kez kurutulmuş numunelere ASTM E-1755 analizi uygulanmıştır. Bu analiz ile odunun yapısındaki kül, uçucu organik bileşen ve sabit karbon oranlarına bakılmıştır. Tablo 5.1’de bu analizin sonuçları kuru bazda ve kütlece yüzde olarak verilmiştir. Tablo 5.1’deki sonuçlardan da görüleceği gibi, kurutma şeklinin, kurutma sıcaklığının ve kurutma havası debisinin değişmesi ile odunun yapısındaki uçucu organik madde miktarı neredeyse değişmemektedir. Bunun anlamı, kurutma prosesi boyunca kurutmadan kaynaklı uçucu organik bileşen emisyonu salınımının olmadığıdır.

Tablo 5.1.ASTM E-1755 analizi sonuçları (kütlece %, kuru bazda)

Kurutma Koşulları (Kurutma havası debisi, kurutma şekli, kurutma havası sıcaklığı)	Kül	Uçucu Organik Bileşen	Sabit Karbon
Orijinal Numune	1,41	80,96	17,63
20 m ³ /h, Eş Yönlü,150 °C	1,53	80,26	18,20
20 m ³ /h, Eş Yönlü,175 °C	1,26	80,26	18,48
20 m ³ /h, Eş Yönlü,200 °C	1,65	79,88	18,48
20 m ³ /h, Zıt Yönlü,150 °C	1,45	80,27	18,27
20 m ³ /h, Zıt Yönlü,175 °C	1,49	80,95	17,56
20 m ³ /h, Zıt Yönlü,200 °C	1,46	80,24	18,30
30 m ³ /h Eş Yönlü,150 °C	1,70	80,16	18,14
30 m ³ /h, Eş Yönlü,175 °C	1,54	79,81	18,65
30 m ³ /h, Eş Yönlü,200 °C	1,43	80,41	18,15
30 m ³ /h, Zıt Yönlü,150 °C	1,52	80,66	17,82
30 m ³ /h, Zıt Yönlü,175 °C	1,78	80,40	17,82
30 m ³ /h, Zıt Yönlü,200 °C	1,96	79,49	18,55

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kızılçam (Pinus Brutia) odun parçacıklarının helezon konveyör tipi bir kurutucuda kuruma karakteristikleri incelenmiştir. Odun parçacıklarının her bir kurutma adımıdaki (ve/veya bir metre kurutucu boyunda) nem ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Ayrıca kurutma uçucu organik asit emisyonu çıkıp çıkmadığını incelemek için dört defa kurutulan numuneye ASTM E-1755 testi yapılarak yapısındaki uçucu organik madde miktarları araştırılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda artan kurutma havası debisi ve artan kurutma havası sıcaklığı ile odundan uzaklaştırılan nem miktarı artmıştır. Ayrıca kurutucu eş yönlü çalıştırıldığında zıt yönlü kurutmaya göre yine odundan uzaklaştırılan nem miktarının arttığı tespit edilmiştir. Uzaklaştırılan nem miktarının artması, buharlaşma hızının ve kurutma hızının arttığını göstermektedir.

Kurutma havası debisi 20 m³/h ve 30 m³/h olarak seçilmiştir. 30 m³/h debinin üstüne çıkıldığında kurutucunun işletilmesinde sorunlar yaşanmaktadır. Eş yönlü kurutma yapıldığında kurutma havası debisinin 30 m³/h'in üzerine çıkarılması sonucunda malzeme besleme haznesinden beslenen odun parçacıkları geri püskürmektedir. Zıt yönlü kurutma yapıldığında malzeme çıkış haznesinden olan hava kaçakları artarak kurutma prosesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Kurutma havası sıcaklığı ile kurutmadan kaynaklı uçucu organik bileşen emisyonları arasında ilişki incelenmiştir. Deneyler 150 °C, 175 °C ve 200 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta yapılmış ve tüm kurutma koşullarında odunun yapısındaki uçucu organik bileşen miktarının sabit kaldığı gözlenmiştir.

Her kurutma adımı sonunda toplanan numunelerin sıcaklıklar ve nemleri ölçülerek odun sıcaklığı – kurutma adımı/kurutucu boyu ve odun nemi – kurutma adımı/kurutucu boyu eğrileri çizilmiştir. Nem grafiklerinin lineer eğilimle azaldığı, sıcaklık grafiklerinin de birinci adımda sıcaklıklar pik yaptıktan sonra azalarak sabit kalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda kurutucuda kurutma işleminin kurutmanın sabit hız evresinde gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Deneyleerde helezon devri 18 d/dk olarak sabit tutulmuştur.

Yapılan deneyleerde en hızlı kuruma 30 m³/h kurutma havası debisi, 200 °C kurutma havası sıcaklığı ve eş yönlü kurutucu tipi koşullarında sağlanmıştır. Bu koşullarda nemli odun parçacıkları %60 nem oranından %25,79 nem oranına düşürülmüştür (nemli bazda, kütlece %).

Tez kapsamında kurutma prosesi için ortam havası elektrikli fırınlarda ısıtılarak kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda bir yakıcıdan çıkan atık gaz (egzoz gazı) veya kızgın buhar kurutma prosesinde hava yerine kullanılabilir. Ayrıca farmasötik gibi kurutma prosesi boyunca steril ortamda kalması gereken malzemelerin kurutulması için de helezon dışına yapılan bir sıcak su ceketini ile de kurutma gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada 0-2 mm kızılçam (Pinus Brutia) odun parçacıkları kurutulmuştur. Farklı boyutlardaki ve farklı türlerdeki odun parçacıklarının helezon konveyör kurutulması incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.fao.org/forestry/energy/en/> (Ziyaret Tarihi: 25 Ağustos 2011).
- [2] Eurostat, Forestry in EU and world, a statistical portrait, European Union, 91-94, 2011.
- [3] <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/techline/wood-biomass-for-energy.pdf> (Ziyaret Tarihi: 25 Ağustos 2010).
- [4] World Energy Council, 2010 Survey of energy resources, World Energy Council, 359-360, 2010.
- [5] http://ec.europa.eu/energy/renewables/targets_en.htm (Ziyaret Tarihi: 20 Ağustos 2011).
- [6] <http://www.erec.org/renewable-energy/bioenergy.html> (Ziyaret Tarihi: 21 Ağustos 2011).
- [7] Svoboda K., Martinec J., Pohoşely M., Baxter D., Integration of biomass drying with combustion/gasification technologies and minimization of emissions of organic compounds, *Chemical Papers*, 2009, **63**, 15–25.
- [8] Gündüz M., Ağaç ve kağıt kurutmasında ısı ve kütle transferinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1994, 33829.
- [9] Al-Kassir A., Gaňan J., Tinaut F. V., Theoretical and experimental study of a direct contact thermal screw dryer for biomass residues, *Applied Thermal Engineering*, 2005, **25**, 2816-2826.
- [10] Bakır F., Odun kurutulmasının deneysel ve matematiksel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007, 200177.
- [11] Kıyakoğlu E., Helezon çay kurutma makinesinin endüstriyel karakteristiklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010, 270704.
- [12] Selbaş R., Akışkan yataklı kurutma sistemlerinin analizi ve sunta kurutulmasında uygulanabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1998, 78799.
- [13] Pang S., Mujumdar A. S., Drying of woody biomass for bioenergy: Drying technologies and optimization for an integrated bioenergy plant, *Drying Technology*, 2010, **28**, 690-701.

- [14]Glass S. V., Zelinka S. L., *Moisture relations and physical properties of wood, wood handbook*, Forest Products Laboratory United States Department of Agriculture Forest Service, USA, 2010.
- [15]Ragland K. W., Aerts D. J., Properties of wood for combustion analysis, *Bioresource Technology*, 1990, **37**, 163-164.
- [16]Doğanay T., *Kurutma, modern farmasötik teknoloji*, Türk Eczacılar Birliği Eczacılık Akademisi Yayınları, İstanbul, 2009.
- [17]Kaya A., Kurutmada ısı ve kütle transferinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008, 222203.
- [18]Perry H. R., Green W. D., *Perry's chemical engineers' handbook*, 7th Ed., McGraw Hill, New York, 1999.
- [19]Öztürk İ. T., Klima için genel bilgiler, Yayınlanmamış Ders Notları.
- [20]Özer A. E., Psikrometri, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi Temel Bilgiler, Tasarım ve Uygulama Eki*, 2003, **2**, 1-15.
- [21]<http://www.fao.org/docrep/x5036e/x5036E0x.htm> (Ziyaret Tarihi: 30 Ekim 2011).
- [22]Mujumdar A., *Handbook of industrial drying*, 3rd Ed., Marcell Dekker, New York, 2006.
- [23]Uslu M. K., Certel M., Dielektrik ısıtma ve gıda işlemede kullanımı, *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2006, **3**, 61-69.
- [24]Günerban H., Endüstriyel kurutma sistemleri, *TTMD Dergisi Temel Bilgiler, Tasarım ve Uygulama Eki*, 2005, **13**, 1-8.
- [25]Gürses L. Ö., *Gıda işleme mühendisliği II*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara, 1986.
- [26]Kırmacı V., Dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve performans deneylerinin yapılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 233875.
- [27]<http://www.epa.gov/pm/> (Ziyaret Tarihi: 05 Mayıs 2012).
- [28]Gransström K., *Emissions of volatile organic compounds from wood*, Karlstad University Studies, Karlstad, 2005.
- [29]http://www.epa.gov/apti/Materials/APTI%20415%20student/415%20Student%20Manual/415%20SM%20Chapter%205_Final.pdf (Ziyaret Tarihi: 05 Mayıs 2012).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Arabacı H., **Kaplan Ö.**, Kumru P. Y., Kentsel katı atık yönetimi, *XI. Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 23-24 Haziran 2011.
- [2] **Kaplan Ö.**, Çelik C., Olgun H., Kassir A., Determination of drying characteristics of turkish pine (pinus brutia) woodchips in a screw dryer in various drying conditions, *6th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, İzmir, Turkey, 28-30 June 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kırklareli'de tamamladı. 2009 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2010 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.